

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologies
Département Génie Civil



Polycopié pédagogique

Cours & Travaux Pratiques
Matériaux De Constructions - MDC

Mhammed Abdeldjalil

Programme pour les étudiants de :
Licence Génie Civil L2 (S4) & L3 (S5)

Année : 2022/2023

Avant-Propos

Ce polycopié est destiné aux étudiants de Licence en génie civil et du Master en matériaux de génie civil. Il couvre les principaux points du cours sur les matériaux de construction, et est rédigé de manière à permettre aux étudiants de comprendre facilement les concepts de base dans le domaine du génie civil (matériaux). Il a été rédigé comme un livre, sous la forme de quatre parties principales : Matériaux De Constructions 1 & 2 (MDC1, MDC2) pour la licence, chaque partie contient des chapitres qui suivent le plan harmonisé, et sont tout à fait distincts et indépendants.

Ces cours ont pour but d'initier l'étudiant aux méthodes expérimentales et aux études de formulation des bétons et de caractériser et classer les matériaux de construction. Comme pour toutes les matières enseignées, l'étudiant doit avoir des connaissances préalables recommandées de :

- Technologie du béton, Bétons innovants, Béton armé (BA), Béton précontraint (PC), Résistance des matériaux (RDM),
- Dans la première partie de Licence (S4-L2), un aperçu général des matériaux, des classifications importantes et des propriétés des termes les plus courants dans le domaine des matériaux sont donnés, ainsi que des informations récentes sur les granulats, les liants et les mortiers.
- La deuxième partie de Licence (S5-L3), est consacrée aux bétons, classification, caractéristiques physiques et mécaniques, ajouts, adjuvants, formulation des bétons, essais sur les bétons frais et durcis, notions sur les nouveaux bétons et leurs applications. Classification, Matières premières, Fabrication de produits céramiques, Métaux ferreux et non ferreux, Verre.
- Une brève bibliographie est proposée à la fin de ce document pour compléter et approfondir la compréhension. Si vous avez des commentaires, n'hésitez pas à me contacter, e-mail :

abdeldjalilmed@univ-adrar.edu.dz

Table des matières

Avant-Propos.....	2
Table des matières.....	3
Introduction.....	6
Partie I : MDC1 (Cours & TP pour L2).....	8
Chapitre I : Généralités.....	9
I.1 Historique des matériaux de construction.....	9
I.2 Classification des matériaux de construction.....	9
I.3 Propriétés des matériaux de construction.....	10
I.3.1 Propriétés physiques.....	10
I.3.2 Propriétés mécaniques.....	13
I.3.2.1 La déformation :.....	13
Déformation élastique :.....	14
Déformation plastique :.....	14
Déformation visqueuse :.....	14
I.3.2.2 Fluage et Relaxation.....	14
I.3.2.3 La résistance.....	15
I.3.2.4 Autre Propriétés (programme de master).....	17
Chapitre II : Les Granulats.....	18
II.1.1 Courbes granulométriques.....	18
II.1.3 Module de finesse.....	20
II.3 Caractéristiques physiques.....	21
II.3.1 La masse volumique absolue.....	21
II.3.2 La masse volumique réelle.....	22
II.3.3 La masse volumique apparente.....	22
II.3.4 Propreté des granulats.....	22
II.3.5 Forme des granulats.....	23
II.4 Caractéristiques mécaniques.....	24
II.5 Différents types de granulats.....	24
II.5.1 Les granulats naturels.....	24
II.5.2 Les granulats artificiels.....	25
II.5.3 Echantillonneur.....	26
I. Chapitre III: Les liants.....	27
II.1 Les liants.....	27
III.1.1 Utilisation des liants.....	27
III.1.2 Provenances des liants.....	27

III.1.3 Production du plâtre	27
III.1.4 Production de la Chaux	27
III.1.5 Production du Ciment.....	28
III.2 Classification [2, 3]	28
III.2.1 Chaux aérienne.....	28
III.2.2 Chaux hydraulique	29
III.2.3 Les Ciments portland.....	29
III.3 Constituants principaux	32
III.4 Classification des ciments en fonction de leur composition.....	33
II. Chapitre IV : Les mortiers.....	34
IV.1 Composition.....	34
IV.2 Les liants	34
IV.3 Les sables	34
IV.4 Les adjuvants.....	35
IV.5 Les ajouts	35
IV.6 Les différents mortiers	35
IV.6.1 Mortiers de ciment	35
IV.6.2 Mortiers de chaux.....	35
IV.6.3 Mortiers bâtards	35
IV.6.4 Mortier industriel	36
IV.7 Les caractéristiques principales.....	36
IV.7.1 Ouvrabilité	37
IV.7.2 Prise.....	38
IV.7.3 Résistances mécaniques	39
IV.7.4 Retraits et gonflements.....	40
Travaux Pratiques Matériaux de construction 1 (L2-S4)	41
Fiche de TP N°1 : Masses volumiques du sable, et gravier	41
Fiche de TP N°2 : Analyse granulométriques du sable et du gravier.....	43
Fiche de TP 3 :Teneur en eau.....	45
Fiche de TP 4 : Foisonnement du sable.....	46
Fiche de TP N°5 : Equivalent de sable.....	47
Fiche de TP N°6 : Propreté et forme des granulats	49
Fiche de TP N°7 : Porosité du sable et gravier.....	50
Fiche de TP N°8: Essaie non distractif (scléromètre)	51
Fiche de TP N°9 : Essai de consistance et de prise du ciment.	52
Fiche de TP N°10: Essai de prise du ciment.	53

Partie II : MDC2 (Cours & TP pour L3)	54
Chapitre1 : Les Bétons	55
I.1 Définition et classification	55
I.2 Classes de résistance à la compression	55
I.3 Classe de résistance des bétons légers	58
I.4 Dimension maximale des granulats	59
I.5 Formulation des bétons,	60
I.6 Méthodes de formulation du béton.	61
I.6.1 Etapes de la formulation du béton "méthode de Dreux - Gorisse"	62
I.6.2 Données Indispensables [4-6]	62
I.7 Caractéristiques physiques et/ou mécaniques [4-6]	62
I.7.1 Caractéristiques principales des bétons [4-6].....	62
I.7.2 Caractéristiques Physiques.....	62
I.7.3 Caractéristiques Mécaniques.....	63
I.8 Essais sur béton frais,.....	64
I.8.1 Consistance	64
I.8.2 Teneur en air : NF EN 12350-7.....	66
I.8.3 Cas particulier des BAP	67
I.9 Essais sur bétons durcis,.....	68
I.9.1 Résistance en compression : NF EN 12390-3	68
I.10 Adjuvants,	69
I.11 Additions minérales,	70
I.12 Notions sur les nouveaux bétons et leurs applications.....	73
Chapitre II : Produits Ceramiques	74
II.1 Généralités	74
II.2 Propriétés générales des céramiques.....	74
II.2.1 Liaison et Structure.....	74
II.2.2 Microstructure et propriétés.....	74
II.3 Classification des produits Céramiques (10-15).....	75
II.3.1 Titanate de plomb $PbTiO_3$	75
II.3.2 Zirconate de plomb $PbZrO_3$	75
II.3.3 La solution solide Titanate- Zirconate de plomb $Pb (Zr ,Ti)O_3$	75
II.3.3.1 Matière première,.....	76
II.3.4 Caractéristiques communes	77
II.3.5 Quelques céramiques	77

II.4 Fabrication des produits céramiques.....	78
II.4.1 Production de briques	79
II.4.2 Régularité des formes.	82
II.4.3 Produits Céramiques (Produits Rouges).....	83
Chapitre III : Métaux ferreux et non ferreux	84
III.1 Généralités,.....	84
III.2 Propriétés des métaux (Physiques, chimiques et mécaniques),.....	84
III.3 Protection des métaux ferreux contre la corrosion	85
III.4 Classification des aciers selon compositions,.....	86
III.5 Principales fontes de 1ère fusion :	88
III.5.1 Classification des fontes	88
III.5.2 Utilisations :	89
Chapitre IV : Le verre	90
IV.1 Introduction :	90
IV.2 Élaboration,.....	90
IV.3 Procédé de fabrication,.....	90
IV.4 Propriétés et utilisations.	91
Travaux Pratiques Matériaux De Constructions 2 (L3-S5).....	94
Fiche de TP N°01 : Détermination des données indispensables du granulats. (Graviers).....	95
Fiche de TP N°02 : Détermination des données indispensables du granulats. (Sables).....	97
Fiche de TP N°03 : Détermination des données indispensables du liant. (Ciment).....	98
Fiche de TP N°04 : Etude de la formulation de béton. (Méthode de Dreux Gorisse).....	99
Fiche de TP N°05 : Essais sur béton frais.	103
Fiche de TP N°06 : Essais sur béton durci.	104
Conclusion.....	105
Références	106
III. Annexes (canevas 2021/2020)	107

Introduction

Les matériaux de structure, souvent appelés MDC, font partie des matériaux de génie civil. Elle s'intéresse à l'étude, de manière théorique et pratique, de la réponse physico-chimique et mécanique des matériaux aux sollicitations (identification, composite, minéralogique, compression, flexion). Il permet la formulation du matériau composite, des paramètres physico-chimiques (identification) ainsi que des paramètres mécaniques. Le MDC est en constante évolution en fonction des développements dans le domaine pratique des matériaux, le domaine expérimental des matériaux (technologie des matériaux) ainsi que l'aspect analytique imposé par les progrès rapides de l'informatique, et d'autre part, il doit aussi répondre à un besoin requis par une ingénierie de plus en plus performante. Ce support de cours et ces applications sont destinés aux étudiants de deuxième/troisième année de licence du système LMD en génie civil. Ils sont élaborés conformément au programme officiel fixé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (République Algérienne), l'accent est mis sur les méthodes pratiques illustrant des cas réels d'essais des composants des matériaux de construction ordinaires.

Il est destiné à assurer la transition entre les notions souvent analytiques du MDC et leurs conséquences pratiques qui doivent être une des préoccupations fondamentales de l'ingénieur de la construction. Il doit également permettre à l'étudiant, à partir d'un nombre limité de connaissances de base, d'accéder progressivement, par un travail personnel effectué sur des travaux pratiques de constitution et de mélange de bétons et mortiers, à la maîtrise du domaine des matériaux en génie civil. Ce manuel est divisé en deux parties de quatre chapitres chacune, et deux programmes de fiches de travaux pratiques. Le contenu de la première partie de MDC1 (L2) concerne un aperçu général des matériaux et des composants du béton et du mortier. La deuxième partie de MDC2 (L5) définit les caractéristiques des bétons et leur formulation, ainsi que la fabrication des céramiques, des métaux et du verre.

Enfin, les deux dernières parties, la première de MDC1 avec des fiches de travaux pratiques est consacrée à l'étude des composants (granulats, liants et mortier). Dans la deuxième partie de MDC2, l'étudiant apprendra une méthode de formulation du béton.

2021/2022

Partie I : MDC1 (Cours & TP pour L2)

Matériaux de constructions

2^{ème} Année

Licence Génie Civil

M. ABDELDJALIL
UADA

Chapitre I : Généralités

I.1 Historique des matériaux de construction

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord l'importance des matériaux dans le métier d'ingénieur.

Les deux sections suivantes traiteront de la classification et des propriétés principales des matériaux.

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories, mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon les domaines d'emploi et les caractéristiques principales.

Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être généralement divisées en plusieurs groupes telles que :

Propriétés physiques,

Propriétés mécaniques,

Propriétés chimiques,

Propriétés physico-chimiques,

Propriétés thermiques.

Dans la partie I.1, nous verrons la classification des matériaux.

Dans la partie I.2, nous détaillerons les différentes propriétés physiques et mécaniques des matériaux de construction.

I.2 Classification des matériaux de construction

Les deux sections suivantes traiteront de la classification et des propriétés principales des matériaux.

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories, mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon les domaines d'emploi et les caractéristiques principales.

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que :

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories :

Les métaux

Les polymères

Les céramiques

Mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon des domaines d'emploi et des caractéristiques principales :

Les matériaux de construction.

Les matériaux de protection

Les **matériaux de construction** sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des forces importantes :

- Pierres
- Terres cuites
- Bois
- Béton
- Métaux, etc

Les **matériaux de protection** sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux :

- Enduits
- Peintures
- Bitumes, etc.

I.3 Propriétés des matériaux de construction

I.3.1 Propriétés physiques

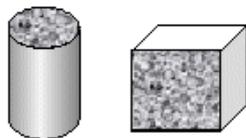
(La dimension, la densité, la masse volumique de différentes conditions, la porosité, l'humidité etc..).

La masse volumique apparente

Définition : C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée γ_{ap} exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

Pour les matériaux solides

Les roches naturelles, le béton, le bois, on peut faire des échantillons de forme géométrique cubique, cylindrique figure 01.



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

Figure. Echantillons de forme géométrique cubique, cylindrique [1]

La masse volumique apparente suite

Pour les matériaux incohérents la détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu) figure 02.

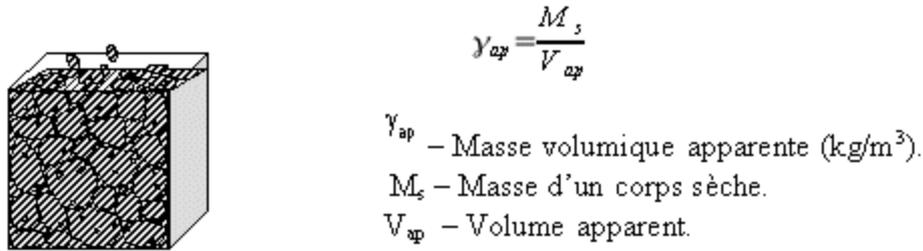


Figure. 02 Ensemble de grains – sable ou gravier [1]

La masse volumique apparente

Pour les matériaux de construction qui n'ont pas de forme géométrique (forme de patate).

$$\gamma_o = \frac{M_s}{\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1} - \frac{g_P}{\gamma_P}}$$

$M_{S+P} - M_{(S+P)L}$ - 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.

Dans ce cas, les échantillons étudiés doivent être enrobés de paraffine afin d'être protégés de la pénétration de l'eau, ensuite on va les peser dans l'eau.

Pour déterminer la masse volumique des matériaux de ce type on a:

M_s : Masse sèche d'échantillon (g),

M_{S+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),

g_P : Masse de la paraffine ayant enrobé de l'échantillon,

γ_P : masse volumique absolue de paraffine.

La masse volumique absolue

Définition : C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine figure 03 (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou T/m³).

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

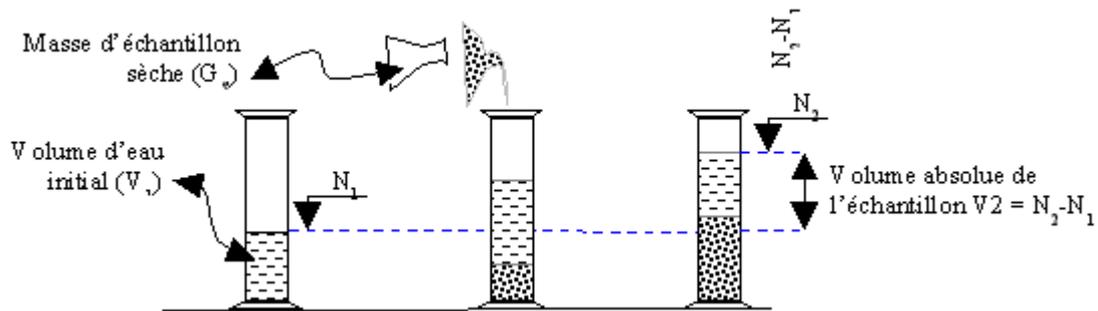


Figure. 03 Essai de la masse volumique absolue [1]

La porosité et compacité (les granulats)

La porosité est le rapport du volume vide au volume total figure 04. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}}$$

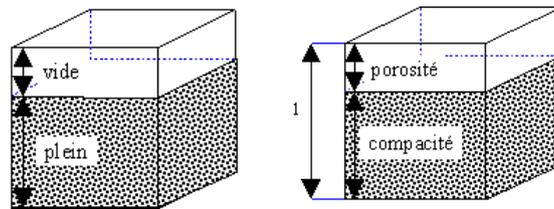


Figure. 04 Volume quelconque et volume unitaire [1]

Compacité :

La porosité et compacité (les granulats), la porosité et la compacité sont liées par relation :

$$C = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total}}$$

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total figure 04. Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

L'humidité

Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience. En général l'humidité est notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

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

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

G_h : est la masse humide d'échantillon.

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

L'absorption de l'eau

L'absorption de l'eau du matériau est la capacité de conserver des échantillons quand ils sont immergés au sein de l'eau à température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique.

A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau.

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

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

G_{ab} : est la masse absorbante.

G_s : est la masse sèche d'échantillon.

V_0 : est le volume apparent du matériau.

Degré de Saturation (Teneur en eau)

La résistance mécanique des matériaux dépend de plusieurs facteurs. Un des plus importants facteurs influençant la résistance est le degré de saturation. On a remarqué que les matériaux absorbants de l'eau, ont une résistance certainement diminuée. C'est pourquoi on doit déterminer le degré de saturation de matériaux.

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

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

BH : est le degré de saturation (%)

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

G_s : est la masse sèche d'échantillon.

V_0 : est le volume apparent du matériau.

I.3.2 Propriétés mécaniques

(La résistance en compression, en traction, en torsion etc..)

I.3.2.1 La déformation :

La déformation est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes, la déformation est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction figure 05. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes :

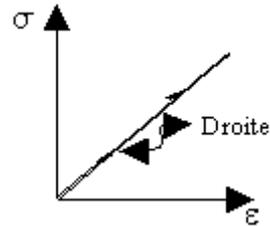


Figure. 05 Evolution de la déformation de matériaux de construction [1]

Déformation élastique :

Lorsque l'on effectue un essai de mise en charge et si, après décharge le corps reprend les mêmes formes qu'il avait avant, il ne reste aucune déformation résiduelle, on dit que le corps a un comportement parfaitement élastique figure 06.

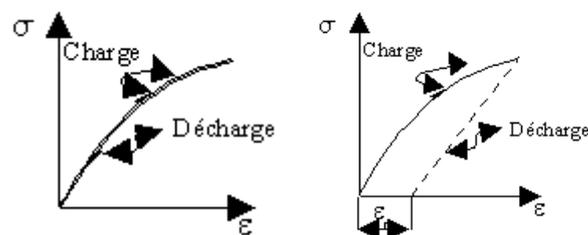


Figure. 06 La déformation élastique/plastique de matériaux de construction [1]

Déformation plastique :

La déformation est dite plastique figure 06, si après décharge le corps ne reprend pas les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, il reste quelques déformations. Cette déformation est appelée aussi déformation résiduelle.

Déformation visqueuse :

La déformation est dite visqueuse, si après décharge le corps ne reprend pas instantanément les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, mais il se produit lentement.

1.3.2.2 Fluage et Relaxation

Fluage proprement dit = Fluage sous charge constante. Fluage sous charge variable = Superposition de fluages débutant à des âges variables. Relaxation = Fluage sous charge décroissante variable telle que la déformation reste constante.

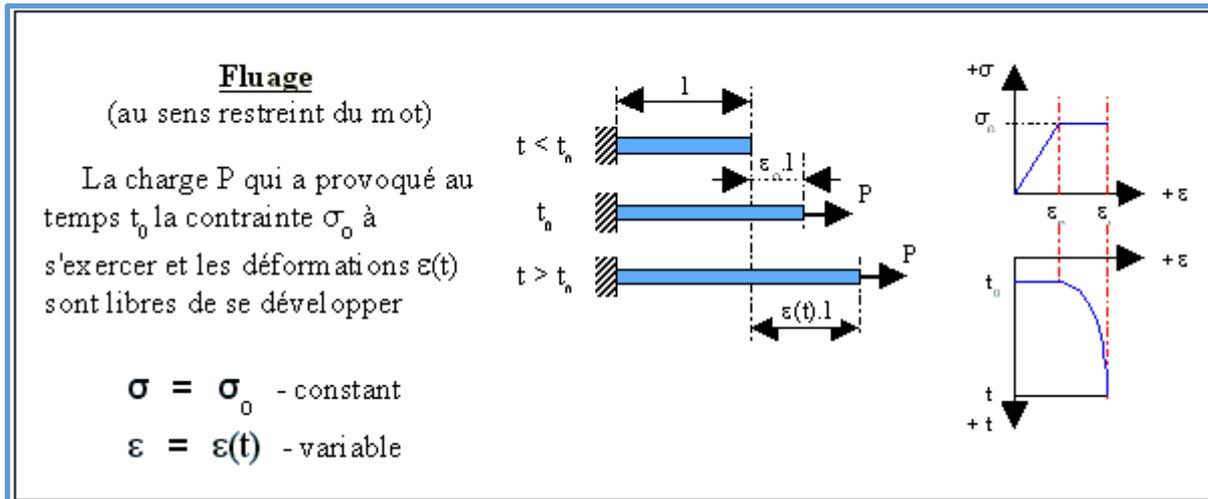


Figure. 07 Fluage proprement [1]

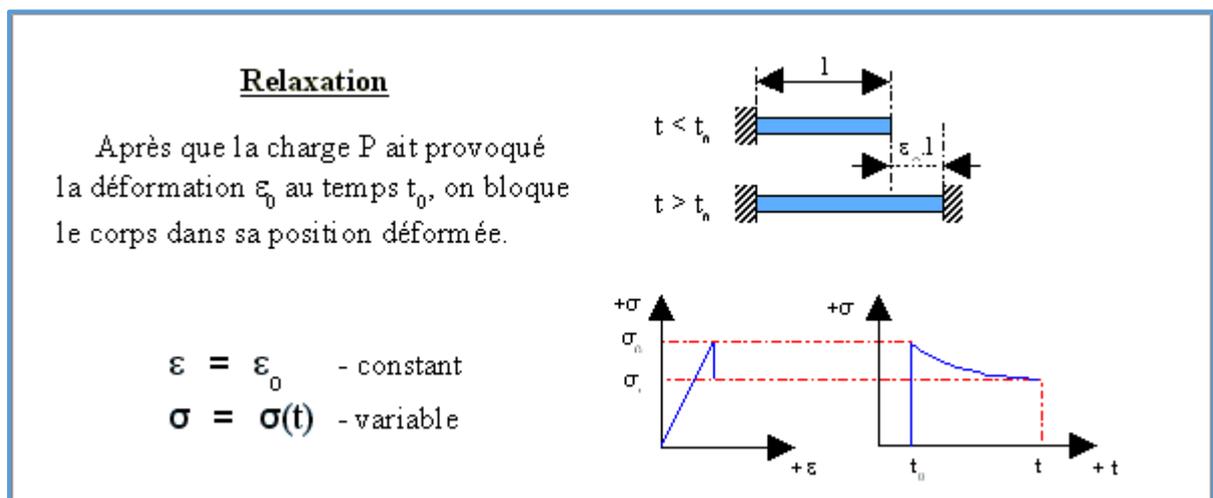


Figure. 08 détail du phénomène Relaxation [1]

1.3.2.3 La résistance

La résistance des matériaux est un des cours de la formation des ingénieurs en génie civil. Dans ce cours on apprend de façon plus détaillée les calculs du comportement des matériaux, mais dans le cours de "Matériaux de construction" on va montrer seulement la résistance en compression et en traction voire figures 09 et 10.

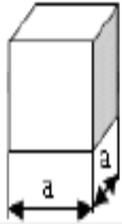
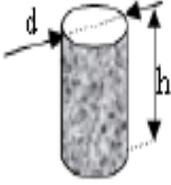
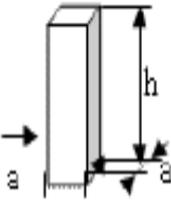
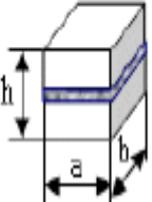
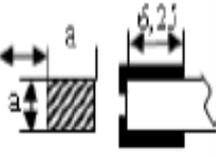
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm ²

Figure.9 Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression[1]

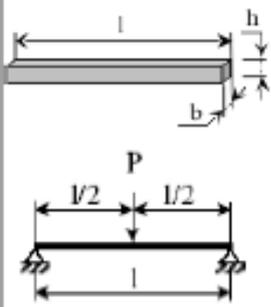
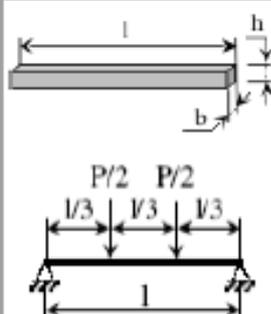
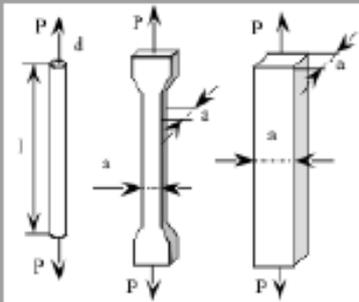
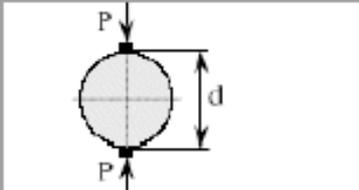
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pf} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 $d_0=1;$ $l_0=5; l \geq 10$
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	$d=15; l=30$ $d=16; l=32$

Figure.10 Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion[1]

I.3.2.4 Autre Propriétés (programme de master)

Propriétés chimiques : (L'alcalinité, l'acide etc..), Propriétés physico-chimiques : (L'absorption, la perméabilité, le retrait, le gonflement etc..), Propriétés thermiques : (La dilatation, la résistance et comportement au feu, etc..).

Chapitre II : Les Granulats

II.1 Granularité

La notion de **granularité** définit la taille du plus petit élément, de la plus grande finesse d'un système. Quand on arrive au niveau de granularité d'un système, on ne peut plus découper l'information.

- Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre.
- Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé.
- Le terme granulats, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.
- Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.
- Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons, du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher; u point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats.

II.1.1 Courbes granulométriques

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de beaucoup de facteurs (Fig 11). Généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but, il faut : (pour réduire la porosité).

Un maximum de granulats par unité de volume de béton.

Un minimum de surface spécifique.

Par ailleurs :

Il faut choisir D_{max}

La proportion de chaque dimension des

Il faut réduire la teneur en éléments fins au minimum.

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

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

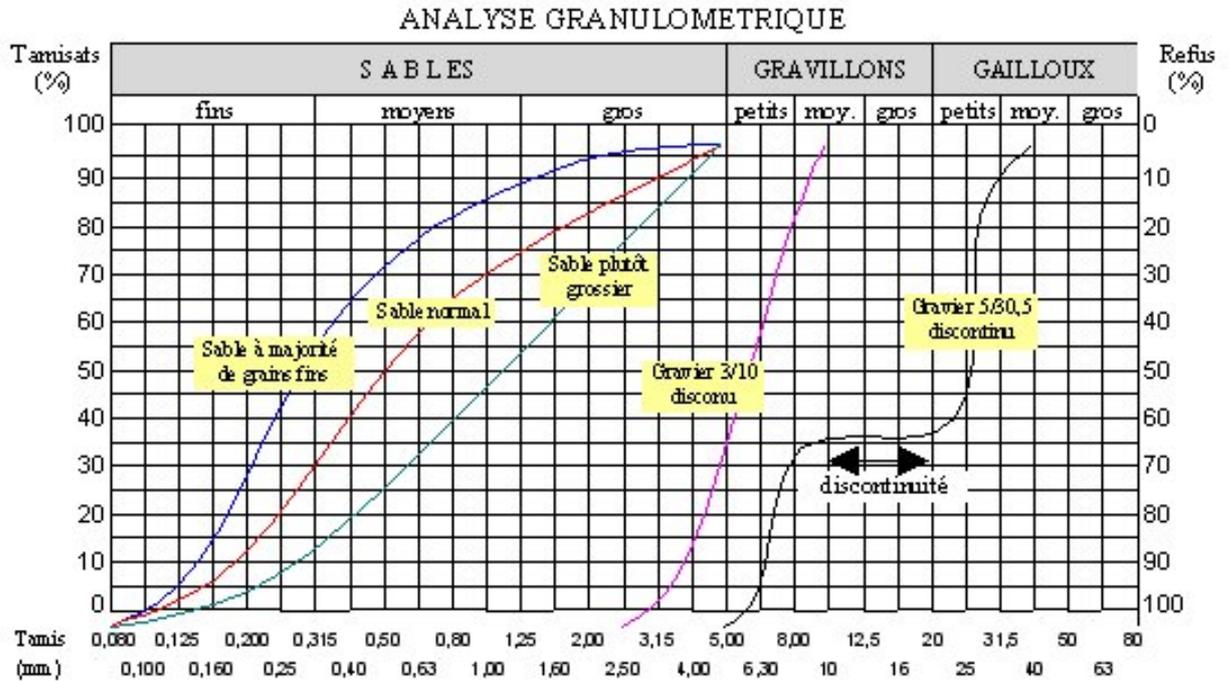


Figure. 11 Courbes granulométriques de différentes cas [2]

II.1.2 Dimensions nominales des tamis

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes :

Tableau. 01 Les dimensions nominales normalisées des tamis figure 12 [2]

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0,08	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,40	0,50	0,63	0,80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30	8,00	10,00
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12,50	16,00	20,00	25,00	31,50	40,00	50,00	63,00	80,00		

Tamis (mailles carrées)



Figure. 12 Tamiseuse et Tamis (mailles carrées) [2]

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

II.1.3 Module de finesse

S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton.

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable normal présenté sur la fig. 2, son module de finesse est égal à: $MF = (98 + 90 + 75 + 53 + 28 + 10)/100 = 3,54$ [9, 10]

II.2 Classification des granulats

On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoire (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum d , des grains et le deuxième le diamètre maximum D .

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D . Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné $0/D$.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par d et D [9]

Les fines	$0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm,
Les sables	$0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm,
Les gravillons	d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
Les cailloux	d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,

Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

Il peut être utile dans certains cas (tableau 02) d'écrire la classification suivante :

Tableau. 02 classification du granulat selon la dimension de la maille des tamis [2]

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

Les caractéristiques des granulats

II.3 Caractéristiques physiques

II.3.1 La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau (figure 13), déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

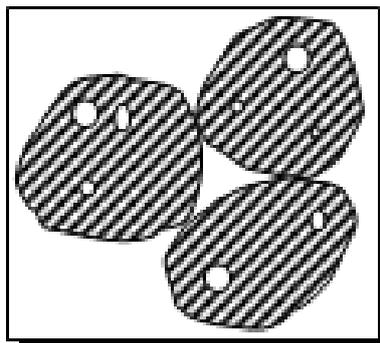


Figure. 13 Volume hachuré = Volume absolu (sans pores) [1]

II.3.2 La masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules (figure 14).

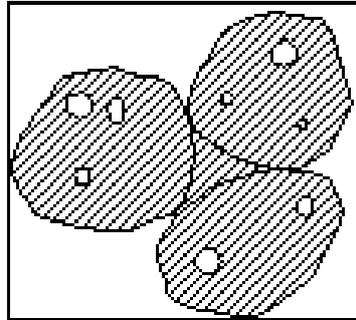


Figure. 14 Volume hachuré = Volume réelle (apparent) [1]

II.3.3 La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules (figure 15).

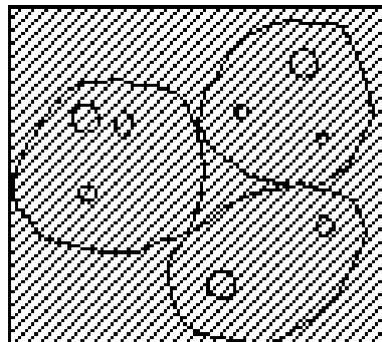


Figure. 15 Volume hachuré = Volume du récipient[1]

Autres propriétés

- Absorption, Porosité et compacité, Teneur en eau

II.3.4 Propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton doivent être propres (tableau 3 et figure 16), car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. La propreté désigne : d'une part, la 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.

D'autre part, les 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, les fragments de racine.

Tableau.03 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable[2]

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
60 ≤ PS < 70	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
70 ≤ 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.

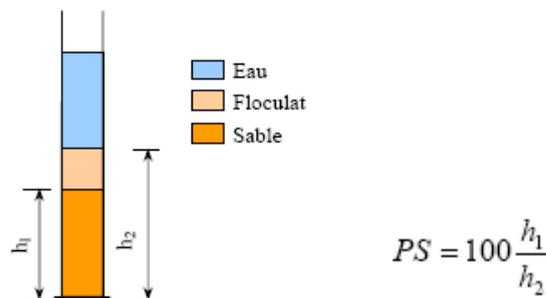


Figure. 16 Détermination de l'équivalent de sable par piston.

II.3.5 Forme des granulats

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques (L, E, G) figure 17

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

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation. Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi :

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$ $\frac{G}{E} > 1,58$

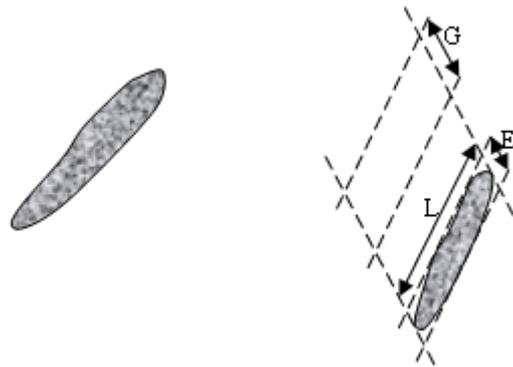


Figure. 17 Forme d'un granulat[1]

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.

L'état de surface des grains influence :

La compacité du mélange. L'adhérence du granulat à la pâte de ciment. La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube tableau 4.

Tableau.04 Forme des granulats[1]

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

II.4 Caractéristiques mécaniques

Méthodes de mesures

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression.

Essai Micro Deval le principe de cet essai 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.

Le coefficient Los Angeles calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat.

II.5 Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

II.5.1 Les granulats naturels

- Origine minéralogique, figure 18.

- Granulats roulés et granulats de carrières

II.5.2 Les granulats artificiels

- Sous-produits industriels, concassés ou non, figure 19.
- Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement
- Granulats allégés par expansion ou frittage
- Les granulats très légers

Granulats roulés



Figure. 18 *granulat naturel roilé*

Granulats concassés



Figure. 19 *Granulat concassé*

Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire figures 20 et 21)

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.

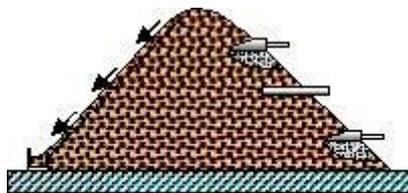


Figure. 20 *Echantillonnages en laboratoire*

Quartage

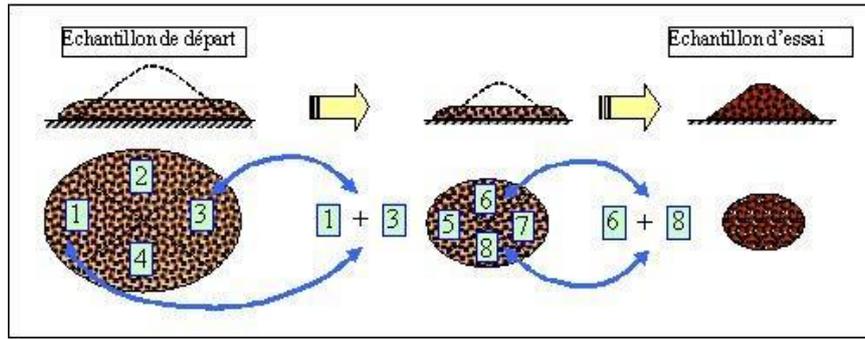


Figure. 21 Etapes de quartages[2]

II.5.3 Echantillonneur

Cet appareil de laboratoire figure 22, 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 en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir l'échantillon nécessaire, après trois ou quatre opérations identiques.



Figure. 22 Echantillonneur

Le procédé peut être résumé par la (figure 23) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse 3m.

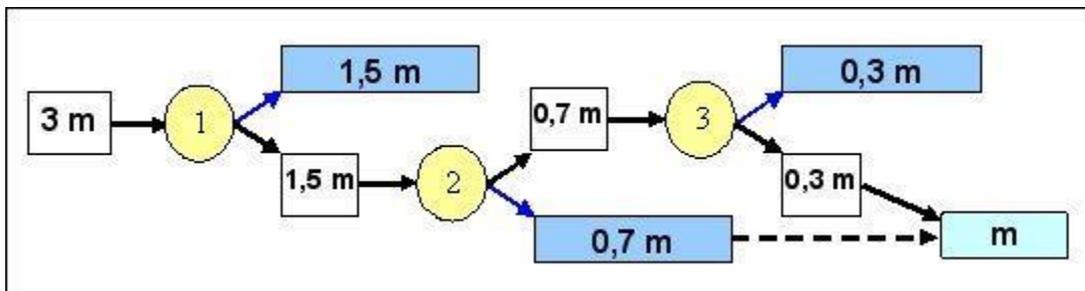


Figure. 23 Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur

Chapitre III: Les liants

II.1 Les liants

Liants aériens qui ne durcissent et ne peuvent conserver leurs propriétés mécaniques qu'à l'air (ex.: chaux grasse, plâtre).

Liants hydrauliques qui durcissent et conservent leurs propriétés mécaniques non seulement à l'air mais aussi dans l'eau (ex.: chaux hydraulique, ciment Portland,...).

Liant hydrocarboné est un matériau adhésif (un liant) contenant du bitume, du goudron, ou les deux. Cet élément agrégé avec des granulats fournit des « matériaux enrobés ».

III.1.1 Utilisation des liants

Les liants destinés à la construction se composent de deux grandes familles distinctes par leur mode de prise :

les produits aériens et hydrauliques. Les premiers réalisent leur prise en présence de gaz carbonique : il s'agit d'une prise aérienne. Alors que la prise des seconds se fait en présence d'eau. La famille des liants hydrauliques se subdivise en deux sous familles : les ciments et les chaux hydrauliques.

III.1.2 Provenances des liants

1. Plâtre : Gypse déshydraté
2. Chaux : Calcaire
3. Ciment <- Calcaire + Argile Ils sont dits hydrauliques parce qu'ils nécessitent de l'eau pour leur solidification, contrairement aux liants hydrocarbonés (enrobés) qui sont insolubles dans l'eau.

III.1.3 Production du plâtre

- Chauffage du gypse à 200°C
- Pulvérisation Le plâtre est très sensible à l'humidité.

Il ne peut pas être utilisé en extérieur

III.1.4 Production de la Chaux

- Cuisson du calcaire à 800-1000°C ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

- Formation de chaux vive (CaO) qui réagit violemment avec l'eau, les acides ou les métaux -> risque d'inflammation
- Hydratation de la chaux -> Ca(OH)_2 = chaux éteinte

III.1.5 Production du Ciment

- Fabrication du clinker par cuisson de marne argileuse et de craie à 1500°C
- Obtention du ciment Portland par broyage fin.

III.2 Classification [2, 3]

III.2.1 Chaux aérienne

Chaux aérienne (CL90, CL80, CL70)

CL : chaux aérienne calcique : CL 90 - CL 80 - CL 70

DL : chaux aérienne dolomitique : DL 85 - DL 80

CL 90 - Q : chaux aérienne calcique vive

CL 90 - S : chaux aérienne calcique hydratée

DL 85 - S1 : chaux aérienne dolomitique semi-hydratée

DL 85 - S2 : chaux aérienne dolomitique totalement hydratée

La chaux aérienne durcit uniquement au contact du CO_2 , d'où son nom

Elle sert à réaliser des enduits ou mortiers souples

Temps de séchage très long, attention aux temps froids/humides

A partir de calcaire pur.

Les chaux aériennes sont issues de pierre calcaire très pure de l'ordre de 95 à 99.5 % de carbonate de calcium (calcaire figure 24). Les carrières permettant d'obtenir les carbonates les plus purs sont très recherchées. Les nombreuses applications de la chaux aérienne imposent au chaufournier de sélectionner le gisement le plus pur et le plus constant. En effet de nombreuses impuretés peuvent perturber leur utilisation que ce soit, par exemple, la présence de soufre et de phosphore pour les applications sidérurgiques.

L'extraction de la matière première est réalisée par tir à l'explosif afin d'obtenir des blocs concassés. Une fois cette matière première sélectionnée puis extraite, il est nécessaire de la débarrasser de ses impuretés, c'est à dire d'éliminer le mieux possible les fines particules chargées d'impuretés. Suivant la géologie des carrières, il est parfois même nécessaire de laver les pierres. Les pierres doivent être calibrées en différentes granulométries : de façon générale, de 30 à 120 mm pour les fours droits et de 05 à 40 mm pour les fours rotatifs.

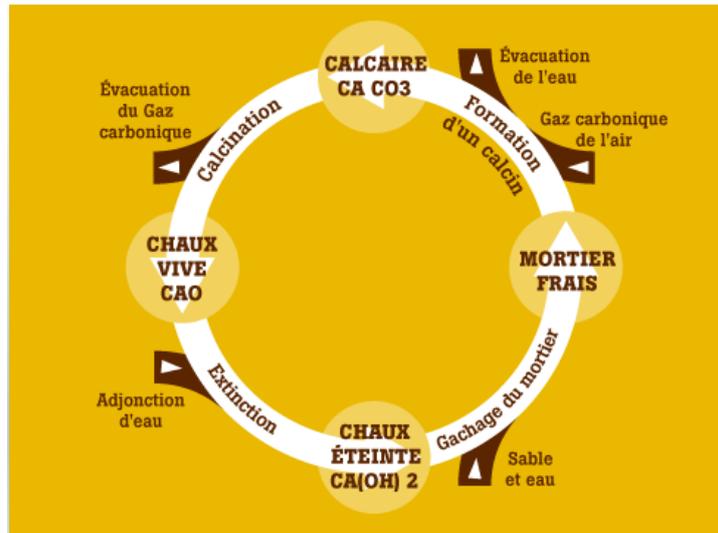


Figure. 24 La chaux aérienne est issue du calcaire (CaCO_3) le plus pur possible (moins de 3% d'impuretés). [3]

III.2.2 Chaux hydraulique

La chaux hydraulique contient 5 à 30% d'argile

Elle sert à réaliser des ouvrages plus durs (dalles de béton de chaux)

Prise plus rapide, possible au contact de l'eau, d'où son nom a partir de calcaire impur.

III.2.3 Les Ciments portland

- Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.
- Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

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

- Préparation du cru
- Cuisson
- Broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes (figure 25) de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée figures 26, 27).

- Fabrication du ciment par voie demi-sèches (en partant de la voie sèche).

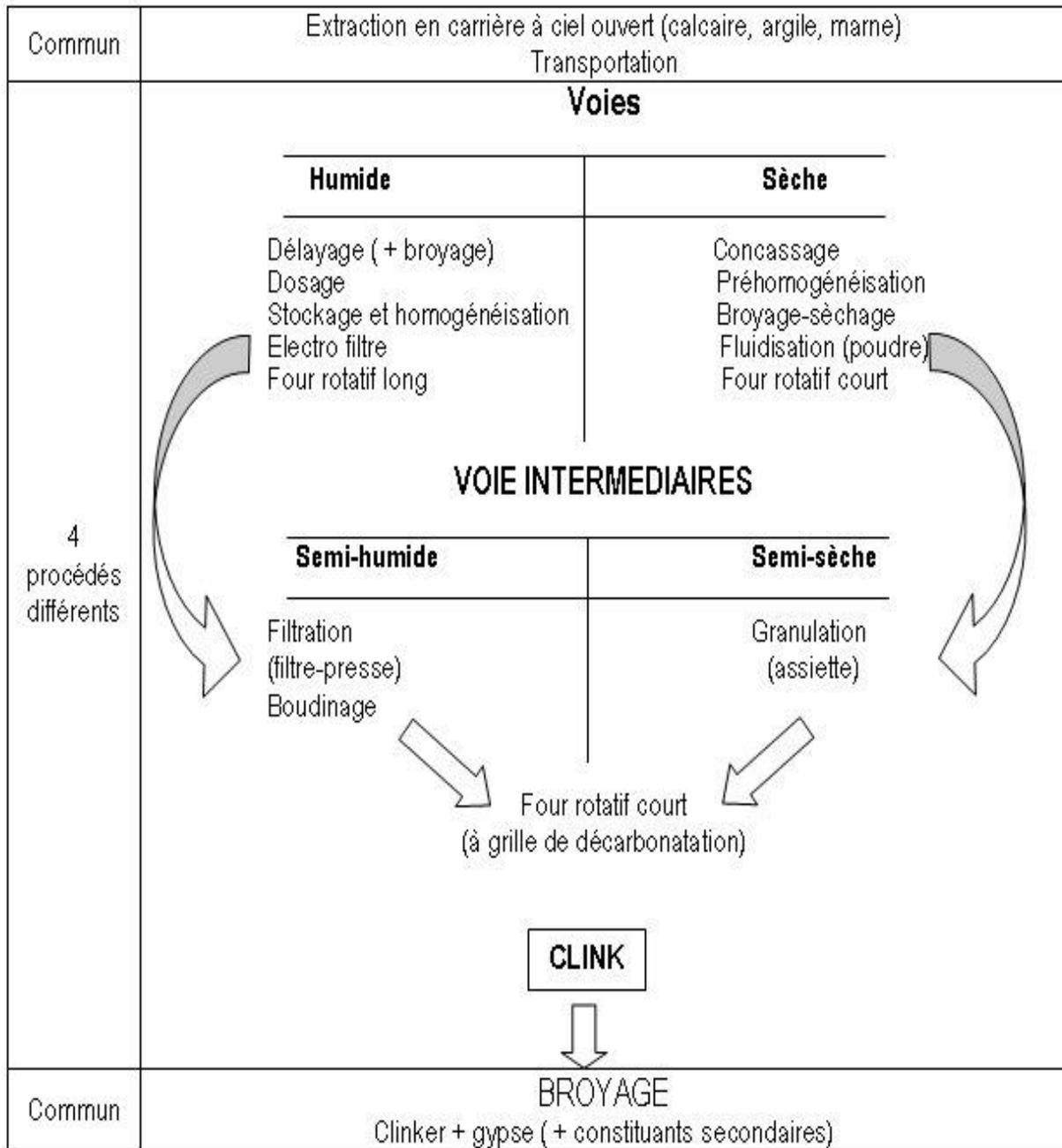


Figure. 25 Le schéma de la fabrication du ciment[3]

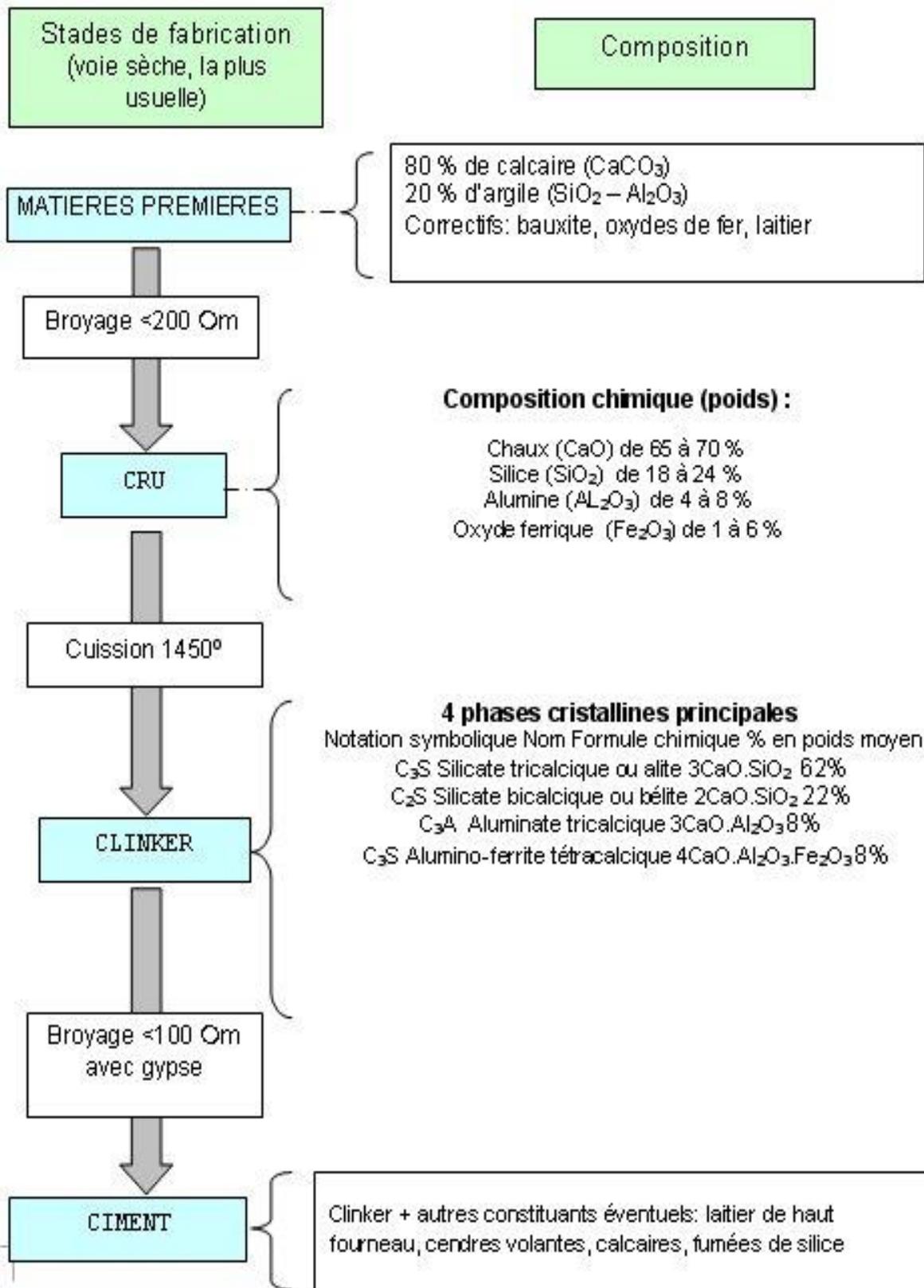


Figure. 26 Fabrication du ciment par voie sèches (la plus utilisée figure) [3]

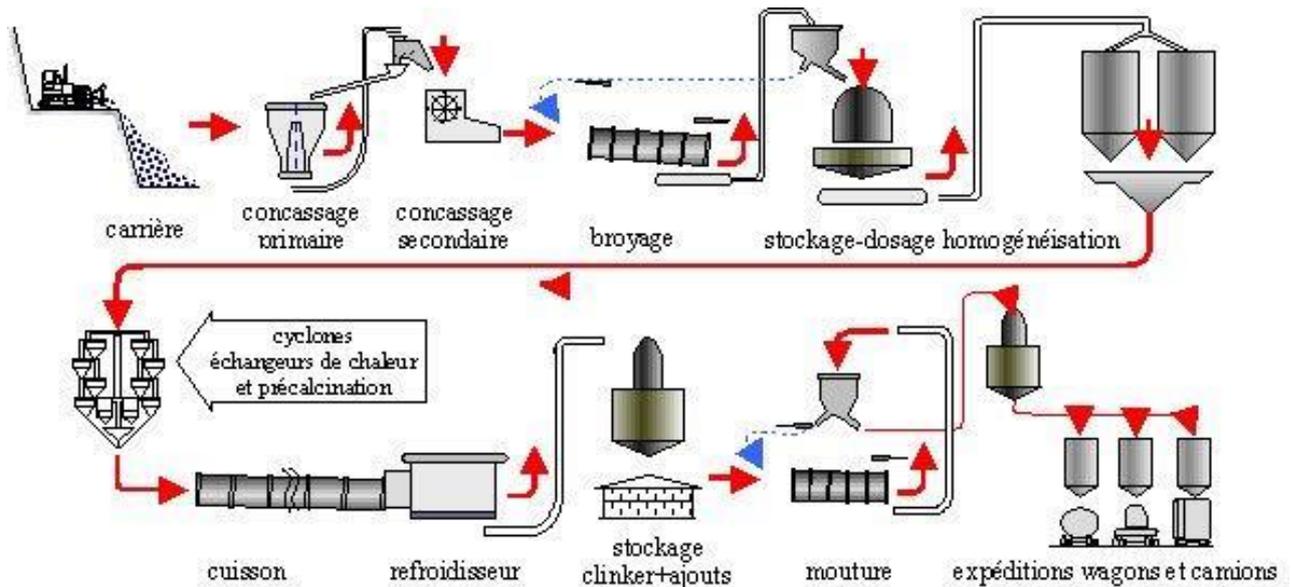


Figure. 27 Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche[3]

III.3 Constituants principaux

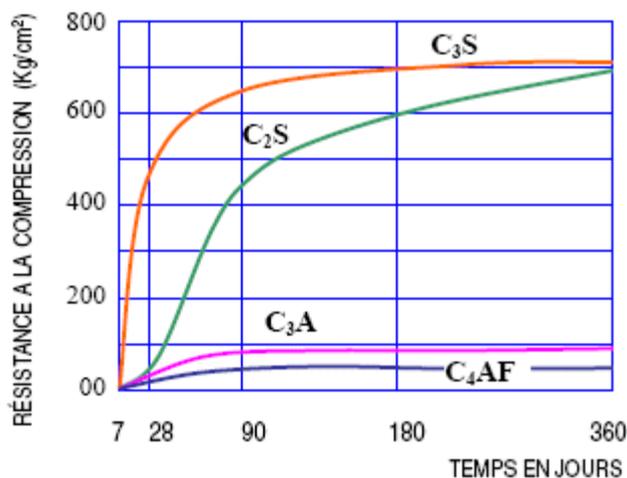
Constituants du clinker les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont (figure 28).

Le silicate tricalcique $3CaO.SiO_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).

Le silicate bicalcique $2CaO.SiO_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).

L'aluminate tricalcique $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).

L'alumino-ferrite tétracalcique $4CaOAl_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF) (5-15% du clinker).



- C_3S et C_2S – Constituants résistants (représentent ~70% en poids).
- C_3A et C_4AF – Requis comme fondants (représentent ~20% en poids).
- Gypse – Régularisation prise (représentent ~4% en poids)

Figure. 28 Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP[2]

Calcaires,

Laitier granulé de haut fourneau,

Cendres volantes (V ou W),

Fumée de silice,

Schistes calcinés,

Fillers,

Siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques, calciques (W) propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

III.4 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition (tableau 5), en cinq types principaux

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).

Tableau.05 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale[3]

	Cim. Port-land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		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	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée)	≤55% (fumée)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	≤10%)	≤10%)	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Chapitre IV : Les mortiers

IV.1 Composition

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment, de l'eau, du sable, des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

Liant (ciment ou chaux), Eau, Sable, Adjuvants.

IV.2 Les liants

Généralement, on peut utiliser :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc);
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- Les liants à maçonner,
- Les chaux hydrauliques naturelles,
- Les chaux éteintes.

IV.3 Les sables

Les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé" Les sables de bonne granulométrie figure 29. Ils peuvent être :

- a) Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ...), de nature siliceuse ou silico-calcaire,
- b) Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- c) Spéciaux (lourds, réfractaires, légers).

Certains sables sont à éviter, les sables très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire),
- Fins : jusqu'à 1,6 mm,
- Moyens, jusqu'à 3,15 mm,
- Gros, jusqu'à 5 mm.

IV.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants [7] :

- Les plastifiants (réducteurs d'eau),
- Les entraîneurs d'air,
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs),
- Les hydrofuges.

IV.5 Les ajouts

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont [9, 10] :

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice ..);
- Fibres de différentes natures,
- Colorants (naturels ou synthétiques);
- Polymères.

IV.6 Les différents mortiers

Dans les travaux des constructions on utilise différents types de mortier.

IV.6.1 Mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1:3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

IV.6.2 Mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux).

La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

IV.6.3 Mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux.

Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

IV.6.4 Mortier industriel

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- Mortiers d'imperméabilisation,
- Mortier d'isolation thermique,
- Mortier de jointoiment,
- Mortier de ragréage,
- Mortier de scellement, mortier pour chapes,
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- Mortier de réparation.

IV.7 Les caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- Ouvrabilité, Prise, Résistances mécaniques, Retraits, Gonflements, etc.

Beaucoup d'essais de laboratoires se font sur les prismes de 4 x 4 x 16 cm (résistances mécaniques, retrait, gonflement, absorption capillaire, résistances au gel et aux eaux agressives).

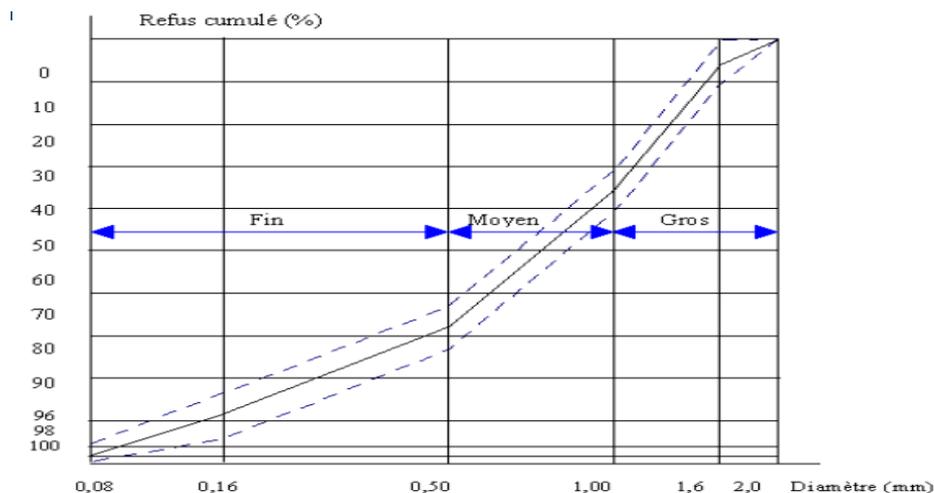


Figure. 29 Courbe granulométrique du sable normalisé selon les normes AFNOR[9]

IV.7.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) La table à secousses :

Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes figure 30.

On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule :

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

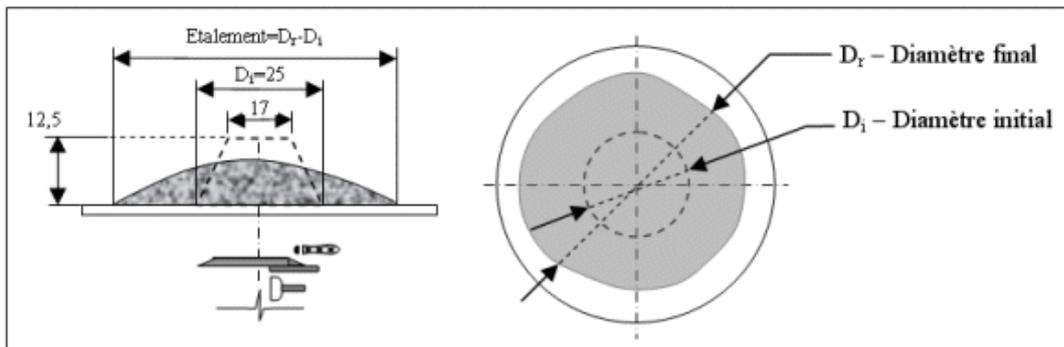


Figure. 30 Table à secousses[9]

b) Le maniabilimètre du LCPC:

il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule figure31.

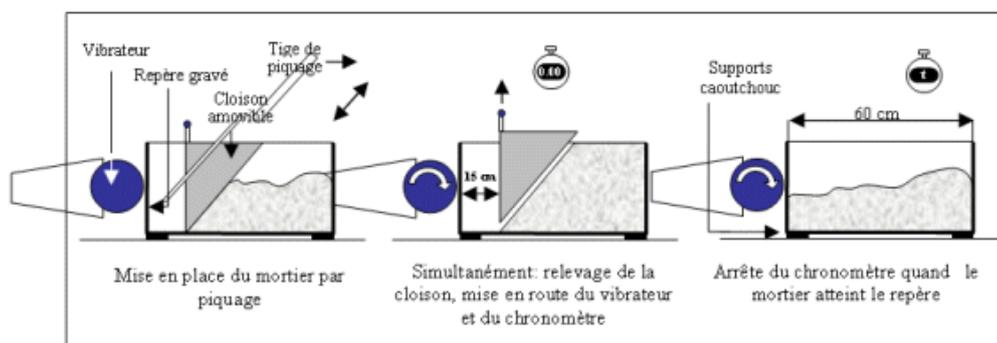


Figure. 31 Principe de fonctionnement du maniabilimètre[8]

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

IV.7.2 Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat, figure 32). Il est possible d'obtenir le temps de prise (figure 33) d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

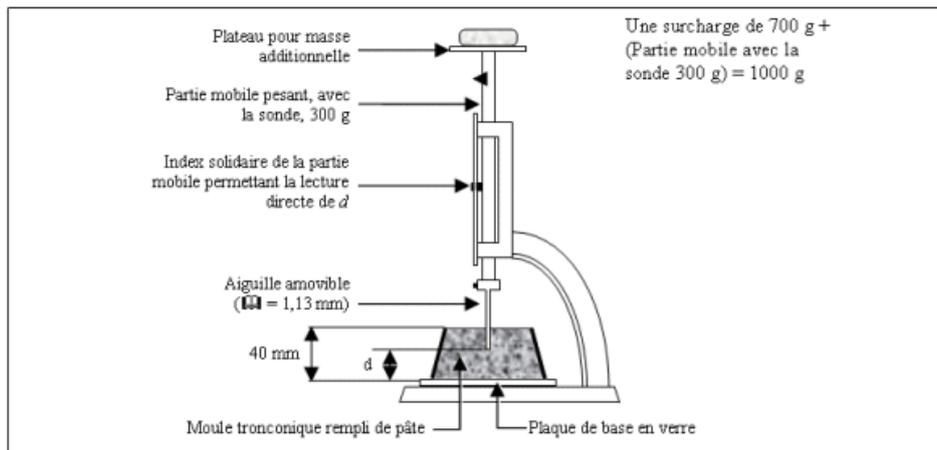


Figure. 32 Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge[8]

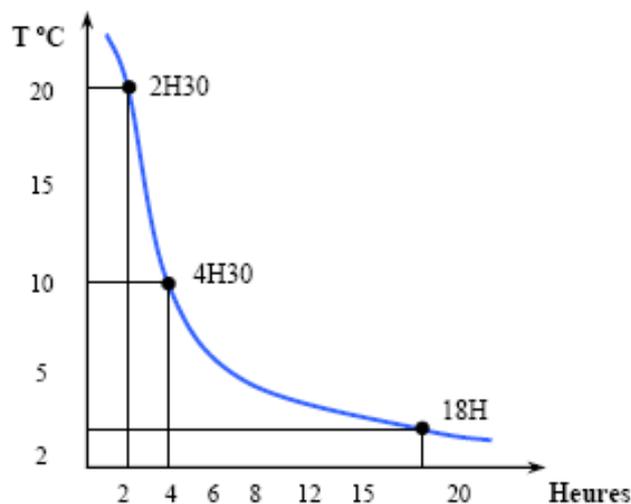


Figure. 33 Evolution du temps de prise en fonction de la température[8]

IV.7.3 Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm (figure 34) conservés dans l'eau à 20 °C.

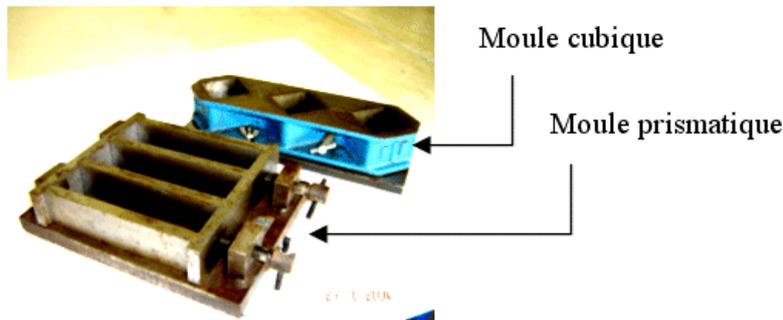


Figure. 34 Moule pour moulage des éprouvettes de mortier[8]

Les éprouvettes (figure 35) sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

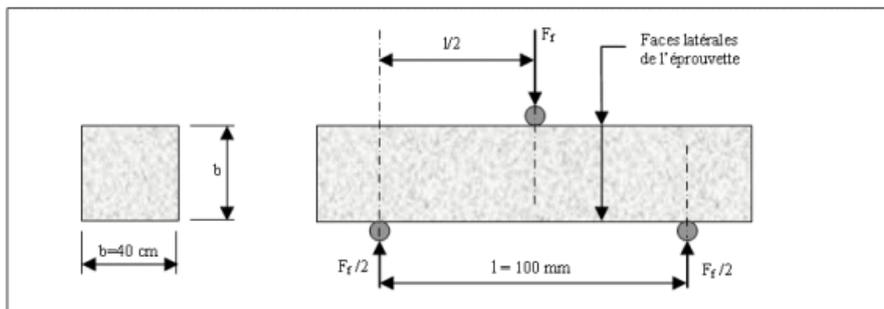


Figure. 35 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion [8]

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression (figure 36). Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

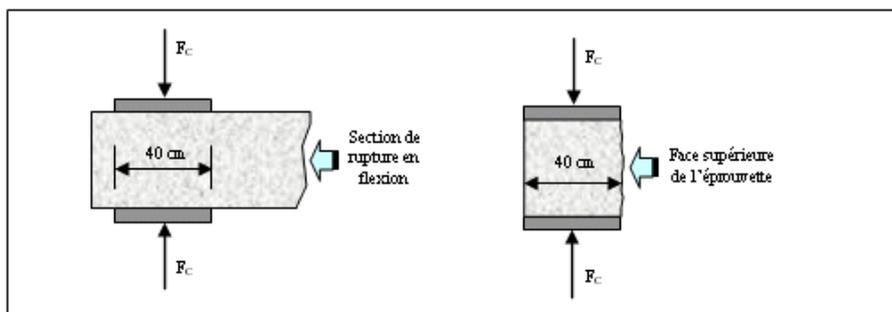


Figure. 36 Dispositif de rupture en compression [8]

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment, rapport C/E,
- Granulométrie et nature du sable, énergie de malaxage et mise en œuvre, protection les tous premiers jours.

IV.7.4 Retraits et gonflements

Les retraits se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16$ cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de $4 \times 4 \times 16$ cm conservées dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10 mm) figure 37.

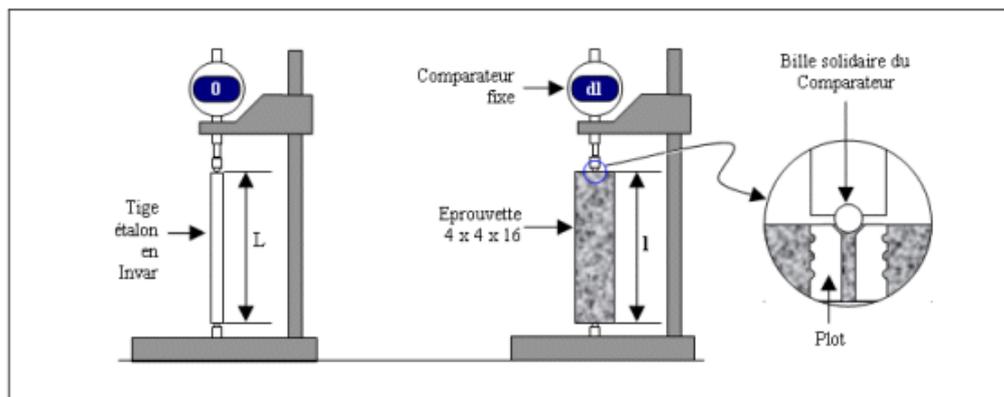


Figure. 37 Appareillage pour la mesure du retrait [8]

Travaux Pratiques Matériaux de construction 1 (L2-S4)

Fiche de TP N°1 : Masses volumiques du sable, et gravier

Définition : Un matériau est composé des grains Matérielle utilise :

solide, d'eau, d'air, avec :

MT : masse totale du matériau.

VT : volume totale ou humide du matériau.

Ms : masse des grains solides des matériaux.

Vs : volume des grains solides.

Me : masse de l'eau.

Ve : volume de l'eau.

• Balance technique avec de précision 1 g

• Un pot plastique de 1 L

• Un entonnoir.

• Une petite règle plate en métallique.

• Tamis de 0.08 mm pour le ciment.

• Tamis de 3.5mm pour le sable.

La masse volumique apparente : Le sable, le gravier, le ciment

Le but : Déterminer les masses volumiques apparentes du matériau de construction, c'est-à-dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

Mode opératoire : Pour les grains (gravier et sable) :

Expression des résultats : La masse volumique :

$$\gamma_H = \frac{m_2 - m_1}{V_0}$$

- Présentation du matériel et matériaux de l'essai.
- Tamiser le sable dans le tamis de 3.5mm.
- peser le pot de 1L de volume vide soit m1.
- Remplir le pot par l'entonnoir avec une distance de chute de 15 cm.
- Araser la couche supérieure du pot à l'aide d'une réglette que l'on anime d'un mouvement de « va et vient », peser le récipient plein : soit m1 (g) sa masse.

Mode opératoire : Pour le ciment :

- Tamiser le ciment dans le tamis de 0.08mm.
- On remplit le pot par l'entonnoir avec une distance de chute égale ou moins 5 cm.
- On arase le matériau de la couche supérieur du le pot.
- On pèse le pot rempli soit m2.

Remarque : On fait l'opération trois fois pour les trois matériaux.

Principe du calcul : On a une seule formule de calcul : $M_s = m_2 - m_1$ Et :

$V_T = 1L = 1 \times 10^{-3} m^3$ On résume les résultats dans le tableau N 01 :

les masses volumiques calculées

Matériau	Gravier			Sable			Ciment		
M ₁ (kg)									
M ₂ (kg)									
M ₂ -M ₁ (kg)									
V (m ³)									
ρ _T (partiel)									
ρ _T (kg/m ³)									

1. La Masse volumique Absolue :

Définition : La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume de la substance entièrement compacte (sans pores).

Principe : Il consiste à déterminer la masse absolue du gravier et du sable sur la base de la quelle et de la masse volumique on peut calculer la porosité et la compacité de ces matériaux.

Matériel nécessaire :

- Balance technique à 0.01g,
- Etuve à t=105à110°C, Coupelle
- Tamis 0.315mm et 0.08mm,
- Eprovette graduée, la petite et la grande
- Pot métallique de 1 litre
- Règle plate métallique,
- Entonnoir,

Mode opératoire :

- On pèse 300 g de granulat qui était à l'étuve pendant 24h (m₀). Et on verse de l'eau dans le récipient jusqu'à 500 ml soit V₀.
- On pose une quantité de granulat dans le récipient.
- On pèse la quantité du granulat qui reste soit m₁.
- On note la lecture le grade de l'augmente soit V₁.

Matériaux d'analyse : « sable et gravier 3/8 »

Principe du calcul :

La masse qui est posé dans le récipient on peut la calculée par la formule suivante : $m_s = m_0 - m_1$

Le volume des grains solides de granulat qui est dans le récipient on peut

le calculé par la formule suivante : $V_s = V_1 - V_0$:

On résume les résultats dans le tableau N 03 :



		Valeurs	ms (g)	Vs (cm ³)	ρs (initie) (g/cm ³)	ρs (g/cm ³)
Essai	m₀					
	m₁					
	V₀					
	V₁					

Fiche de TP N°2 : Analyse granulométriques du sable et du gravier

Définitions :

Granularité : Distribution dimensionnelle des grains (état).

Granulométrie : Etude de la granularité.

Tamisât : Partie de l'échantillon passé à travers les mailles du tamis.

Refus : Partie de l'échantillon qui n'est pas passée à travers les mailles du tamis.

Refus cumulé : C'est la somme de tous les refus, celui du tamis lui-même plus tous les refus des tamis de maille plus grande. Il peut être exprimé en gramme ou en % de refus cumulés

But du TP :

- Déterminer les dimensions des grains.
 - Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral)
 - Tracer la courbe granulométrique.
 - Déterminer le coefficient d'uniformité C_U et coefficient de courbure C_C .
- En déduire le module de finesse.

Matériel utilisé

- Une machine à Tamiser.
- Une série de tamis y compris le fond, conformes à la norme NF X 11 – 501 X 11-504.
- Des récipients.
- Une main écope pour le remplissage.
- Une balance de portée 5 Kg, précision 1g.
- Colonne de Tamis

Principe d'essai :

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. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.

Matériaux Utilisés : - sable. - gravier.

Préparation Des Echantillons : La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont : - Dans la pratique, la masse à utiliser sera telle que : $0,2 D \leq M \leq 0,6 D$ avec M, masse de l'échantillon en Kg et D diamètre du plus gros granulat exprimé en mm

Résultats : Les résultats seront présentés sous forme de tableau et se traduiront en courbe granulométrique.

Fiche de TP 3 :Teneur en eau

Définition : La teneur en eau d'un granulat ou d'un sol est le pourcentage d'eau (**en masse**) par rapport au matériau sec :

$$\% = \frac{\text{Masse de l'eau contenue}}{\text{Masse de matériau sec}} \times 100$$

Principe de détermination

- Sécher complètement le granulat,
- Faire entrer l'eau qu'il contient dans une réaction chimique.

La méthode Sécher complètement :

- Peser l'échantillon humide : M_h
- Placer l'échantillon dans un récipient métallique ou en verre,
- Faire sécher le matériau :
- A l'étuve à 105 - 110° pendant 24 heures : grande précision pour quantités importantes,
- Dans un four : plus rapide,
- Dans un four micro-ondes : très rapide (attention : pas de récipient métallique),
- Sur une plaque chauffante ou un bec à gaz,
- Flamber l'échantillon à l'alcool (peu précis et dangereux).
- Peser l'échantillon sec : M_s ,
- Calculer la teneur en eau :

$$\% = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Précautions à prendre

La mesure d'une teneur en eau doit être réalisée avec soin.

Il faut prendre une masse d'échantillon représentative de celui-ci. Selon la quantité prélevée, les mesures devront être réalisées avec une précision plus ou moins grande (**balance au gramme, au dixième ou même au centième**)

Utiliser une méthode et un matériel compatibles avec la quantité de matériau et la précision demandées.

Fiche de TP 4 : Foisonnement du sable

Définition : On appelle coefficient de foisonnement le rapport de la hauteur du sable humide (H_H) et sa hauteur sèche (H_S), ce coefficient varie en fonction du % d'humidité, le volume apparent d'un sable dépend de sa compacité, de sa porosité, et de son humidité.

NB: le coefficient de foisonnement présente son maximum entre 3% et 7% d'humidité.

But : Les granulats livrés sur chantier sont rarement secs, ils contiennent souvent un pourcentage d'humidité (taux d'humidité), il est nécessaire de connaître celui-ci pour déterminer la quantité d'eau de gâchage, d'autre part le volume du sable varie en fonction de son taux d'humidité, il est donc indispensable et nécessaire de connaître cette variation lorsque des dosages se font en volume.

Matériel utilisé:

- balance technique à 0.01g
- Etuve à 1-105°C – 110°C
- Eprouvette graduée
- Récipients
- Truelle.
- Tamis N° 3,15mm



Matériau d'analyse : "Sable Naturel, Sable Concassé"

Mode opératoire :

- Tamiser le sable sec à travers le tamis N° 3,15 mm
- Peser une quantité de sable parfaitement sec correspondant à 500g(Ms)
- Verser le sable dans une éprouvette graduée de 1000cm³, mesurer la hauteur (H_s) qu'il occupe
- Verser le sable dans un récipient et ajouter la masse de l'eau correspondant à 1% de la masse du sable sec, le mélange une fois homogénéiser, verser dans l'éprouvette graduée, on mesure la hauteur (H_1)
- Faire cette manipulation pour un taux d'humidité du sable de 1% à 7%, 9%, 11%, 13%, 15% noter les résultats obtenus pour les différents dosages.
- Tracer la courbe de variation du coefficient de foisonnement en fonction du % d'humidité du sable.

Fiche de TP N°5 : Equivalent de sable

But de l'essai : Cet essai a pour but de mesurer la propreté du (sable naturel, sable concassée) entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

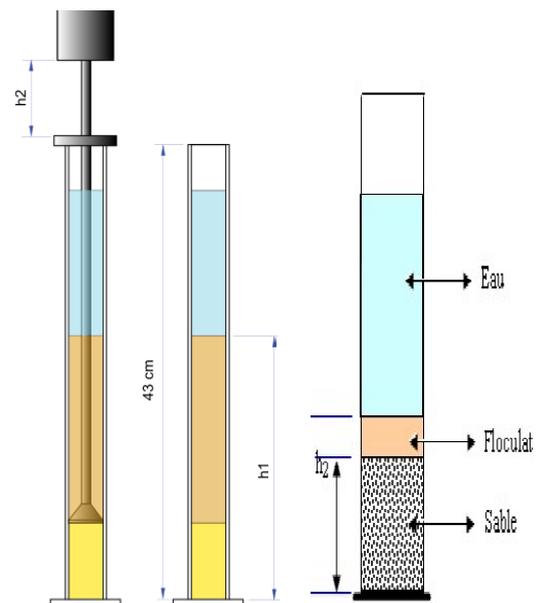
Principe de l'essai : L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 30 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (figure1). L'essai dit d'équivalent de sable - permet de déterminer le degré de propreté du sable : $ES = (h_2/h_1) \times 100$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (Équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

- Tamis de 3,15mm d'ouverture de mailles avec fond
- Spatule
- Balance
- Chronomètre
- Régllet de 500mm
- Eprouvettes
- Un piston taré
- Entonnoir a large ouverture
- Une machine d'agitation
- Solution lavante



A-Préparée des échantillons de sable.

- Faire passer l'échantillon par une Tamis de 3,15mm.
- Étuver l'échantillon et laisser 1% d'humidité.

B-Utilisation de la solution lavante :

Manipulation :

- Verser la solution au tube (éprouvette en plexiglas) jusqu'au trait inférieur.
- Verser la quantité de sable (120g) dans le tube pendant 10minute pour absorber l'eau.
- Fermer l'éprouvette et on met dans l'agitateur pendant 30 secondes.

- Laisser l'éprouvette 20 minute sans vibration.
- Lire la hauteur H_1 et H_2 par la règle H'_2 par le piston.
- On refait la même expérience deux autre fois.

Résultats :

	H₁	H₂	H'₂	Esv	Esp
Essai 1					
Essai 2					
Essai 3					

Les résultats de l'essai sont donnés comme suit:

Les formules :

Équivalent de sable à vue Esv :

Équivalent de sable avec le piston :

$$Esv = (H_2/H_1) \times 100\%$$

$$Esp = (H'_2/H_1) \times 100\%$$

H₁: hauteur de sable propre + hauteur des imputées.

H'₂ et H₂ : hauteur de sable propre.

- Classification de sable:Interprété et classer, les sables d'après les résultats obtenus conformément aux normes.

Fiche de TP N°6 : Propreté et forme des granulats

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

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

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi:

- l'indice d'allongement
- l'indice d'aplatissement

$$\beta = \frac{G}{L} \leq 1$$

$$\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$$

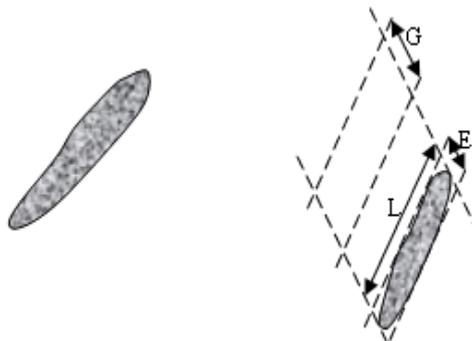


Fig 3: Forme d'un granulat

Fiche de TP N°7 : Porosité du sable et gravier

Principe : Chasser tout le liquide, et peser le matériau sec. Remplir ces vides avec de l'eau une nouvelle pesée donnera le résultat cherché.

Equipement et Matériaux :

- Balance technique. - Cylindre gradué. - Etuve de séchage
- Matériau à étudier, (Gravier, sable de dune, sable0/3), et - Eau

Mode opératoire :

- Prélevée une quantité ni trop grande ni trop petite (environ 500g)
- Mettre à l'étuve à 103 °C, l'y maintenir jusqu'à masse constante-

V_T : Volume initial à l'état sec. V_s : Volume des grains solides

V_v : Volume des vides

Alors : La porosité est le rapport du volume vide au volume total. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent. $P\% = V_{\text{vides}} / V_{\text{totale}} \times 100$

- La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent. $C\% = V_{\text{solide}} / V_{\text{totale}} \times 100$.

- La porosité et la compacité sont liées par relation : $P + C = 1$

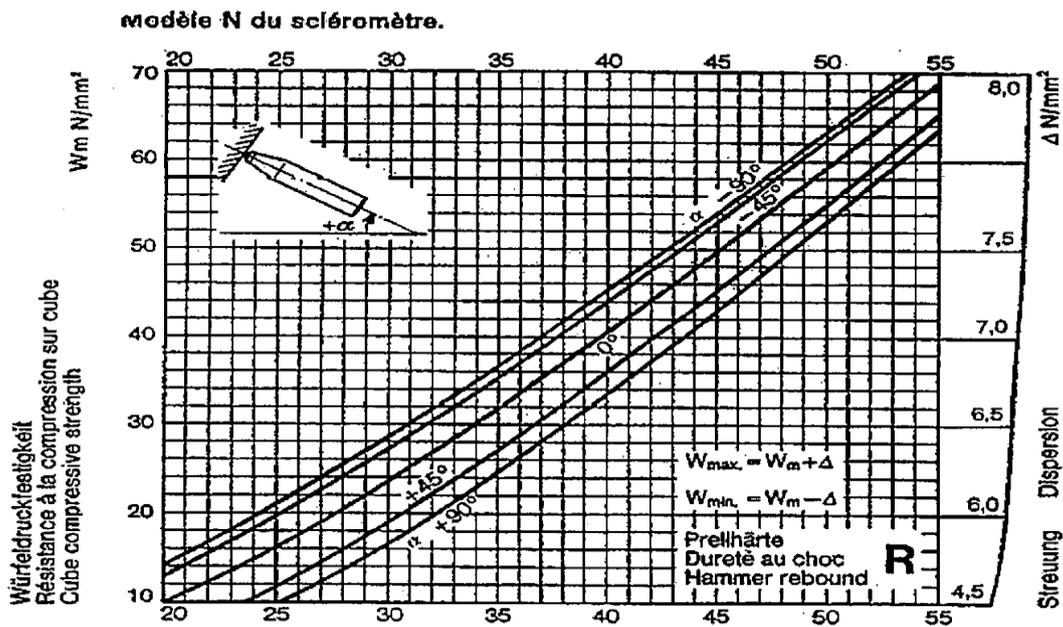
c.-à-d. la somme des deux = 100%

	V_T	V_s	V_v	Masse du matériau	$P\% = V_{\text{vides}} / V_{\text{totale}} \times 100$	$C\% = V_{\text{solid}} / V_{\text{totale}} \times 100$
Gravée						
Sable						

Fiche de TP N°8: Essai non destructif (scléromètre)

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité, elle permet de faire rapidement des contrôles de la régularité des bétons d'un ouvrage.

La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un dispositif mobile (commandé par un ressort) à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du béton.



Les courbes sont valables pour des bétons au ciment Portland compacts avec matériau sable-gravier résistant. Age de 14 à 56 jours. Surface du béton lisse et sèche.

W_m = valeur la plus probable de la résistance à la compression sur cube. Les limites de dispersion W_{max} . et W_{min} . sont définies ainsi: elles comprennent 80% de la totalité des essais.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
....												
....												
....												

Eprouvette	Dureté	Résistance	Observation
Béton.....			
Béton.....			
Béton.....			

Fiche de TP N°9 : Essai de consistance et de prise du ciment.

Partie N°1: détermination de consistance normale la pâte de ciment

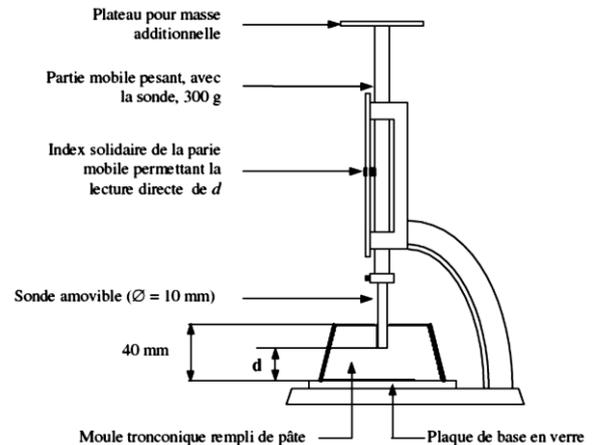
Définition : La consistance normale de la pâte de ciment est la quantité d'eau nécessaire pour avoir une pâte normale plastique. Elle est calculée en pourcent du poids de ciment et donnée comme étant le rapport eau/ciment (E/C).

Equipement et matériaux : Appareil de Vicat équipé par la sonde da diamètre de 10 mm.

- Malaxeur normalisé à trois vitesses
- Balance technique
- Couteau métallique
- Ciment portland
- Eau potable

Mode opératoire :

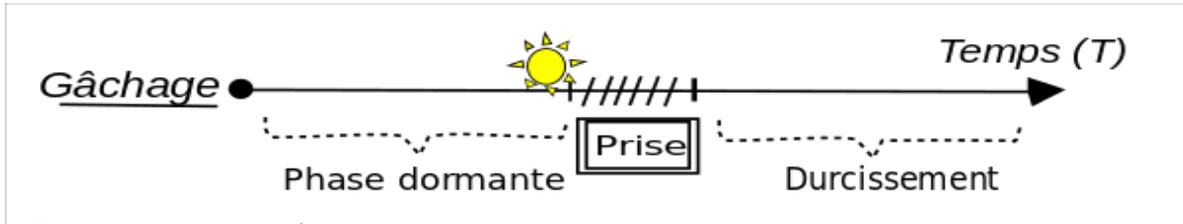
- Peser 500 g de ciment avec une précision de 1 g,
- Verser la quantité nécessaire d'eau dans le récipient du malaxeur (environ 22 à 30 % de la masse de ciment); mettre en marche le malaxeur avec une faible vitesse;
- Verser peu à peu le ciment dans le récipient avec l'eau, la durée de cette opération doit être égale à 30 secondes,
- Malaxer la pâte pendant 2 min. 30 sec avec la vitesse moyenne et puis 2 min. Avec la vitesse rapide, la durée du malaxage doit être égale à 5 minutes,
- Verser la pâte malaxée dans le moule de l'appareil de Vicat, secouer le moule 5 à 6 fois et araser la pâte qui déborde.
- Amener l'extrémité de la sonde à la surface de la pâte et la fixer dans cette position,
- Libérer la sonde en la laissant s'enfoncer dans la pâte pendant 30 secondes prés, Si la sonde s'enfonce à une hauteur 5 à 7 mm du fond du moule : "**la consistance est normale**"
- Si non répéter l'essai en augmentant ou en diminuant la quantité d'eau,
- Inscire les résultats dans le tableau suivant :



N° essai	Masse de ciment, en g	Masse de l'eau, en g		L'indication de l'appareil, (d) en mm	Aspect de la pâte de ciment
		%	ml/g		

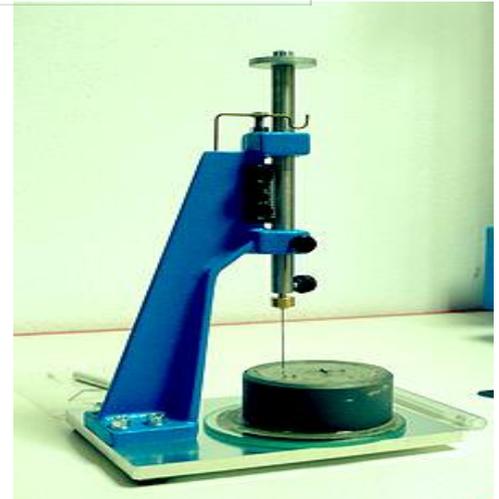
Fiche de TP N°10: Essai de prise du ciment.

Partie N°2 : Détermination des délais de prise de ciment



Equipement et matériaux :

- Appareil de Vicat muni par l'aiguille da diamètre de 1,1 mm.
- Malaxeur normalisé
- Balance technique
- Cylindre gradué
- Couteau métallique
- Chronomètre
- Ciment portland
- Eau potable



Mode opératoire :

1. Préparer la pâte de consistance normale selon la méthode indiquée ci-dessus; mettre le chronomètre en marche depuis le moment du gâchage;
2. Verser la pâte dans le moule de l'appareil de Vicat, secouer le moule 5 à 6 fois et raser la pâte qui déborde,
3. Amener l'extrémité de l'aiguille à la surface de la pâte, laisser l'aiguille s'enfonce librement dans la pâte,
4. Mesure la distance entre l'extrémité de l'aiguille et le fond du moule,
 - Début de prise est le temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénétré pas jusqu'au fond du moule à 1 mm prés,
 - Fin de prise est le temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille s'enfonce dans la pâte à $1 \div 2$ mm prés,
5. Inscire les résultats dans le tableau suivant :

Temps de gâchage, en min	Temps courant, en min	Indication de l'aiguille, (d) en mm	Délais de prise, en Heure	
			Début	Fin

2021/2022

Partie II : MDC2 (Cours & TP pour L3)

Matériaux de constructions 2
3^{ème} Année
Licence Génie Civil

M. ABDELJALIL
UADA

Chapitre1 : Les Bétons

I.1 Définition et classification

Le béton est un Mélange homogène de liant, granulat, eau, adjuvants et ajouts minéraux.

- liant + granulats + eau Béton ordinaire.
- liant + granulat + eau + adjuvant BHP
- liant - granulat - eau – ajouts minéraux BAP.

Pour être précis il nous faut ajouter que les valeurs des dosages de chaque élément doivent être comprises à l'intérieur d'intervalle précis

Pour les bétons ordinaires de masse volumique allant de 2000 kg/m³ à 2600 kg/m³, la norme NF EN 206-1 [9] distingue 16 classes différentes.

L'objectif est de permettre à l'étudiant d'enchaîner avec la matière enseignée en S4 notamment sur des composants des bétons et leurs comportements à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (les résistances mécaniques) sans oublier de décrire les différents types de bétons existants en se basant sur des textes normatifs actuels.

Aussi, l'étudiant connaîtra les processus d'élaboration des différents matériaux, de la matière première jusqu'au produit fini.

Connaissances préalables recommandées :

Durant le S4 l'étudiant aura acquis des connaissances préliminaires et de base sur les caractéristiques physiques et mécaniques des liants et des granulats.

L'étudiant sera en mesure de différencier entre les types de mortiers.

I.2 Classes de résistance à la compression

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les principales prescriptions de la norme SN EN 206-1 de matériaux de construction. Il se réfère exclusivement aux bétons à propriétés spécifiées. Les propriétés de base, mentionnées en début de brochure, sont mises en évidence des détails de détail normatif figures 1 à 3. Et les tableaux 1 à 6 donnés les classifications normatives des bétons. Et en fin en donne des indications relatives à l'emploi d'adjuvants ou d'additions de sortes de béton usuelles.

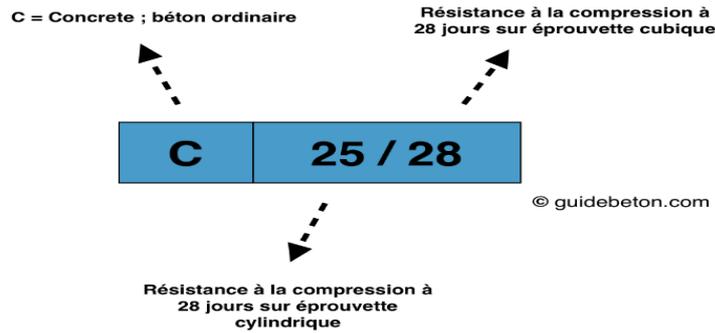


Figure. 01 L'abréviation normatif du béton ordinaire [9]

Tableau. 01 Classifications des béton et béton léger selon la résistance à la compression [9]

BETON			BETON LEGER		
Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique ¹⁾ sur cylindres ^{2) 3)} f _{ck,cyl} [N/mm ²]	Résistance caractéristique ¹⁾ sur cubes ^{2) 4)} f _{ck,cube} [N/mm ²]	Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique ¹⁾ sur cylindres ^{2) 3)} f _{ck,cyl} [N/mm ²]	Résistance caractéristique ¹⁾ sur cubes ^{2) 4)} f _{ck,cube} [N/mm ²]
C8/10 C12/15	8 12	10 15	LC8/9 LC12/13	8 12	9 13
C16/20 C20/25	16 20	20 25	LC16/18 LC20/22	16 20	18 22
C25/30 C30/37	25 30	30 37	LC25/28 LC30/33	25 30	28 33
C35/45 C40/50	35 40	45 50	LC35/38 LC40/44	35 40	38 44
C45/55 C50/60	45 50	55 60	LC45/50 LC50/55	45 50	50 55
C55/67 C60/75	55 60	67 75	LC55/60 LC60/66	55 60	60 66
C70/85 C80/95	70 80	85 95	LC70/77 LC80/88	70 80	77 88
C90/105 C100/115	90 100	105 115			

- 1) Compte tenu d'un fractile de 5 %.
- 2) Stockage immergé dans l'eau, essai à 28 jours.
- 3) Cylindres : Ø 150 mm, h = 300 mm.
- 4) Cubes : arêtes de 150 mm. Les classes de résistance usuelles sont indiquées en gras.

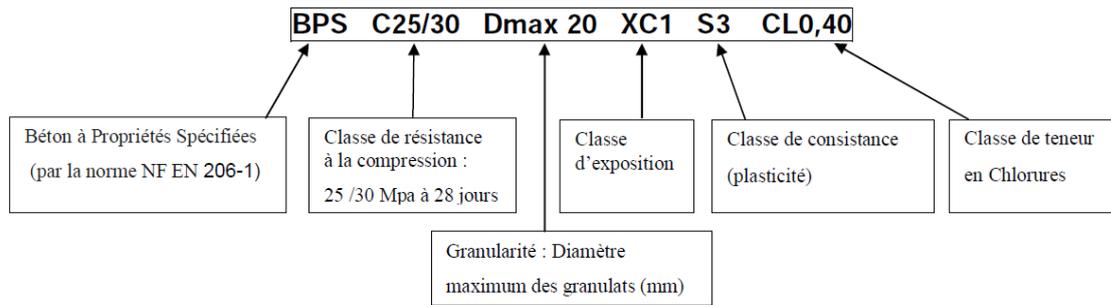


Figure. 02 Spécification du béton léger selon ses propriétés [9]

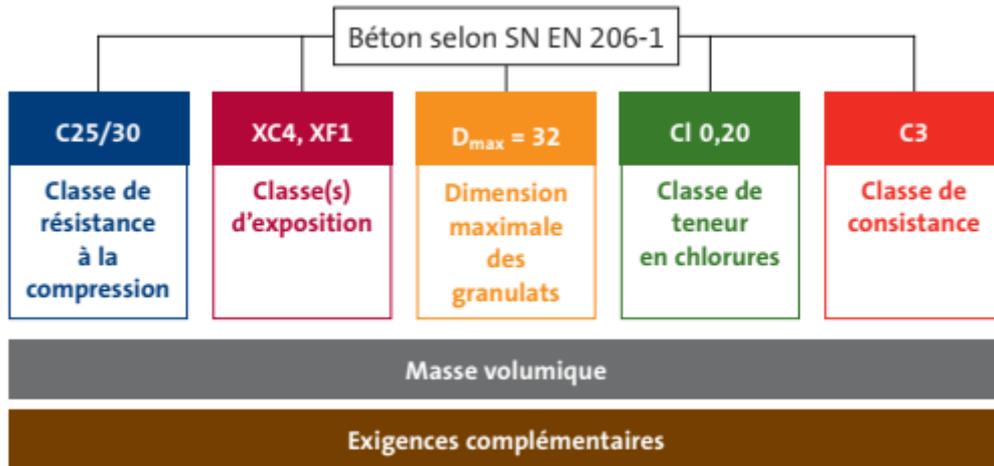


Figure. 03 Spécification du béton ordinaire selon ses propriétés [9]

La norme NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton en fonction de chaque classe d'exposition.

Tableau. 02 Classifications des bétons ordinaire [9]

Type de béton	Classe de résistance à la compression	Exemples
Béton ordinaire	C8/10	Usage décoratif seulement
	C12/15	Usage décoratif seulement
	C16/20	Béton de propreté
	C20/25	Fondations légères (semelle filante ou isolée) Dallage sur vide sanitaire
	C25/30	Dalle/plancher interne à une maison, Dalle extérieure classique et dallage sur terre-plein, sans contraintes particulières, Voile intérieur ou extérieur, sans contraintes particulières.
	C30/37	Dallage sans contraintes particulières, avec emploi de fibres structurales
	C35/45	Béton pour hangar agricole (élevage, fumier...)

Tableau. 03 Classifications des bétons à hautes performances [9]

Type de béton	Classe de résistance à la compression	Exemples
Béton à hautes performances	C45/55	Élément soumis à des efforts importants (poutres de très grande portée ou plancher très chargé)
	C50/60	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)
	C55/67	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)
	C60/75	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)
	C70/85	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)

Tableau. 04 Classifications des bétons à TRES HAUTES performances [9]

Type de béton	Classe de résistance à la compression	Exemples
Béton à très hautes performances	C80/95	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)
	C90/105	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)
	C100/115	Béton haute résistance (inutile pour des particuliers)

Tableau. 05 Classifications de résistance minimale et d'exposition [9]

Classe d'exposition	Classe de résistance minimale
X0	-
XC1 - XC2	C20/25
XC3 - XC4 - XD1 - XF1 - XF2	C25/30
XD2 - XS1 - XS2 - XF3 - XF4 - XA1	C30/37
XD3 - XS3 - XA2	C35/45
XA3	C40/50
X0	-

I.3 Classe de résistance des bétons légers

La norme NF EN 206-1 distingue **14 classes de résistance** chez les bétons légers.

Comprendre les appellations des bétons aux normes

Tableau. 06 Classifications des bétons légers [9]

Béton léger	Exemples
LC 8/9	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 12/13	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 16/18	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 20/22	Béton pour chape de ragréage légère où il y aura peu de passage
LC 25/28	Béton pour chape de ragréage légère où il y aura peu de passage
LC 30/33	Béton pour chape de ragréage légère où il y aura peu de passage
LC 35/38	Béton pour chape de ragréage légère où il y aura peu de passage
LC 40/44	Béton pour chape de ragréage légère où il y aura peu de passage
LC 45/50 – 50/88	Ouvrages particuliers peu courants

I.4 Dimension maximale des granulats

La dimension nominale maximale des granulats (D_{\max}) doit être choisie en fonction de l'enrobage et de l'espacement des barres d'armature ainsi que de la géométrie des éléments à bétonner.

Le dosage minimal en ciment donne dans le tableau «Classes d'exposition» n'est valable que pour une dimension maximale des granulats $D_{\max} = 32$ mm.

En cas de dimension maximale des granulats différente, il faut corriger le dosage minimal en ciment selon le tableau ci-dessous figure 07.

Tableau. 07 Le dosage minimal en ciment [9]

	Dimension maximale des granulats [mm]					
	8	16	22,5	32	45	63
Correction du dosage minimal en ciment	+15 %	+10 %	+5 %	0	-5 %	-10 %

Tableau. 08 Classes de consistance de béton ordinaire vibré [9]

Etalement		Indice de serrage (Walz)		Affaissement	
Classe	Valeur [mm]	Classe	Valeur [-]	Classe	Valeur [mm]
		C0*	$\geq 1,46$		
F1*	≤ 340	C1	1,45 à 1,26	S1	10 à 40
F2	350 à 410	C2	1,25 à 1,11	S2	50 à 90
F3	420 à 480	C3	1,10 à 1,04	S3	100 à 150
F4	490 à 550			S4	160 à 210
F5	560 à 620			S5*	≥ 220
F6*	≥ 630				

Classes non recommandées pour ces méthodes d'essai par manque de sensibilité dans la mesure.

Béton autocompactant (SCC).

Tableau. 09 Classes de consistance de béton autocompactant vibré [9]

Classe	Etalement au cône d'Abrams (Slump Flow) [mm]
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Pour la plupart des applications pratiques (radiers, dalles, murs-voiles, poteaux), il est conseillé de spécifier une classe SF2 ou une valeur cible comprise entre 650 et 700mm.

La tolérance applicable aux résultats d'essais individuels, relativement a la valeur cible est de $\pm 50\text{mm}$.

I.5 Formulation des bétons,

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant.

• Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 pour l'eau à plus de 3 pour le ciment (en t/m^3). Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire.

En bref le béton est un :

Mélange de granulats (sable plus gravier) et de la pâte composée : de ciment, d'eau et d'adjuvant

- Ciment Portland 7% to 15% par volume, Eau 14% to 21% par volume
- Gros granulats, Granulats fins, 60% à 80%
- Adjuvants chimiques



Figure.04 les composant de bétons

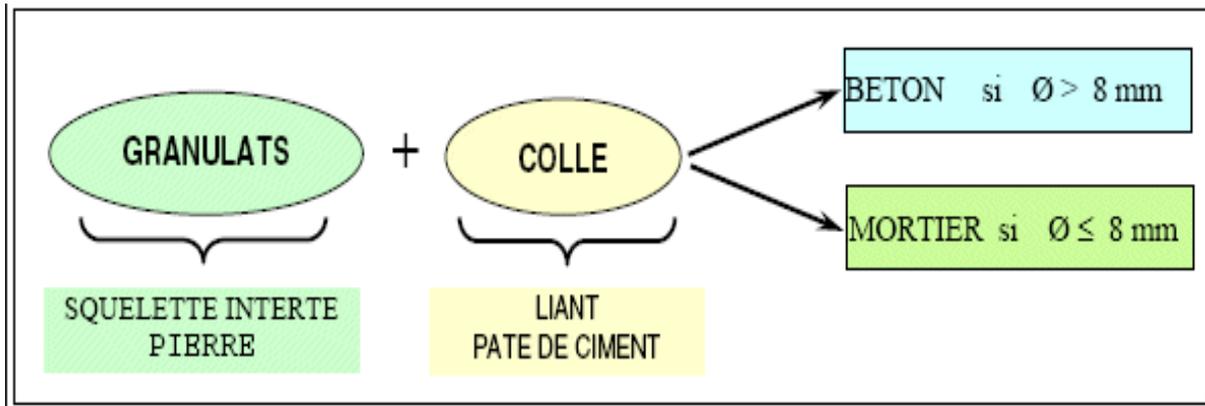


Figure.05 les composant principale de béton [4]

I.6 Méthodes de formulation du béton.

Nécessité de choisir une méthode de formulation.

On est passé de la méthode expérimentale (faire des essais répétitifs qui demandent beaucoup de temps et peuvent avoir un coût important) aux méthodes empiriques (utilisation des résultats des essais expérimentaux pour tirer des lois, graphes, tableaux etc...).

A l'heure actuelle on en est aux méthodes semi-empiriques, semi-analytiques.

Nombre de paramètres à prendre en compte dans les méthodes de formulation des bétons.

Il semble important de considérer en premier les composants du béton :

- | | | | | | |
|--------------------|---|---------|-----|---|--|
| - Liant. | } | Dosages | = ? | ⇒ | Résistance mécanique,
Ouvrabilité |
| - Eau. | | = ? | | | |
| - Granulat. | | = ? | | | |
| - Adjuvant. | | = ? | | | |
| - Ajouts minéraux. | | = ? | | | |

Mais il y a aussi l'influence d'autres paramètres

- Mise en œuvre, (paramètres externes) alors que le dosage des composants est considéré comme des paramètres internes)

- Forme des granulats,

- Surface spécifique...etc.

Le nombre de paramètres peut devenir important c'est pourquoi il faut choisir ceux qui paraissent comme étant les plus importants.

I.6.1 Etapes de la formulation du béton "méthode de Dreux - Gorisse"

- 1/Conditions de mise en œuvre.
- 2/Détermination de la dimension du gros grain D_{max}
- 3/Détermination du dosage en éléments fin (Ciment)
- 4/Détermination du dosage en eau
- 5/Contrôle des qualités de granulat (sable)
- 6/Trace de la courbe granulométrique de référence **OAB**
- 7/Trace de la ligne de partage des courbes granulométrique avec la courbe de référence
- 8/Détermination du dosage du granulat (Sable, Gravier, etc...)
- 9/ Densité théorique du béton frais.
- 10/ Correction (d'après DREUX).

I.6.2 Données Indispensables [4-6]

Données sur le béton :

Résistance mécanique souhaitée à 28 jours

Affaissement en cm : A cm

Serrage (énergie de vibration),

Pompage ou non du béton

Données sur le ciment :

Classe vraie à 28 jours : σ_{c28} MPa

M_v réelle en g/cm³:

Données sur les granulats :

Qualité des granulats,

Forme des granulats,

Propreté (ES),

Courbes granulométriques des granulats,

Module de finesse de sable (M_f)

Teneur en eau W(%) des granulats sable et gravier

Masses volumiques réelles des granulats g/cm³

I.7 Caractéristiques physiques et/ou mécaniques [4-6]

Elles résultent essentiellement de sa composition (constituants et dosages) et des techniques de fabrication employées (compactage, vibration, cure).

I.7.1 Caractéristiques principales des bétons [4-6]

I.7.2 Caractéristiques Physiques

On définit le béton normal, le béton léger et le béton lourd en fonction de leur masse volumique après séchage à l'étuve.

- Béton léger $800 \text{ kg/m}^3 \leq \text{masse volumique} \leq 2000 \text{ kg/m}^3$
- Béton normal $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{masse volumique} \leq 2600 \text{ kg/m}^3$
- Béton lourd $\text{masse volumique} > 2600 \text{ kg/m}^3$
- Résistance en compression à 28 jours (f_{c28}) : (1 MPa = 10 daN/cm²).
- La résistance en compression avant 28 jours (f_{cj}) est définie selon la courbe.

- Classement de réaction au feu : incombustible (M0)

On distingue, un peu arbitrairement, les propriétés physiques des propriétés mécaniques des bétons. Elles procèdent toutes, en fait, de leur degré de porosité.

Poids volumique : il varie entre 2300 et 2400 kg/m³ pour les bétons ordinaires, il atteint 2500 kg/m³ pour les BHP.

Imperméabilité : le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible.

Les bétons dont le rapport E/C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau : leur perméabilité ne peut plus être mesurée.

Résistance aux agents agressifs : les bétons compacts et à porosité réduite offrent une grande résistance aux effets corrosifs de divers agents agressifs. Ils présentent, en particulier, une excellente tenue vis-à-vis des effets corrosifs de l'eau de mer.

Tenue au feu : la résistance du béton aux incendies est excellente.

Durabilité : les diverses propriétés physiques des bétons lui confèrent une grande durabilité. Réalisées correctement, selon les règles de l'art, les structures en béton conservent donc leur aptitude au service pendant toute leur durée de vie prévue, sans nécessiter de coûteuses réparations.

I.7.3 Caractéristiques Mécaniques

Résistance à la compression : un béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à 28 jours, f_{c28} . Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de qualité atteignent 40 à 50 MPa.

Les bétons à hautes performances peuvent dépasser 100 MPa.

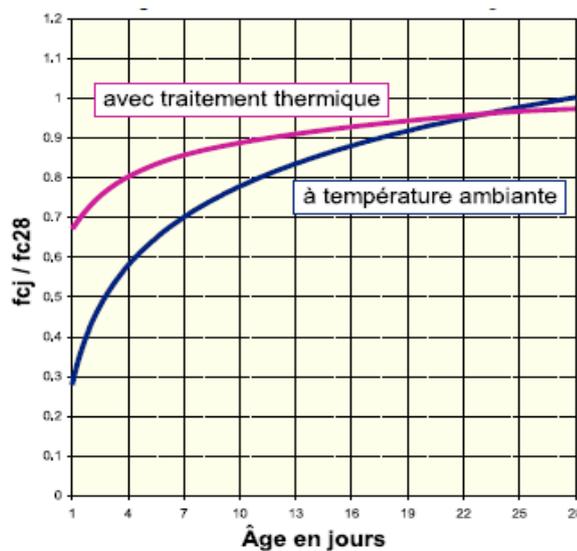


Figure.06 Caractérisation de la résistance en compression du béton avant 28 jours [4]

Résistance à la traction : la résistance à la traction est environ égale au 1/10 de la résistance à la compression.

Coefficient de dilatation : la valeur du coefficient de dilatation linéaire est généralement prise égale à 1.10^{-5} . En fait, cette valeur s'étend de $0,8.10^{-5}$ (béton à granulats calcaires) à $1,2.10^{-5}$ (béton à granulats siliceux).

Propriétés rhéologiques : Tous les matériaux, et, entre autres, le béton, sont, à des degrés divers, visco-élastiques.

Retrait : le béton est l'objet de retrait, c'est-à-dire d'une réduction dimensionnelle, en l'absence de chargement, due essentiellement à l'évaporation de l'eau excédentaire interne.

Fluage : le fluage du béton est le processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable.

La déformation d'un élément en béton soumis à un chargement de longue durée est donc la somme de la déformation différée, due au fluage, et de la déformation dite instantanée.

I.8 Essais sur béton frais,

I.8.1 Consistance

Affaissement au cône d'Abrams NF EN 12350-2 10 £ aff. £ 210 mm



Figure.07 Étalement à la table à chocs (cône DIN) NF EN 12350-5 [6]

Essais sur béton piquage : 25 coups par couche en 3 couches

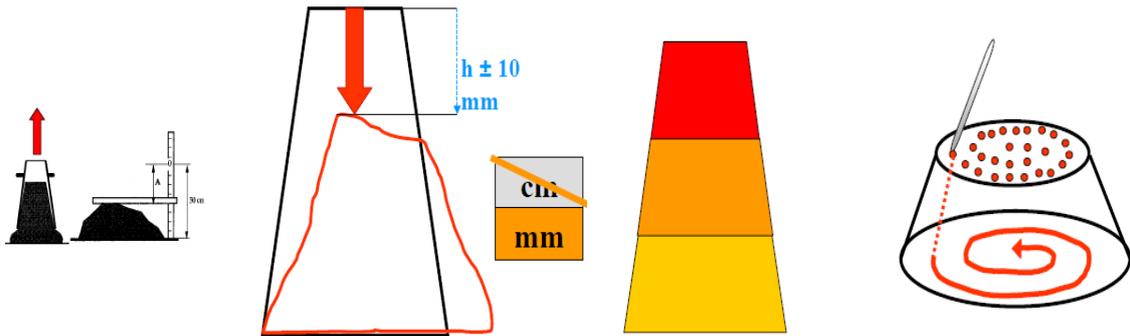


Figure.08 Affaissement au cône d'Abrams - NF EN 12350-2

Remontée du moule : durée 5 à 10 secondes

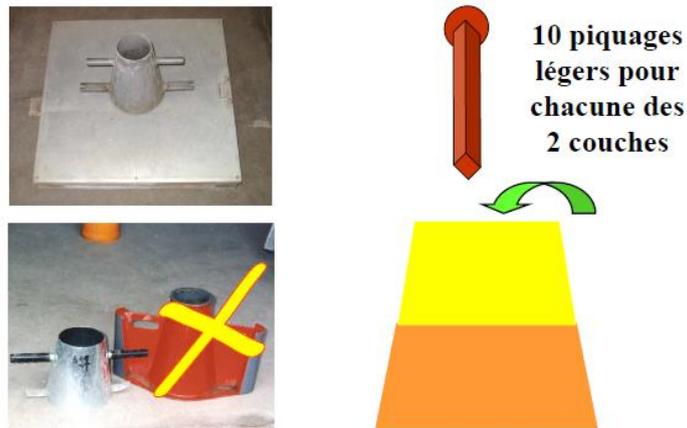
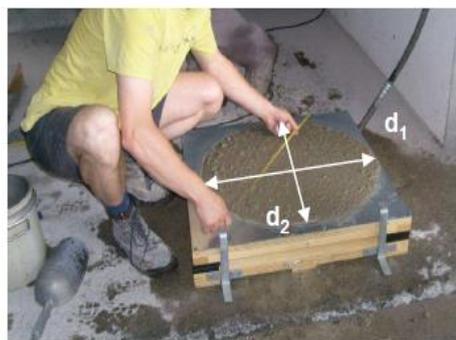


Figure.09 Affaissement au cône [9]

Étalement à la table à chocs - NF EN 12350-5 de table humide mais non mouillée.

Étalement à la table à chocs - NF EN 12350-5



après 15 chocs sans arrêt,
on mesure d1 et d2, et :

$$f = \frac{d1 + d2}{2}$$

Figure.10 Mesure moyenne : f arrondie à 10 mm près[6]

I.8.2 Teneur en air : NF EN 12350-7

méthode de la colonne d'eau



mise en oeuvre du béton en 3 couches avec serrage à refus



méthode du manomètre



pomper (= mise en pression de la chambre) et ajuster l'aiguille au trait rouge puis relâcher



Figure.11 Valeur arrondie à 0,1 point près[9]

Teneur en air : NF EN 12350-7

Méthode du manomètre

On égalise un volume d'air connu à une pression connue dans une enceinte hermétique avec le volume d'air inconnu de l'échantillon de béton. Le cadran du manomètre est étalonné en % d'air correspondant à la pression résultante.

Teneur en air : NF EN 12350-7

On introduit de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton serré de volume connu se trouvant dans une enceinte hermétique et on applique sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure alors la diminution du volume d'air contenu dans le béton en observant la baisse du niveau d'eau.

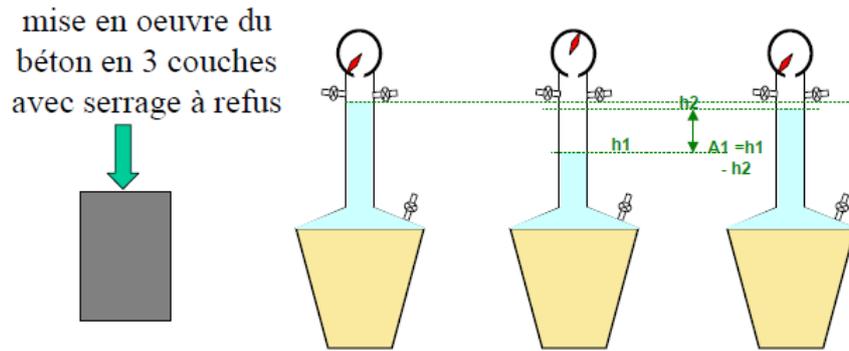


Figure.12 Teneur en air : NF EN 12350-7 Méthode de la colonne d'eau [9]

I.8.3 Cas particulier des BAP

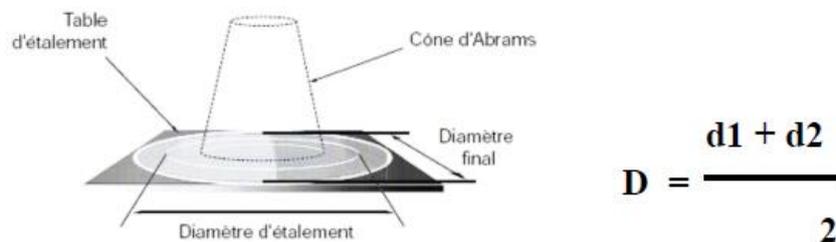
Bétons très fluides, homogènes et stables mis en œuvre sans vibration par le seul effet gravitaire

Essais spécifiques :

Étalement au cône d'Abrams

- Caractérisation de mobilité du béton en milieu non confiné boîte en L
- Caractérisation de la mobilité du béton en milieu confiné stabilité au tamis
- Caractérisation du risque de ségrégation et au ressuage

Recommandations AFGC – BAP de janvier 2008 Norme NF EN 206-9



Essai au cône d'Abrams

Figure.13 Essai d'étalement au cône d'Abrams : NF EN 12 350-8



Figure.14 Essai à la boîte en L : NF EN 12 350-10

I.9 Essais sur bétons durcis,

I.9.1 Résistance en compression : NF EN 12390-3

Surfaçage des éprouvettes Surfaçage au soufre

- sécurité : hotte, extincteur...
- mélange soufre (50%) – sable siliceux (50%)
- attendre 30 min avant essai de compression Rectification

$$R = F / S$$

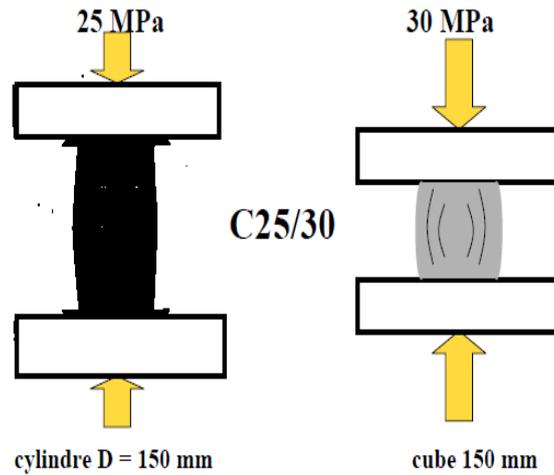
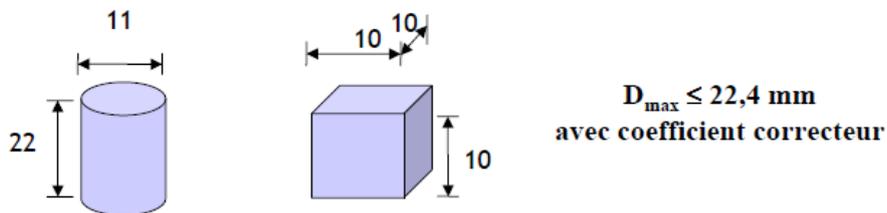


Figure.01 Éprouvettes avec correction (NF EN 206-1)



Cylindres 11*22 :

$$f_{c,cyl} = 0,98 * R \text{ si } R \geq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,cyl} = R - 1 \text{ si } R < 50 \text{ MPa}$$

Cubes de 100 mm :

$$f_{c,cub} = 0,97 * R \text{ si } R \geq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,cub} = R - 1,5 \text{ si } R < 50 \text{ MPa}$$

- ✓ carottes – prélèvement et essais en compression (NF EN 12 504-1)
- ✓ détermination de l'indice de rebondissement (NF EN 12 504-2)



- ✓ détermination de la vitesse de propagation du son (NF EN 12 504-4)

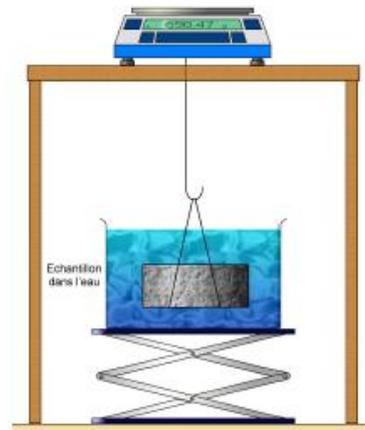
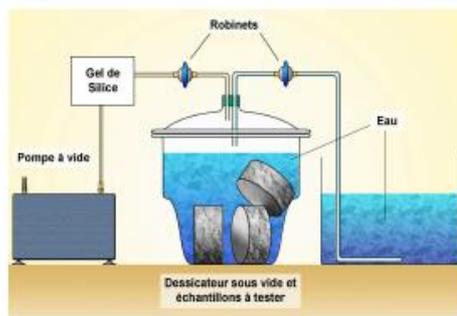
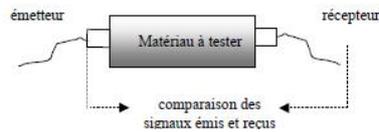


Figure.13 essais de la balance hydrostatique

I.10 Adjuvants,

Les règles suivantes s'appliquent à l'emploi d'adjuvants :

- Lorsque la quantité totale d'adjuvants liquides est supérieure à 3 l/m³ de béton, il faut en tenir compte dans le calcul du rapport eau/ciment.
- La quantité totale d'adjuvants utilisés ne doit pas dépasser le dosage maximal recommandé par le fabricant, ni excéder 5 % de la masse du ciment contenu dans le béton (sauf si l'effet d'un dosage supérieur sur les performances et la durabilité est établi).
- Les adjuvants utilisés en quantités inférieures à 0,2 % de la masse du ciment doivent être dispersés dans l'eau de gâchage.
- Lorsque l'on utilise plusieurs adjuvants, leur compatibilité doit être établie.
- Pour éviter toute confusion dans le cas d'utilisation d'addition, il est recommandé de définir le dosage en adjuvant exclusivement par rapport à la masse de ciment.

I.11 Additions minérales,

Les additions peuvent être de deux types :

Le type I comprend les matériaux quasiment inertes (p. ex. le filler calcaire et les pigments) qui ne génèrent aucune réaction chimique.

Le type II désigne des matériaux a propriétés pouzzolaniques (p. ex. la cendre volante ou la fumée de silice) ou a hydraulicité latente (p. ex. le laitier de haut-fourneau) qui contribuent a la résistance et a la durabilité du béton lors de l'hydratation du ciment. On tient compte de leur effet par une réduction du dosage minimal en ciment ($C_{min, add}$) et par un rapport eau/ciment équivalent (E/C_{eq}) en utilisant le concept du coefficient k. Lors d'une telle démarche, on devra impérativement respecter les 4 critères donnés ci-après.

Quantité maximale d'additions de type II afin d'assurer une alcalinité suffisante (critère 1)

L'emploi d'addition de type II conduit armatures. Il est donc nécessaire d'en limiter leur dosage massique selon les indications à une réduction de l'alcalinité du béton et augmente le risque de corrosion des suivantes :

Tableau. 10 *Quantité maximale d'additions de type II afin d'assurer une alcalinité suffisante [9]*

Avec du CEM I	
Cendre volante	$\leq 0.66 \cdot \text{ciment}$
Fumée de silice	$\leq 0.11 \cdot \text{ciment}$
Cendre volante	$\leq (0.66 \cdot \text{ciment} - 3 \cdot \text{fumée de silice})$
Hydrolith F200	$\leq (0.66 \cdot \text{ciment} - 3 \cdot \text{fumée de silice})$
Avec du CEM II/A-LL ^{a)}	
Cendre volante	$\leq 0.45 \cdot \text{ciment}$
Fumée de silice	$\leq 0.11 \cdot \text{ciment}$
Cendre volante	$\leq (0.45 \cdot \text{ciment} - 3 \cdot \text{fumée de silice})$
Hydrolith F200	$\leq (0.45 \cdot \text{ciment} - 3 \cdot \text{fumée de silice})$

Tableau. 11 Quantité maximale d'additions pouvant être prise en compte dans le calcul du rapport E/C_{eq} et le dosage minimal en ciment $C_{min, add}$ [9]

Addition de type II	Coeff. k [-]	Type de ciment	Classe de résistance du ciment	Classes d'exposition/ sortes de bétons	Quantité max. d'addition pouvant être considérée dans E/C_{eq} et $C_{min, add}$ [kg/m ³]
Cendre volante SN EN 450-1	0.4	CEM I	32,5; 42,5; 52,5	toutes	$0.33 \cdot C$
		CEM II/A-LL	42,5; 52,5	XC1 à XC4, XD1, XF1	$0.25 \cdot C_{min}$
		CEM II/B-M (T-LL) ^{a)}	42,5	XC1; XC2; XC4; XD1; XF1	$0.25 \cdot C_{min}$
				XC3	$0.15 \cdot C_{min}$
		CEM II/B-M (S-T) ^{a)}	42,5 R	toutes	$0.25 \cdot C_{min}$
Fumée de silice SN EN 13263-1	1.0	CEM I	32,5; 42,5; 52,5	toutes	$0.11 \cdot C$
		CEM II/A-LL	32,5; 42,5; 52,5	toutes	$0.11 \cdot C$
Laitier SN EN 15167-1	0.5	CEM I	32,5; 42,5; 52,5	sortes de bétons D à G, exceptionnellement aussi les sortes A à C	$0.50 \cdot C_{min}$
Hydrolith F200^{b)}	0.4	CEM I	32,5; 42,5; 52,5	toutes sauf XF2 et XF4	$0.25 \cdot C_{min}$
		CEM II/A-LL	42,5; 52,5	XC1 à XC4; XD1; XF1	$0.25 \cdot C_{min}$
		CEM II/B-M (T-LL) ^{a)}	42,5	XC1 à XC4; XD1; XF1	$0.20 \cdot C_{min}$

Détermination du dosage minimal en ciment $C_{min, add}$, en cas d'utilisation d'addition (critère 3)

- Cas de la cendre volante ou de l'Hydrolith F200

$$C_{min, add} \geq C_{min} - \left[(k \cdot (C_{min} - 200)) \cdot \left(1 - \frac{KG}{(100 - KG)} \right) \right] \text{ en kg/m}^3$$

- Cas de la fumée de silice

$$C_{min, add} \geq C_{min} - k \cdot FS$$

- Cas du laitier

$$C_{min, add} \geq C_{min} - (k \cdot (C_{min} - 200)) \text{ en kg/m}^3$$

- **C_{min}**, add Dosage minimal en ciment en cas d'utilisation d'une addition [kg/m³]
- **C_{min}** Dosage minimal en ciment selon exigences relatives a la composition des betons des sortes A a G et P1 a P4 [kg/m³]
- **k** Coefficient k de l'addition de type II [-]
- **KG** Teneur en calcaire du ciment CEM II/A-LL [% de masse].
- En général $KG \approx 17 \%$ mais, en cas de doute, on admettra $KG = 20 \%$.
- Dans le cas d'un CEM I, ou des combinaisons testees selon l'annexe L, on prendra $KG = 0 \%$
- **FS** Dosage en fumée de silice [kg/m³].

Détermination du rapport E/C_{éq} (critère 4)

$$E/C_{éq} = E / (C + k \cdot A)$$

- **C** Dosage effectif en ciment [kg/m³]
- **A** Dosage effectif en addition de type II, ou, cas échéant, dosage maximal en addition pouvant être pris en compte dans le calcul [kg/m³]
- Dans le cas d'une utilisation simultanée de plusieurs additions, on pourra toutes les additionner avec leur coefficient k respectif ($C_{eq} = C + \sum k_i \cdot A_i$).

I.12 Notions sur les nouveaux bétons et leurs applications.

- a) Il est possible de spécifier une classe de résistance à la compression plus élevée.
- b) La dimension maximale nominale du granulat ainsi que la classe de consistance peuvent être modifiées de façon spécifique au projet.
- c) Dosage minimal en ciment valable pour $D_{max} = 32$ mm et sans prise en compte des additions. Pour d'autres D_{max} , le dosage minimal en ciment doit être corrigé selon le tableau «Dosage minimal en ciment»

Tableau. 12 Sortes de bétons usuels [9]

Action sur	Classe	Environnement	Exemples
l'armature	Aucune dégradation		
	X0		béton non armé, sans incorporation métallique, situé dans un environnement non agressif, fondation non armée à l'abri du gel, élément intérieur non armé
	Corrosion de l'armature dans le béton carbonaté		
	XC1	sec ou humide en permanence	béton armé à l'intérieur d'un bâtiment, élément immergé en permanence dans l'eau
	XC2	humide, rarement sec	fondation
	XC3	humidité modérée	béton extérieur abrité de la pluie, halle ouverte, local humide
	XC4	alternativement sec et humide	béton extérieur exposé aux intempéries; pylône, balcon, élément de façade, parement
	Corrosion de l'armature induite par les chlorures		
	XD1	humidité modérée	surface exposée au brouillard salin (chlorures transportées par voie aérienne) au voisinage d'une chaussée
	XD2a	mouillé, rarement sec, teneur en chlorures ≤ 0.5 g/l («eau douce»)	piscine d'eau douce
XD2b	mouillé, rarement sec, teneur en chlorures > 0.5 g/l («eau salée»)	piscine d'eau salée, élément au contact d'eaux industrielles	
XD3	alternativement sec et humide	élément de pont, dalle de parking, dalle de roulement ou mur de soutènement exposé à des projections d'eau chargée de chlorures	

Tableau. 13 Classes d'exposition [9]

le béton	Dégradations dues au gel avec ou sans sel de déverglaçage		
	XF1	saturation modérée en eau sans sel de déverglaçage	surface verticale exposée à la pluie et au gel
	XF2	saturation modérée en eau avec sel de déverglaçage	surface verticale exposée au gel et au brouillard salin
	XF3	forte saturation en eau sans sel de déverglaçage	surface horizontale exposée à la pluie et au gel (sans sel de déverglaçage)
	XF4	forte saturation en eau avec sel de déverglaçage	surface exposée aux projections d'eau saline, dalle de roulement, arrêt de bus, bordure de pont
	Dégradations dues à l'agressivité chimique de l'environnement		
	Exposition aux attaques sulfates dans les eaux souterraines ou dans le sol		
	XA1 (sulfates)	faible agressivité	élément en contact avec le terrain, fondation, tunnel, pieux
	XA2 (sulfates)	agressivité modérée	
	XA3 (sulfates)	forte agressivité ⁶⁾	
	Exposition à d'autres types d'agressions chimiques (dissolvantes)		
	XA1	faible agressivité	fosse à lisier, bassin de décantation de STEP
	XA2	agressivité modérée	bassin biologique (nitrification/dénitrification) de STEP, réservoir contenant de l'eau potable de faible dureté, piscine (traitement chimique)
XA3	forte agressivité ⁶⁾	tour de refroidissement, centrale à biogaz (méthanisation), silo à fourrage, canalisation d'eaux usées (sulfureuses)	

Chapitre II : Produits Ceramiques

II.1 Généralités

Le mot céramique désigne essentiellement les poteries, porcelaine, brique. Il représente actuellement l'ensemble des matériaux inorganique non métallique [1]. Les céramiques sont a base d'oxydes (Al_2O_3 , ZrO_2 , CaO , TiO_2 ,...etc) ou des composés chimique comme SiC , WC ,...etc. Ce sont des matériaux qui conduisent à des températures supérieures à $900^\circ C$ à la formation d'un solide macroscopique homogène [2]. La structure et la microstructure sont définies lors du cycle d'élaboration, qui transforme des matières premières le plus souvent pulvérulentes en un matériau dense, idéalement exempt de pores [3]. Ce sont des polycristaux qui sont fabriqués par frittage d'un mélange d'oxyde et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques. Les propriétés des céramiques vont dépendre de leur microstructure, c'est à dire la morphologie, la nature des phases présente et la qualité de la surface [4]. Les principales utilisations de ces matériaux concernent toute l'instrumentation électroacoustique : émission et détection des ultra-sons, microphones, télécommandes, générateurs d'impulsion, ...etc [1].

II.2 Propriétés générales des céramiques

II.2.1 Liaison et Structure

Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liées entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques, et forment des composés hétéropolaires.

Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons libres: les céramiques sont dans l'ensemble de mauvais conducteurs de l'électricité et de la chaleur; on les utilisent fréquemment comme diélectrique et comme isolant thermique. Certaines céramiques présentent également des propriétés piézoélectrique et ferroélectrique [7].

II.2.2 Microstructure et propriétés

Les propriétés mécaniques des céramiques dépendent, dans une large mesure, des matières premières employées, ainsi que des méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases présentes. Pendant l'étape de frittage, il y a un soudage des particules par diffusion à l'état solide et une diminution graduelle de la porosité.

Un contrôle précis de la qualité des matières premières, de leur composition, de leur granulométrie et des paramètres de frittage permet l'obtention des céramiques entièrement cristallines et non poreuses [8].

II.3 Classification des produits Céramiques (10-15)

II.3.1 Titanate de plomb PbTiO_3

Le titanate de plomb est une substance ferroélectrique qui est obtenue par réaction entre le bioxyde de titane TiO_2 et l'oxyde de plomb à la température 350°C . À température ambiante le titanate de plomb possède une structure quadratique de paramètres $a = 3.899 \text{ \AA}$ et $c = 4.153 \text{ \AA}$ et le groupe d'espace $P4/mmm$. Le rapport c/a de 1.06 indique que cette structure possède une distorsion relativement importante par rapport à la structure pérovskite [9]. Ce matériau est caractérisé à 450°C par un constant diélectrique élevé de 2000. Au delà du point de curie ($T_C = 490^\circ\text{C}$), il devient paraélectrique et possède une structure cubique dont la paramètre a est égal à 3.960 \AA à 535°C .

II.3.2 Zirconate de plomb PbZrO_3

Le zirconate de plomb est obtenu par réaction des deux oxydes de base PbO et ZrO_2 . Cette réaction commence des 750°C et est complète à 900°C [10]. Le zirconate de plomb possède une structure orthorhombique de paramètre:

$a = 5.88 \text{ \AA}$, $b = 11.78 \text{ \AA}$, $c = 8.21 \text{ \AA}$ et de groupe d'espace $Pbam$. Cette variété est antiferroélectrique, stable à basse température et elle subit une transition vers une autre variété cristalline paraélectrique, de symétrie cubique, à $T = 230^\circ\text{C}$. Cette dernière est appelé température de curie T_c .

II.3.3 La solution solide Titanate- Zirconate de plomb $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$

La substitution partielle des ions zirconium par des ions titane dans PbZrO_3 entraîne la formation d'une solution solide de formule $\text{Pb}(\text{Zr}_x, \text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Cette substitution et fait apparition deux nouvelle phases ferroélectriques en dessous de la température de curie qui en fonction de la valeur de x [11]. La PZT présente une structure quadratique lorsque x est supérieur à 0.55 et rhomboédrique dans le cas contraire [9]. La frontière entre ces deux phases est appelée frontière morphotropique de phases (F.M.P). La solution solide de zirconate-titanate de plomb sont ferroélectrique, donc douées d'une polarisation spontanée électrique et par conséquent piézoélectrique.

On peut les classer selon le critère de la porosité :

- Les produits poreux (se laissent rayer par l'acier) et notamment les terres cuites (briques, tuiles, bardeaux, etc), les produits réfractaires (briques) et la faïence,
- Les produits non-poreux (vitrifiés) comme les grès cérames (carreaux, tuyaux), les porcelaines.

II.3.3.1 Matière première,

- Extraction minière



Figure.14 fabrications de céramique

- Broyage
- Mélange et dosage des éléments
- Procédés sans compaction
- Traditionnel, artistique, formes complexes
- Coulée à froid d'un vert, puis cuisson.
- Caractéristiques mécaniques faibles.



Figure.15 céramiques

Exemple : procédé d'obtention du vert dans un moule en plâtre

Procédés avec compaction

- Céramiques techniques
- Compactions uni axiales, triaxiales...
- Moulage (après mélange avec de l'eau ou un polymère fusible pour fluidifier)
- Extrusion.

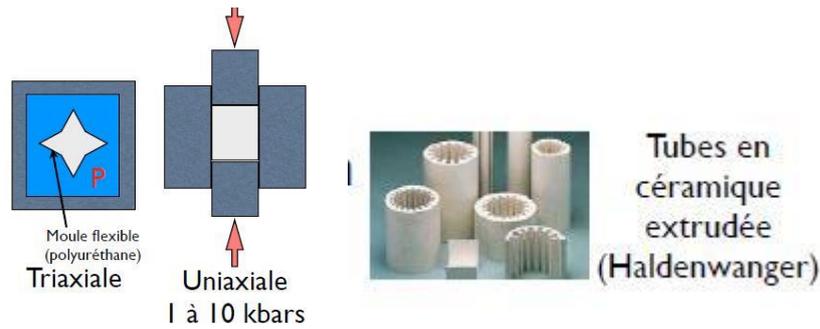


Figure.16 Compactions uni axiales, triaxiales

Frittage

- On chauffe à $T < T_{\text{fusion}}$, (1000-2000°C)
- Par diffusion, les grains se soudent entre eux
- La structure est donc polycristalline
- Les joints de grains sont des zones fragiles
- La disparition des vides entraîne un retrait.

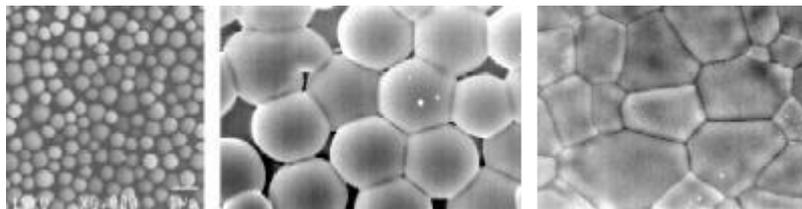


Figure.17 Frittage d'une céramique (microscope électronique)

Porosité

Compaction à chaud

- Le frittage se fait en même temps que la compaction, à chaud
- Ex. SiC : 2000 °C

Abrasif : *carborundum* (meules)

Céramique : ex. filtre à particules *diesel* (FAP).

II.3.4 Caractéristiques communes

- | | |
|--------------------------------------|---|
| - Matériaux les plus durs | - Isolantes |
| - Fragiles | - Certaines sont piézoélectriques, d'autres |
| - Résistance à l'usure | - Supraconductrices... |
| - Résistance aux hautes températures | |
| - Faible conductivité thermique | |

II.3.5 Quelques céramiques

Oxydes Alumine

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| - Al ₂ O ₃ | - Résistance 2500 MPa |
| | - Dureté 1600 Hv |

- Tf 2000°C
 - Isolateurs, support d'éléments chauffants, abrasifs...
 - Céramiques dentaires, filtres, pièces d'usure : vannes « céramique »
- Titanate d'aluminium***
- Al₂TiO₅ et Al₂O₃TiO₂
 - Résistance au choc thermique
 - Résistance aux métaux fondus
 - T < 1000°C (titano-zirconate de plomb)
 - Céramiques piézoélectriques
 - Conversion tension - déformation

Autres

- Magnésie MgO Très résistant à la température : T < 2000°C, Tf = 3073°C
- Dans les briques réfractaires UO₂ : combustible nucléaire
- Combustible nucléaire : pastilles d'UO₂ (empilées dans des tubes de zirconium)

Silicates***Porcelaine***

- Mélange de quartz, feldspath et kaolin
- Produits artistiques, arts de la table...
- Isolation électrique
- 450 MPa en compression, 50 en traction

Autres

- Silicate d'aluminium (argiles) :
- Briques, tuiles, carreaux, éviers...
- Stéatite, talc : MgO-SiO₂
- Mullite 3Al₂O₃.2SiO₂ T < 1725°C : réfractaire.

II.4 Fabrication des produits céramiques

Malgré le large assortiment des céramiques, la diversité de leurs formes et leurs propriétés physico-mécaniques et le type d'argile utilisé, les étapes de fabrication de produits céramiques sont communes.

L'exploitation se fait le plus souvent à ciel ouvert, les forts tonnages de terre employés nécessitent l'installation de l'usine dans la mesure du possible à proximité de la carrière.

L'extraction suit généralement le processus suivant :

37 Processus de production :

Le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

1. L'extraction des matières premières (argiles et limons)
2. La préparation de l'argile
3. Le façonnage
4. Le séchage

5. La cuisson

Gisement, extraction.

- Enlèvement de la découverte au bulldozer, à la pelle chargeuse mécanique et même à la décapeuse,
- Extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique (argile sèche) ou l'excavateur à godets ou au marteau piqueur ou encore les explosifs quand l'argile est trop dure,
- Transport de l'argile à l'usine suivant la distance et la topographie des lieux : wagonnets, téléphérique, camions, bandes transporteuses.

Préparation des terres :

Le but visé est d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. Cela nécessite diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon la terre dont on dispose et le degré de plasticité de la pâte désirée (molle, demi-ferme, ferme).

La préparation comprend deux opérations principales :

Le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.

Broyage et malaxage de l'argile Façonnage des produits :

Une fois la pâte convenablement préparée, il faut lui donner les formes désirées, c'est à dire celles des produits finis utilisés dans la construction. Cette opération s'appelle façonnage et est réalisée par deux grands types de machines :

- Les presses mécaniques ou hydrauliques,
- Les filières (deux rouleaux lamineurs débitant une nappe de pâte qu'on découpe à la longueur désirée).

II.4.1 Production de briques

Séchage:

La préparation de la pâte demandait la présence de l'eau pour la rendre facile au façonnage. Cette eau est à éliminer une fois le produit ayant pris sa forme. Le séchage a pour but d'éliminer lentement l'eau de façonnage sans déformer le produit et permettre sa manutention et son empilement dans le four.

Cette opération est délicate car il faut interrompre le séchage au-dessous de la limite de tension que peut supporter la pâte (W_p); cette limite varie avec la nature de l'argile et la cohésion de la pâte, d'où les difficultés pour assurer un séchage homogène. Il y a deux procédés de séchage :

Séchage naturel.

Il se pratique par exposition des produits dans des hangars légers à l'air libre, ceci demande de grandes aires de dessiccation et une quantité importante de main d'oeuvre. Il est très long à réaliser et est très irrégulier. Il est actuellement abandonné.

Séchage artificiel.

S'effectue dans des installations permettant d'assurer à la fois un chauffage progressif et une ventilation régulière. Le séchage est rationnel grâce au conditionnement de l'air utilisé, à l'évaporation et au réglage de l'hygrométrie de l'air et de la ventilation.

Les installations dans lesquelles il se pratique :

Séchoir compartimenté en chambres où la circulation longitudinale de l'air se fait en sens inverse de l'entrée des produits.

L'opération dure de un à cinq jours suivant les argiles, Séchoir tunnel où circule un train de wagonnets portant les produits à sécher, dans le sens inverse de l'air chaud et sec récupéré des fours. Le séchage dure de six heures à trois jours.

Cuisson:

Transformation de l'argile en céramique.

Lorsque la température du four atteint 700°C, le silicate d'alumine hydraté se déshydrate (perd son eau) et se décompose en alumine (Al_2O_3) et silice (SiO_2).

Si on dépasse 900°C, il se produit une recombinaison chimique de ces constituants en un silicate d'alumine anhydre ($2SiO_2, Al_2O_3$) particulièrement résistant qu'il n'est plus possible de retransformer en pâte plastique par addition d'eau.

C'est ce silicate d'alumine anhydre plus ou moins impur qui constitue la terre cuite.

Si l'argile utilisée est très pure et riche en alumine et en magnésie et que l'on pousse la température vers 1200 °C, on obtient des produits réfractaires.

Mode de cuisson :

Le four le plus utilisé actuellement est le four Tunnel, les autres sont tous abandonnés. Il comporte une seule galerie rectiligne où circule un train de wagonnets de produits empilés qui traverse successivement une zone d'échauffement, une zone de cuisson (où se trouve le foyer fixe) et une zone de refroidissement. Son encombrement est moindre et la cuisson plus rapide (48 heures) avec une économie de 20 ÷ 25% de combustible (fuel ou gaz) et une production doublée.



Figure.18 fabrication de matériaux céramique

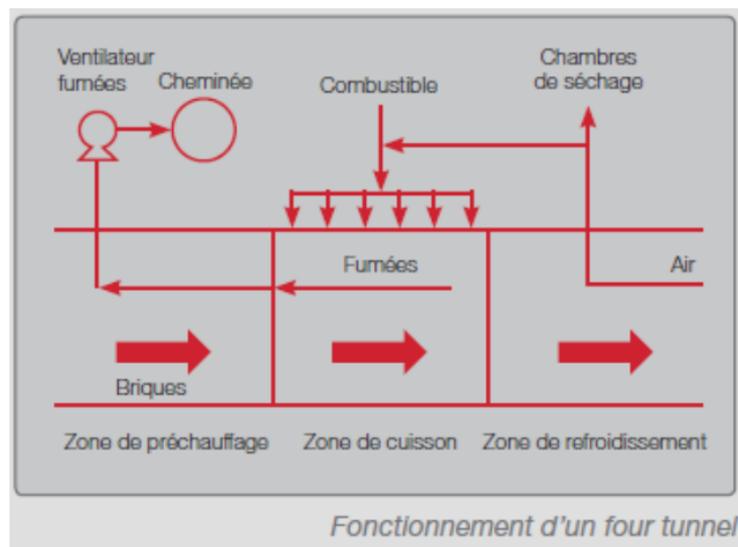


Figure.19 Four tunnel

Emallage :

Pour imperméabiliser les produits poreux (tuiles, briques, etc.), on pratique une deuxième cuisson qui vitrifie la glaçure (produit de traitement superficiel), produit projeté au pistolet ou par trempage dans le bain d'émail.

Vernissage ou flambage.

Il se fait surtout sur les tuyaux de grès. On projette du sel marin dans le four, le sel se volatilise à 800 °C; ses vapeurs se condensent à la surface des produits et se décomposent vers 1200 °C pour former avec la silice un vernis (silicate de soude). Stockage:

Après élimination des produits non vendables (produits voilés, fendus, incuits), les éléments subissent des contrôles :

- De qualité : l'aspect et la couleur,
- De calibrage : afin de les classer en plusieurs choix selon la destination.

Leur stockage se fait en piles de produits de même choix en nombre déterminé pour faciliter le comptage et de plus en plus sur palettes en bois en plein air ou sous hangars. On utilise des chariots élévateurs pour l'empilage et le chargement sur wagon ou camion.

II.4.2 Régularité des formes.

On contrôle les caractéristiques géométriques en vérifiant au pied à coulisse, mais des tolérances sont admises et sont variables avec les produits (ex. : plus ou moins 3% sur la longueur pour une brique pleine).

- Aspect.
- Consiste à observer :
 - Le grain qui doit être fin et serré,
 - Les arêtes vives, nettes et exemptes d'arrachements,
 - La surface unie, lisse ou rugueuse suivant la destination,
 - A couleur du produit.

Il suffit de tremper le produit trois heures dans l'eau à 80°C, la chaux gonfle et par conséquent rompt la brique, produit des éclatements et provoque des cratères.

Porosité et coefficient d'absorption.



Figure.20 Fabrication de céramique

II.4.3 Produits Céramiques (Produits Rouges)

Pour la majorité, la céramique désigne des articles de fantaisie en terre cuite de décoration. Or, la céramique est l'une des plus anciennes activités humaines; au temps des Egyptiens, des Crétois en Orient, ...etc. Ces produits sont obtenus par cuisson de l'argile séchée de manière à obtenir des produits durs, insensibles à l'action de l'eau, poreux ou non suivant qu'ils ont été cuits à température relativement modérée ou jusqu'à commencement de vitrification. Les produits céramiques ne se ramollissent pas et ne fondent qu'à une température de 1500°C environ ou plus. 31 Ces produits présentent un grand intérêt dans la construction d'aujourd'hui, elle est même devenue une industrie moderne permettant de réaliser toutes les parties de la construction :

- Murs en fondation en briques pleines,
 - Murs en élévation en briques creuses,
 - Hourdis pour planchers,
 - Bardeaux (planche mince en forme de tuile)-
 - Tuiles pour couverture,
 - Carreaux pour les revêtements de sols,
 - Faïence pour les revêtements de murs,
 - Boisseaux pour les cheminées
- sous toiture, (conduites de fumée).

L'intérêt porté aux propriétés des matériaux a entraîné le développement d'une grande variété de méthode pour leur préparation. La technique choisie pour former un solide ne dépend pas seulement de la composition, mais aussi de l'état sous lequel il doit être utilisé. A l'échelle industrielle, les économies d'énergie favorisant les méthodes ne nécessitant pas de haute température [5].

Chapitre III : Métaux ferreux et non ferreux

III.1 Généralités,

Le fer est très largement répandu dans l'écorce terrestre, où il se présente sous forme de minerais divers (oxydes, hydroxydes, carbonates, sulfures, silicates et autres). Depuis la préhistoire, l'être humain a appris à préparer ces minerais par lavage, concassage, criblage, élimination de la gangue, et à les traiter par réduction (fusion), agglomération sur grille ou en boulettes pour pouvoir les fondre de façon à obtenir du fer et de l'acier.

Aujourd'hui la production d'acier est un indice de la richesse nationale et elle est à la base de la production de masse dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction navale, l'automobile, le bâtiment et les travaux publics, la construction mécanique, l'outillage et les équipements industriels et ménagers. Le développement des transports, en particulier par mer, ayant rendu le commerce international des matières premières (minerai de fer, charbon, ferrailles et additifs) économiquement rentable, il a contribué à battre en brèche la position privilégiée des pays possédant des gisements de minerai de fer à proximité de mines de charbon.

En raison de son altérabilité et sa faible résistance mécanique, le fer n'est plus utilisé industriellement.

Les métaux les plus utilisés dans la construction sont la fonte et l'acier puisqu'ils présentent les avantages suivants :

haute résistance, plasticité, conductibilité thermique élevée, assemblage par soudage.

En revanche, ces matériaux présentent aussi des inconvénients à savoir : corrosion en présence d'eau et déformation sensible avec l'augmentation de la température.

III.2 Propriétés des métaux (Physiques, chimiques et mécaniques),

La dilatation produite par l'échauffement est caractérisée par le coefficient de dilatation linéaire ou volumique. Ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température.

Mécaniques : sont caractérisés par :

La résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs. Suivant la nature de ces efforts on distingue : les résistances à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui sont caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt, 7

La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône, la résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs, la fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique), le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité la dilatation produite par l'échauffement est caractérisé par le coefficient de dilatation linéaire ou volumique. Ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température.

Mécaniques : sont caractérisés par :

La résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs. Suivant la nature de ces efforts on distingue : les résistances à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui sont caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt,⁷

La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône, la résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs, la fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique), le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité.

III.3 Protection des métaux ferreux contre la corrosion

Le minerai de fer se trouve sous forme de roche. Certaines exploitations sont à ciel ouvert, d'autre est souterrain. Le minerai de fer existe en quatre combinaisons principales, soient :

Fer + oxygène (les oxydes)

Fer+ oxygène + hydrogène (les hydroxydes)

Fer+ oxygène + carbone (les carbonates)

Fer+ soufre (les sulfures).



Figure.21 Roche du minerai de fer

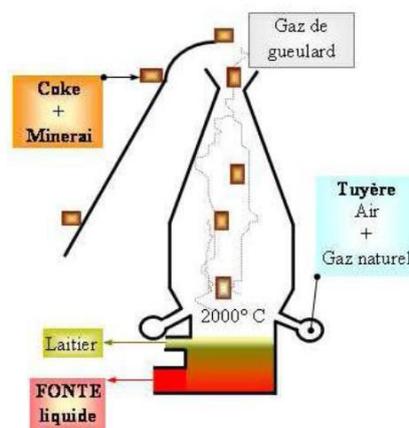


Figure.22 Schéma de principe d'un haut-fourneau

Tableau. 15 Type et caractéristiques de minerai

Type de minerai	Désignation chimique	formule	Teneur en fer en %	Gisements exploités
Magnétite	Protoxyde fer	Fe_3O_4	60-70	Espagne, Algérie, Allemagne, Suède, Norvège, U.S.A, U.R.S.S
Fer oligiste, hématite rouge	Oxyde de fer anhydre	$2 Fe_2 O_3 + 3 H_2 O$	40-60	Inde, Espagne, Angleterre, U.S.A,
Fer volithique hématite brune ou limonite, ou minette	Oxyde de fer hydraté	$2 Fe_2O_3 + 3H_2O$	20-45	France, Allemagne
Fer spatique (sidérose)	Carbonate de fer	$FeCO_3$	30-45	France, Espagne, Allemagne
Pyrite	Sulfure de fer	FeS_2	25-50	Espagne,

III.4 Classification des aciers selon compositions,

On traite le minerai dans une sorte de four cylindro-conique on brique réfractaire, et en couche métallique à l'extérieure, le four lui-même appelé (Haut-fourneau). La fonte s'obtient dans les hauts fourneaux à partir de minerai de fer et du coke (carbone). L'élévation de température

conduit à la fusion de la charge et à la transformation chimique, ce qui permet d'obtenir de la fonte liquide et des résidus : laitier et gaz.

Le produit obtenu n'est pas du fer pur mais un alliage de fer et du carbone de 2,3 à 4,5% appelé fonte. Selon la façon de traitement on obtient soit de fonte blanche, soit de fonte grise.

La fonte produite par le (Haut-fourneau) appelé fonte de 1^{ère} fusion elle a 3 utilisateurs.

- 1^{er} fusion de l'utilisateur : coulée destinée à être utiliser dans 2 me fusion
- 2^{ème} utilisateur : exécution de grosse pièce par coulée directe dans les moules.
- 3^{ème} utilisateur : fabrication de l'acier.

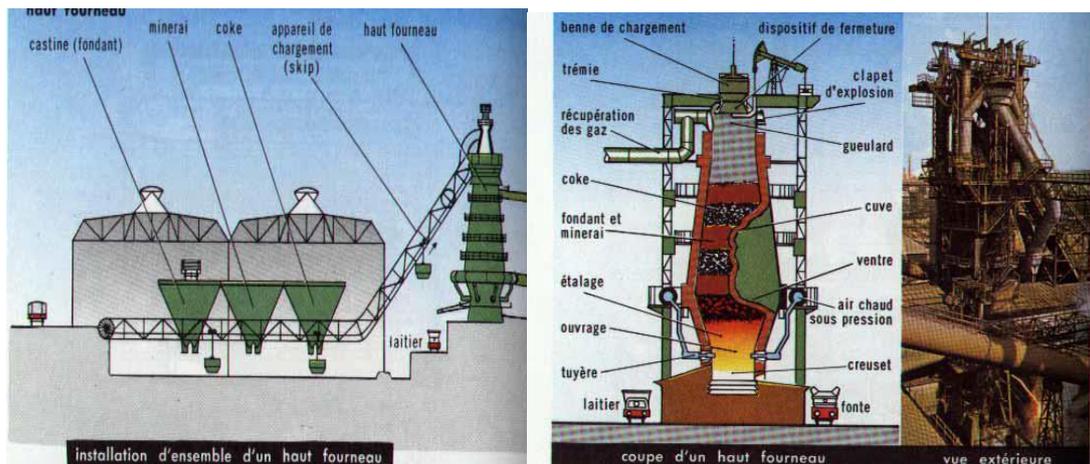


Figure.23 Utilisateurs de haut fourneau

Avantages des fontes

- Elles permettent la réalisation des pièces moulées complexes car elles possèdent une excellente coulabilité (Aptitudes au moulage). Elles ont une excellente usinabilité, le graphite jouant le rôle de lubrifiant (mise à part les fontes blanches où le graphite n'est pas présent). Elles sont très résistantes en compression.

Inconvénients des fontes

- Les fontes grises lamellaires sont peu résistantes aux chocs, pour les autres fontes le problème de résilience est résolu par la forme non lamellaire du graphite. Les fontes FGS (Fonte grise à graphites sphéroïdaux)
- ne sont pas utilisées autant que les fontes FGL (Fonte grise à graphite lamellaire)
- parce que son coût de fabrication est bien plus élevé.
- Les fontes blanches sont très peu utilisées sauf pour la réalisation de pièces spécifiques (Rouleaux de broyeur). Elles sont dures mais très fragiles ceci est dû à la présence de cémentite.

III.5 Principales fontes de 1ère fusion :

Fonte grise : le carbone se trouve à l'état libre sous forme de graphite elle à une teneur en carbone et de silicium très élevée : (C : 3,5 à 4,5% et Si : 1,5 à 5%).

Fonte blanche : le carbone est combiné au fer pour donner le carbure de fer. Elle contient peu de silicium et de carbone.

Fonte truitée : Intermédiaire entre la fonte blanche et la fonte grise, le carbone et en partie déposer dans la masse sous forme de graphite et partie combinée au fer pour donner le carbure de fer. Elle est employée pour la coulée des pièces plus résistance que les pièces en fonte grise.

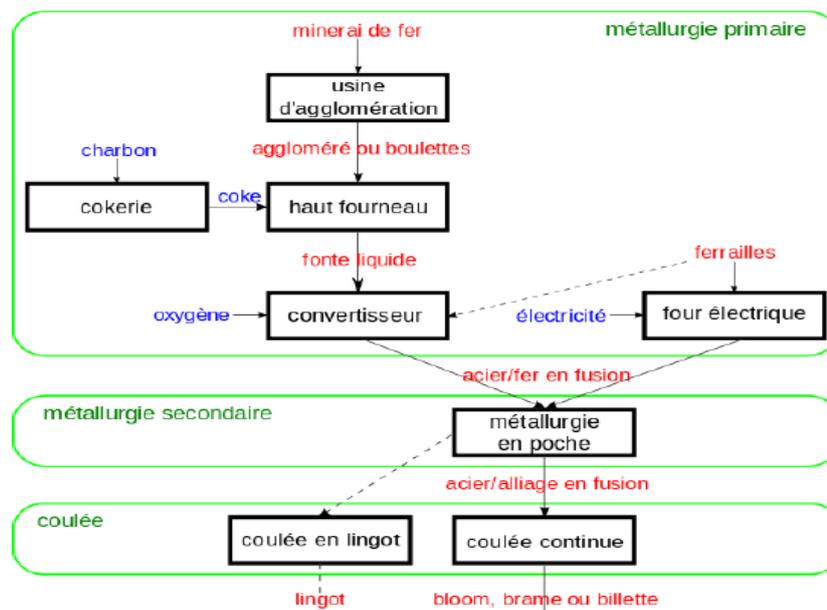


Figure.24 Démarche descriptive et schéma de principe de la coulée

Affinage de la fonte de 2ème fusion

La fonte obtenue en haut-fourneau contient trop d'impuretés, pour utiliser dans la fabrication il est nécessaire de l'affiner c.à.d. de purifier, cette opération obtenue dans un cubilot par fusion de gueuses, le métal obtenu est de la fonte de 2me fusion. Différentes fontes obtenues au cubilot : suivant la construction de charge on obtient :

- Fonte grise riche en carbone de 3,5 à 4% et de silicium de 2,5 à 2,7%
- Fonte blanche, peu de carbone 2 à 2,5% et peu de silicium

Fonte à haute résistance mécanique, en mettant dans le cubilot de la fonte grise + quelque ruban d'acier.

III.5.1 Classification des fontes

a) Fonte grise

- b) Fonte blanche
- c) Fonte mécanique : à haute résistance, aux propriétés intermédiaires entre celle des aciers et celle des fonte grises.
- d) Fonte trempée : fonte durcie superficiellement par refroidissement rapide.
- e) Fonte malléable : obtenue à partir de la fonte blanche, mais traité pour donner la malléabilité et la résilience du fonte selon la façon de traitement on obtient soit : Fonte malléable à cœur blanc.
- f) Fonte malléable à cœur noir C : 2 à 2,5% et Si : 1 à 1,2%.

III.5.2 Utilisations :

La fonte grise trouve essentiellement son emploi dans la construction, spécialement pour la fabrication des pièces travaillant à la compression (gabots, poteaux), ainsi que pour les produits sanitaires (tubes, radiateurs de chauffage).

Chapitre IV : Le verre

IV.1 Introduction :

Le matériau verre occupe depuis toujours une place à part dans l'architecture et suscite un intérêt inégalé auprès des ingénieurs. Il offre des possibilités pour la construction de bâtiments légers, ouverts et lumineux. Le formidable concept est de délaissier les murs massifs et aveugles au profit d'une ouverture transparente et translucide sur l'extérieur. Ce développement dont il a récemment fait l'objet a suscité un tel engouement de la part des ingénieurs et architectes qu'il est devenu le matériau de prédilection des constructeurs d'aujourd'hui. Les différentes gammes de matériau a fait naître une relation de l'homme avec son habitat, avec la lumière et la nature.

IV.2 Élaboration,

Etapas de la fabrication d'un verre sodo-calcique,

- Matières premières broyées, dosées et mélangées : sable de quartz pur + carbonate de sodium + calcaire (SiO_2) (Na_2CO_3) (CaCO_3)
- Four à $T= 1200-1500^\circ\text{C}$
- Affinage et homogénéisation à 1500°C
- Façonnage (à la température de travail)
- Recuit
- Refroidissement lent ou la trempe

IV.3 Procédé de fabrication,

La composition du verre est ajustée en fonction de l'usage auquel elle est destinée. On distingue, selon le domaine d'applications, plusieurs grandes familles de verres. Nous allons nous intéresser à celles qui sont utilisées dans le domaine du bâtiment.

Figure 2 : La silice est le composant de base du verre. On y adjoint divers ingrédients en fonction des qualités souhaitées. Une très faible variation de dosage suffit à modifier complètement les propriétés physiques [3, 10-15].

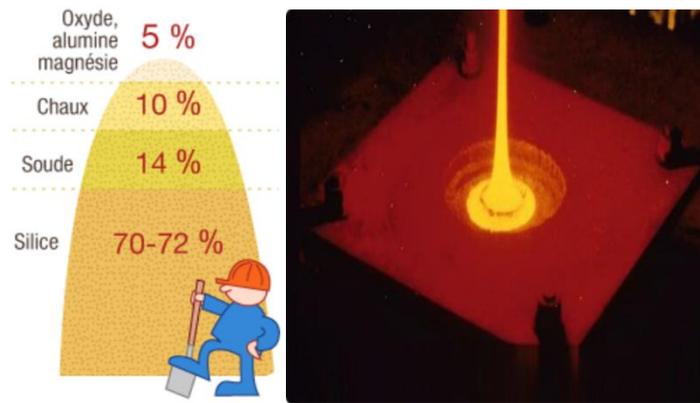


Figure.25 Fusion de la silice mélangée au fondant : 1400°C (la fonte) [4].

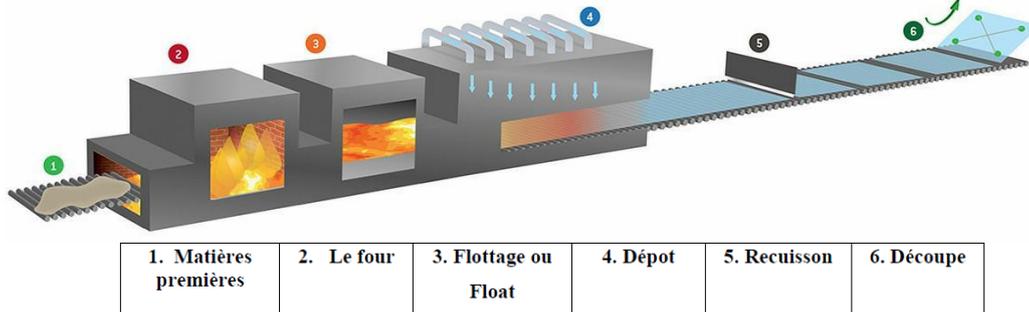


Figure.26 Le procédé Float [6].

IV.4 Propriétés et utilisations.

Densité

Elle varie : 2,4 (g/cm³) → 6 (g/cm³)

Résistance et module

$\sigma_{comp.} = 200 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 1000 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{tr.} = 20 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 100 \text{ N/mm}^2$

$E = 6 - 8 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

Coefficient de dilatation

Proche de celui de l'acier ou du béton

- Verre ordinaire $9,4 \cdot 10^{-6}$
- Cristal $7,6 \cdot 10^{-6}$
- Pyrex $3,4 \cdot 10^{-6}$
- Verre de silice $0,5 \cdot 10^{-6}$

Echanges thermiques

- Conduction $\lambda = 1.0 \text{ W/mK}$
- Convection
- Rayonnement

Le simple vitrage ou verre recuit

Verre de base

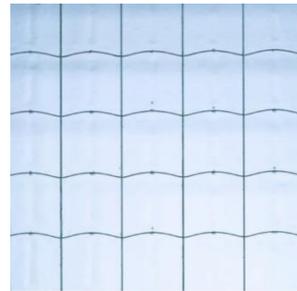


Figure. 27 Illustration d'un simple vitrage [9] Figure 5 : Illustration du verre armé [11]

Le verre imprimé

Le verre profilé



Figure.28 Verre imprimé [12].

Figure. 29 Verre profilé en U pour façade [13]

Verres transformés

Le verre trempé

Le verre feuilleté



Figure.30 Verre trempé [14].

Figure 31 : Verre feuilleté décoratif

Le vitrage isolant

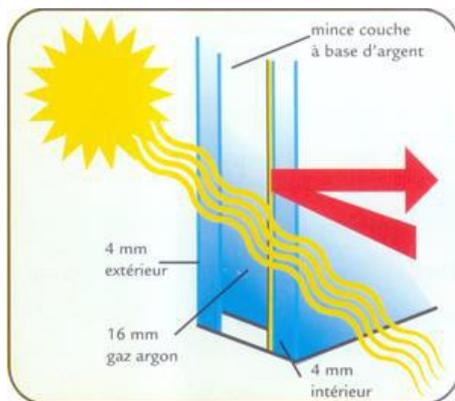


Figure.32 Principe de fonctionnement du vitrage à isolation renforcée [20].

Figure.33 Aspect d'un vitrage à isolation renforcée : Froid à l'extérieur, chaud à l'intérieur [21].

Verres transformés

Le vitrage chromogène



Figure.34 Vitrage photochromique : a) vitrage opaque, b) vitrage transparent [23].

Le vitrage photovoltaïque



Figure.35 Vitrage photovoltaïque transparente [32].

Verre antisolaire imprimé



Figure.36 vitrage sérigraphie, motif sur façade [35].

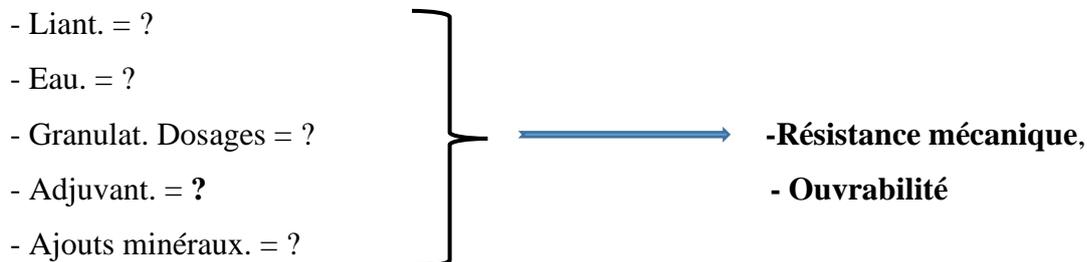
Travaux Pratiques Matériaux De Constructions 2 (L3-S5)

Méthodes de formulation du béton.

Nécessité de choisir une méthode de formulation qui nous permette de faire le choix de la quantité et de la qualité des différents composants en fonction des conditions de mise en œuvre. On est passé de la méthode expérimentale (faire des essais répétitifs qui demandent beaucoup de temps et peuvent avoir un coût important) aux méthodes empiriques (utilisation des résultats des essais expérimentaux pour tirer des lois, graphes, tableaux etc...).

A l'heure actuelle on en est aux méthodes semi-empiriques, semi-analytiques.

Première question : Quel est le nombre de paramètres à prendre en compte dans les méthodes de formulation des bétons.



Mais il y a aussi l'influence d'autres paramètres

- Mise en œuvre, (paramètres externes) alors que le dosage des composants est considéré comme des paramètres internes)

- Forme des granulats,

- Surface spécifique...etc.

Remarque : Le nombre de paramètres peut devenir important c'est pourquoi il faut choisir ceux qui paraissent comme étant les plus importants.

- TP N°01 : Détermination des données indispensables du granulat. (Graviers)
- TP N°02 : Détermination des données indispensables du granulat. (Sables)
- TP N°03 : Détermination des données indispensables du liant. (Ciment)
- TP N°04 : Etude de la formulation de béton. (Méthode de Dreux Gorisse)
- TP N°05 : Essais sur béton frais.
- TP N°06 : Essais sur béton durci.

Fiche de TP N°01 : Détermination des données indispensables du granulat. (Graviers)**Détermination de la masse volumique absolue de gravier classes 3/8, 8/15 et 15/25.**

Masse volumique absolue. Elle est en kg /m³. $M_{vabs} = M / V_s$ (kg /m³)

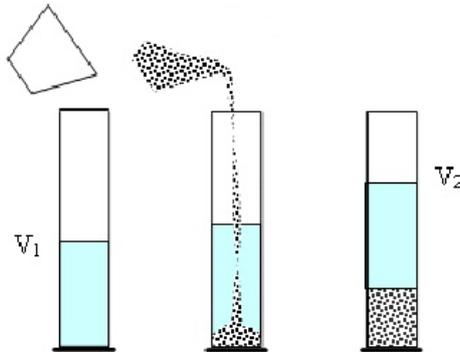
Méthode de l'éprouvette graduée.

Fig. 1: Méthode de l'éprouvette

- Cette méthode est très simple et rapide. utilisé du matériel très courant de laboratoire.
- Toutefois sa précision est faible.
- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M de granulats (environ de 500 g) et l'introduire dans
- L'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V2
- La masse volumique est

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Détermination de la teneur en eau de gravier classes 3/8, 8/15 et 15/25.

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu dans ce granulat au poids du même granulat sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de granulat sec.

Me : Masse d'eau dans le granulat.

Ms : Masse du granulat sec. Mh : Masse du granulat humide.

$$W\% = 100 \frac{Mh - Ms}{Ms}$$

W est exprimé en % donc

Détermination de la qualité de granulat de gravier classes 3/8, 8/15 et 15/25.**Propreté du gravier**

Masse de l'échantillon M1h=1500g Tamisage sur tamis de 1.6mm avant l'étuvage.

Fiche de TP N°02 : Détermination des données indispensables du granulat. (Sables)

Détermination de la masse volumique absolu d'un sable de dune et concassé. Voir TP 01 (gravier)

Détermination l'équivalent de sable de dune et concassé.

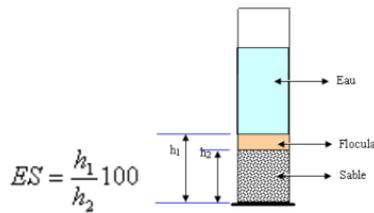


Fig. 2: Définition de l'équivalent de sable

ES à vue	ES piston	Renseignements sur la qualité du sable en fonction de la valeur de l'ES
ESV < 65	ES < 60	Sable argileux d'où risque de retrait ou de gonflement ; ne doit pas être utilisé dans la confection de bétons de qualité.
65 ≤ ESV ≤ 75	60 ≤ ES ≤ 70	Sable légèrement argileux ; peut être admis à la confection de bétons de qualité courante risquant de présenter un retrait plus important, à moins que l'essai au bleu ne donne une valeur VBta ≤ 1.
75 ≤ ESV ≤ 85	70 ≤ ES ≤ 80	Sable propre ; un ESV > 75 permet en fait d'obtenir des bétons de résistance relativement élevées, mais le fascicule 65 A spécifie un ESV ≥ 80 pour les bétons de résistance > 30 MPa.
ES ≥ 85	ES ≥ 80	Sable très propre : la très faible teneur en fines argileuses peut entraîner un défaut de plasticité que l'emploi d'un adjuvant plastifiant doit compenser.

Détermination de l'analyse granulométrique de sable de dune et concassé. Voir TP 01 (gravier)

Détermination le module de fines de sable de dune et concassé.

La qualité ou l'activité en déterminant le Module de finesse (toujours pour le sable), en déterminant la valeur de la surface spécifique (cela dépend de la méthode et de l'appareil utilisé). Expression du Module de finesse : $Mf = \frac{\sum (\text{Refus cumulés tamis } 0.125+0.25+0.5+1+2+4)}{100}$

Grosseur ou finesse en fonction du pourcentage de passant au tamis de 0,5

Sable Fine	Sable Moyens	Sable Grossier
0,6 a' 2,1	1,5 a' 2,8	2,4 à 3,6

Quantification des fines d'un sable de dune et concassé.

Pour nous les fines peuvent être une partie du granulat dont les grains ont un diamètre inférieur à 0.063 ou 0.08 mm ou constituent les ajouts minéraux.

a) La quantité ou la proportion, dans ce cas il s'agira de procéder à un tamisage, soit sec soit humide, pour prendre le passant aux tamis de 0.063 ou 0.08mm.

b) La courbe granulométrique ou la granularité : On peut utiliser dans ces cas le sédiment métrie dans l'eau pour les fines non inertes.

Fiche de TP N°03 : Détermination des données indispensables du liant. (Ciment).

1. Détermination de la masse volumique absolue du ciment.

- Remplir l'appareil de Toluène jusqu'à un volume voisin du zéro soit V1.
- Peser le tout soit M1.
- Introduire environ 60 g de ciment jusqu'à ce que le liquide soit dans la partie utile de la graduation supérieure.
- Bien chasser les bulles d'air, noter V2.
- Peser soit M2.
- La masse spécifique est donnée par :
- $\rho_s = (M2 - M1) / (V1 - V2)$

2. Pycnomètre à liquide :

Matériel utilisé :

- Pycnomètre de 250 cm³.
- Une balance de précision
- Un liquide non réactif avec le ciment (chaux): Toluène.
- Peser le pycnomètre vide m0
- Peser le pycnomètre rempli de Toluène jusqu'au trait repère soit m1.
- Peser 50 g de ciment (chaux) soit m2. • Introduire le corps dans le toluène après avoir vider le pycnomètre à moitié. • Éliminer l'air et remplir de Toluène au trait repère peser m3.

Masse du Toluène déplacé correspond au volume du corps : $m_T = m_1 + m_2 - m_3$ • Volume du Toluène déplacé : $V_T = M_T / \rho_T$ (ρ_T : masse spécifique du Toluène). • Masse spécifique de l'échantillon : $P_c = m_2 / V_T$

3. Détermination la résistance de la classe vrais de ciment.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ_c	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

Le mortier prêt, le verser dans des moules prismatiques 4x4x16 cm. La mise en place est réalisée par vibration.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable	Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

Tableau 1. Opérations de malaxage du mortier normal.

Fiche de TP N°04 : Etude de la formulation de béton. (Méthode de Dreux Gorisse)

Utilisation de la méthode de Dreux - Gorisse pour la détermination de la composition du béton.

Données Indispensables

Données sur le béton en fonction des informations portant sur l'ouvrage

- Résistance du béton à 28 jours $f_{c28} = \dots\dots$ MPa.

Type de béton	Résistance du béton	Exemples
Béton ordinaire	C8/10	Usage décoratif seulement
	C12/15	Usage décoratif seulement
	C16/20	Béton de propreté
	C20/25	Fondations légères (semelle filante ou isolée)
	C25/30	Dalle/plancher - Voile, sans contraintes particulières
	C30/37	Dallage sans contraintes particulières
	C35/45	Béton pour hangar agricole (élevage, fumier...)

- Affaissement au cône d'Abrams en cm : $A = \dots\dots?$ cm

Affaisse cm	Plasticité	Désignation	Vibration	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plas	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piqué	Fondations profondes Dalles et voiles minces

- Moyens de Serrage (énergie de vibration): Puissante – Normale – Faible - Léger piquage
- Pompage ou non du béton : Oui/Non. 2/Données sur le ciment :
- Classe vraie à 28 jours : $\sigma_{c28} =$ donnée ? MPa
- Masse volumique réelle en g/cm³: donnée 3.1 g/cm³ 3/Données sur les granulats :
- Qualité des granulats et Forme des granulats : par essai:

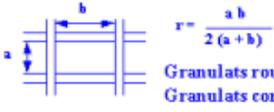
Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (20 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

- Tableaux d'analyse granulométrique des granulats : voire courbes de TP N° 01
- Propreté (Equivalent de Sable): $ES =$ voire tableau de TP N° 02
- Module de finesse(sable) : $M_f =$ voire TP N° 02
- Teneur en eau du gravier $W(\%) =$ voire TP N° 01 %,
- Teneur en eau du sable $W(\%) =$ voire TP N° 02 % $W(\%)$
- Masse volumique absolu du gravier; $M_{Vr}(\text{gravier}) =$ voire TP N° 01 g/cm³ .
- Masse volumique absolu du sable : $M_{Vr}(\text{sable}) =$ voire TP N° 02 g/cm³

2. Les Différentes Etapes

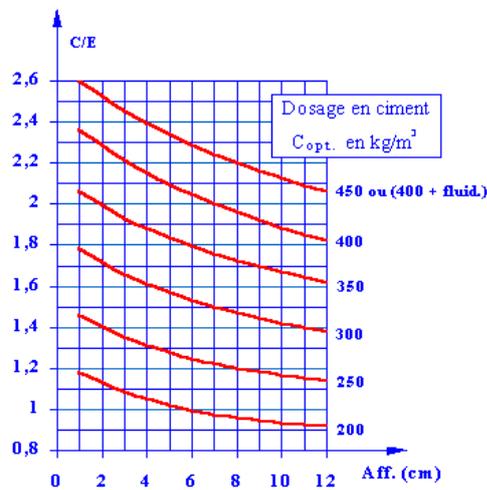
Conditions de mise en œuvre.

Détermination de la dimension du gros grain D_{max}

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D _{max}
e _h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	≤ e _h / 1,5
e _v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	≤ e _v
d	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive ≥ 5 cm et moyennement agressive ≥ 3 cm Ambiance peu agressive ≥ 3 cm non agressive ≥ 1 cm	< d
r	Rayon moyen du ferrailage  $r = \frac{ab}{2(a+b)}$ Granulats roulés Granulats concassés	≤ 1,4 r ≤ 1,2 r
h _m	Hauteur ou épaisseur minimale	≤ h _m / 5

Détermination du dosage en éléments fins (Ciment)

$$\sigma^3_{28} = G^3 \sigma^3_c (C/E - 0.5)$$



Détermination du dosage en eau

Dimension maximale des granulats D en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

Contrôle de qualité du granulat (sable)

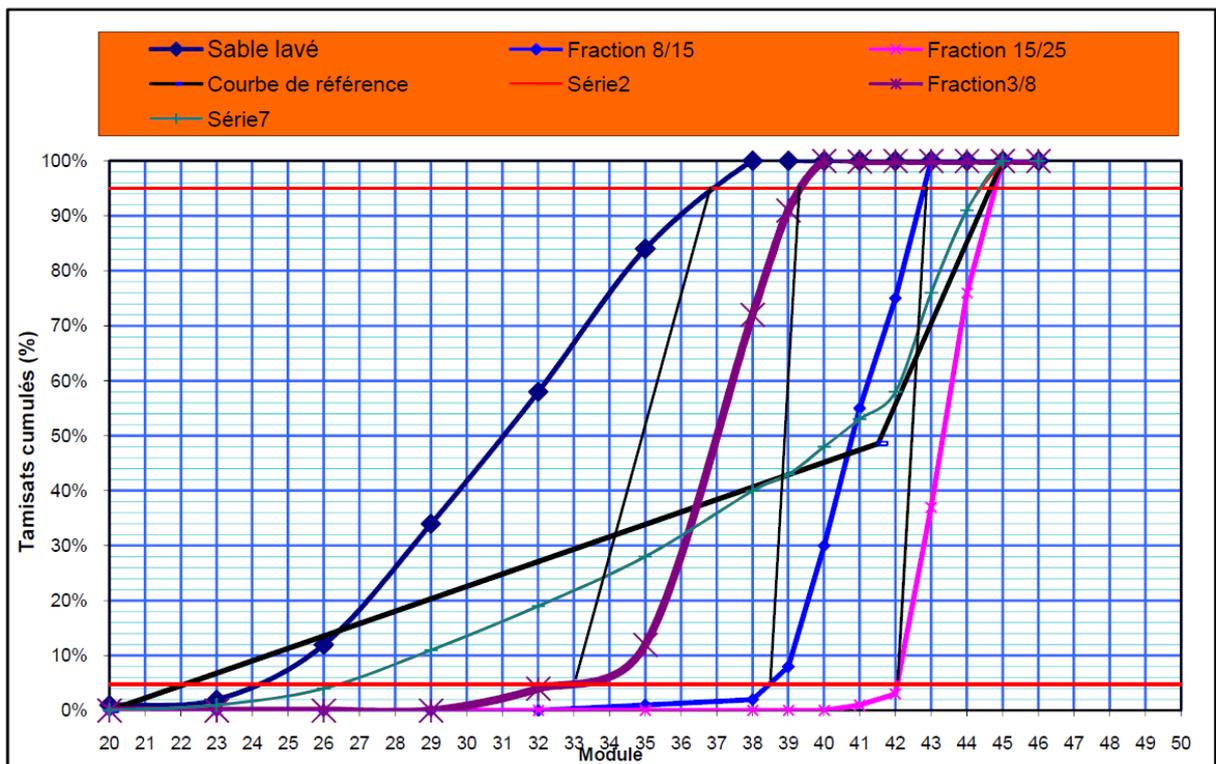
Tracé de la courbe granulométrique de référence OAB.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Nota 1 : Correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 M_f - 15$ (M_f étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = + 5$ à + 10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

Trace de la ligne de partage des courbes granulométrique avec la courbe de granulométrique de référence.



Détermination du dosage du granulat (Sable, Gravier, etc...)

On calcule le coefficient de la compacité, il est donné par la formule suivante : $\gamma = Vm/1000$

Avec :

- V_m : volume absolu des matières solides. $V_m = V_G + V_S + V_C$ (litres).
- V_G : Volume des gravillons.
- V_S : Volume du sable.

- VC : Volume du ciment.

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des *granulats roulés* sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0,01.
- sable et gravier concassé = - 0,03.

Densité théorique du béton frais.

Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton $\rho = (E+C+S+g+G)$ est pour un béton courant comprise entre 2,3 t/m³ et 2,5 t/m³. La formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée

Correction (d'après DREUX).

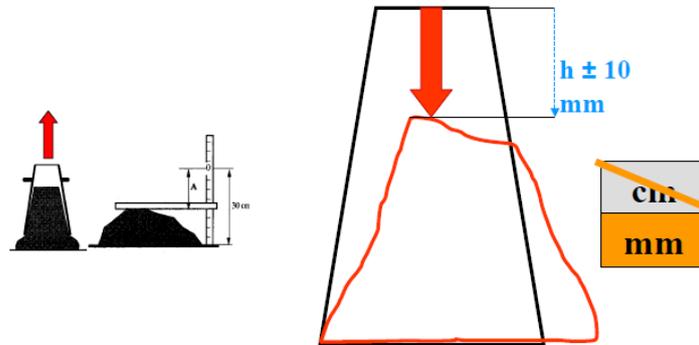
La formulation de béton obtenue précédemment est théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.

Des corrections seront apportées avant fabrication pour prendre en considération la teneur en eau éventuelle des granulats et après une série de tests effectués en laboratoire pour ajuster les dosages en eau, granulats et ciment.

Fiche de TP N°05 : Essais sur béton frais.***Méthodologie de malaxage du béton.***

Mesure la masse volumique de béton à l'état frais.

3. Mesure de l'ouvrabilité du béton. (Con d'Abrams, et table vibrante).



L'ouvrabilité est considérée comme une propriété repérable mais non mesurable. Comme en technologie il faut toujours affecter des valeurs aux différentes propriétés on utilise la consistance qui est en fait une valeur issue de l'interaction entre cette propriété (l'ouvrabilité) et l'appareil utilisé.

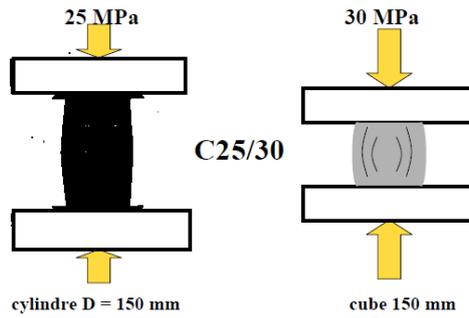
On peut facilement constater que lors de l'utilisation du cône d'Abrams l'affaissement de la pâte de béton est dû au poids propre de cette pâte alors que lorsqu'on utilise le maniabilimètre LCPC l'écoulement de la pâte est provoqué par la vibration.

Prélèvement des échantillons du béton (moules 15x30cm).

Fiche de TP N°06 : Essais sur béton durci.

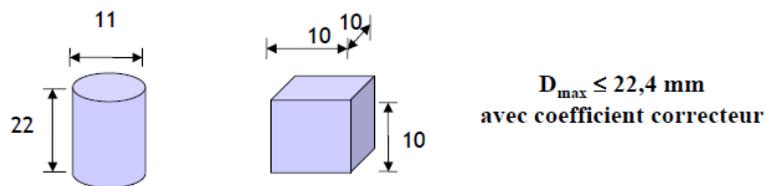
Mesure la masse volumique de béton à l'état durci.

Mesure de la résistance mécanique à la compression. (Scléromètre, la presse,).



On parlera surtout de la résistance mécanique à la compression. Pour qu'un essai soit considéré comme un essai de compression simple il y a des conditions à remplir sinon l'essai sera désigné par essai d'écrasement.

Ces conditions portent d'abord sur les dimensions des échantillons (la valeur de l'élancement doit nous permettre de nous débarrasser des phénomènes de flambement et de frottement), de même les faces de chaque échantillon doivent être strictement parallèles et lisses. On doit à chaque fois faire appel aux normes (citez les normes Algériennes).



Cylindres 11*22 :

$f_{c,cyl} = 0,98 * R$ si $R \geq 50$ MPa

$f_{c,cyl} = R - 1$ si $R < 50$ MPa

Cubes de 100 mm :

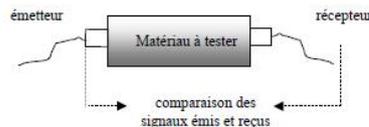
$f_{c,cub} = 0,97 * R$ si $R \geq 50$ MPa

$f_{c,cub} = R - 1,5$ si $R < 50$ MPa

- ✓ carottes – prélèvement et essais en compression (NF EN 12 504-1)
- ✓ détermination de l'indice de rebondissement (NF EN 12 504-2)



- ✓ détermination de la vitesse de propagation du son (NF EN 12 504-4)



Conclusion

Le résultat explicite de ce polycopié est de fournir des cours et des travaux pratiques sur l'unité d'enseignement des matériaux de construction tel qu'approuvé dans le programme d'études de premier cycle en génie civil. Cette fiche de cours sert de référence principale pour les sujets des unités 1 et 2 du MDC pour les étudiants de deuxième et troisième année du premier cycle en génie civil.

La présentation des chapitres de chaque matière séparément d'une part, et en détail d'autre part, permet d'évaluer séparément les informations relatives à chaque chapitre, ainsi que les travaux pratiques de chaque matière, sachant que les deux matières de Matériaux de Constructions 1 et 2 sont consécutives et complémentaires. Les cours et les travaux pratiques des deux unités sont continus, il n'est donc pas possible de passer d'une étape à l'autre sans avoir terminé la première, car les informations se construisent les unes sur les autres.

Bien que ce sujet d'unité d'enseignement en deuxième et troisième année de licence, il est considéré comme un programme continu, et cela est dû à la nécessité d'une grande variété d'informations liées à la plupart des autres unités d'enseignement telles que l'unité d'enseignement du béton armé, la résistance des matériaux, et d'autres matériaux de base qui sont progressivement étudiés dans la plupart des cycles, ce qui a conduit à l'enseignement progressif de ce programme également dans les cycles de licence et master, avec d'autres sujets de base, en notant que l'unité des matériaux de construction est toujours l'un des principaux matières des unités de fondamentales du génie civil.

L'aspect pédagogique de cette approche est un avantage, car on comprend rapidement comment produire des matériaux composites tels que le béton à partir des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des composants ainsi que des propriétés d'autres matériaux composites. Toutefois, les informations sont actualisées et complétées de temps à autre, en tenant compte des phénomènes physiques et chimiques et des conditions climatiques.

La question du suivi de la technologie et des matériaux innovants reste la meilleure chance pour notre domaine d'application, car elle ouvre la voie à la formation continue, qui mène au développement et à la connaissance, qui est la véritable base de la recherche scientifique.

Références

- [1] Michael F. Ashby, David R. H. Jones. Matériaux Volume 1, Propriétés, applications et conception : cours et exercices : Licence, master, écoles d'ingénieurs, Edition Dunod, 2013.
- [2] Dupain, Raymond, Saint-Arroman Jean-Claude. Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire : terminale STI génie civil, BTS bâtiment, BTS travaux publics, DUT génie civil, master pro géosciences génie civil, écoles d'ingénieurs, Casteilla, 2009.
- [3] Christian Lemaître. Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction : matière & matériaux, propriétés rhéologiques & mécaniques, sécurité & réglementation, comportement thermique, hygroscopique, acoustique et optique, Eyrolles, 2012 Collection Blanche BTP.
- [4] Jean Festa, Georges Dreux, "Le nouveau guide du béton". Editions Eyrolles 1998.
- [5] Jean Festa, Georges Dreux. Essais et contrôle des bétons, Editions Eyrolles, 1978
- [6] Abrams, Duff. A. (1918). Design of Concrete Mixtures. Bulletin No 1, Structural Materials Research Laboratory Lewis Institute, Chicago. [Consulted le 2016].
- [7] AFNOR NF EN 934-3+A1, 2012. Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 3 : adjuvants pour mortier de montage - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage
- [8] AFNOR, NF EN 197-1. (2012). Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [9] AFNOR, NF EN 206 + A1 (2016). Classification index November concrete - Specification, performance, production and conformity.
- [10] American, Concrete Institute ACI 211.1-911991. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, Farmington Hills Michigan.
- [11] Bolomey, J., (1936). Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, Bulletin technique de la Suisse romande, 7 62 73-78. <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bts-002:1936:62:95>.
- [12] Caquot, A., (1937). Le rôle des matériaux inertes dans le béton. Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils de France 765 562-582.
- [13] De Larrard, F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons. LCPC Nantes, France.
- [14] Duff A. Abrams. Design of Concrete Mixtures. Bulletin No. 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 20 pp, 1918, (consulted le 2016). https://www.forgottenbooks.com/es/download/DesignofConcreteMixtures_10276916.pdf
- [15] Féret, R., (1892). Sur la compacité des mortiers hydrauliques, Annales des Ponts et Chaussées, Édition. Paris. Vve. C. Dunod. Série 7 4 5-164.

Annexes (canevas 2021/2020)*Annexe -I-***Semestre :4****Unité d'enseignement: UEF 2.2.1****Matière 2: Matériaux de construction****VHS: 22h30 (Cours: 1h30)****Crédits: 2****Coefficient: 1****Objectifs de l'enseignement :**

L'étudiant sera en mesure de caractériser les paramètres physico-mécaniques des matériaux de construction.

Connaissances préalables recommandées :

Toutes les matières fondamentales du socle commun S1 et S2.

Contenu de la matière :**Chapitre 1 : Généralités (2 semaines)**

Historique des matériaux de construction, Classification des matériaux de construction, Propriétés des matériaux de construction.

Chapitre 2 : Les granulats (4 semaines)

Granularité, Classification des granulats, Caractéristiques des granulats, Différents types de granulats.

Chapitre 3 : Les liants (6 semaines)

Classification, Les liants aériens (chaux aérienne), Les liants hydrauliques (les ciments portland), Constituants principaux et additions

Chapitre 4 : Les mortiers (3 semaines)

Composition, Les différents types de mortiers (mortier de chaux, mortier de ciment), Caractéristiques principales.

Mode d'évaluation :

Examen : 100%.

Annexe -2-

Semestre : 4

Unité d'enseignement : UEM 2.2

Matière 2 : TP Matériaux de construction

VHS : 22h30, (TP : 1h30)

Crédits: 2

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement :

L'étudiant sera en mesure de caractériser les paramètres physico-mécaniques des matériaux de construction.

Connaissances préalables recommandées :

Cours de matériaux de construction.

Contenu de la matière :

TP1 : Masses volumiques du ciment, sable et gravier

TP2 : Analyse granulométrique du sable et du gravier

TP3 : Teneur en eau et foisonnement du sable

TP4 : Porosité du sable et gravier

TP5 : Coefficient volumétrique du gravier

TP6 : Equivalent de sable

TP7 : Essai de consistance et de prise du ciment

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%.

Annexe -3-

Semestre : 5**Unité d'enseignement : UEF 3.1.2****Matière 2: Matériaux de construction 2S: 22h30 (Cours: 1h30)****Crédits: 2****Coefficient: 1****Objectifs de l'enseignement:**

L'objectif est de permettre à l'étudiant d'enchaîner avec la matière enseignée en S4 notamment sur des composants des bétons et leurs comportements à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (les résistances mécaniques) sans oublier de décrire les différents types de bétons existants en se basant sur des textes normatifs actuels. Aussi, l'étudiant connaîtra les processus d'élaboration des différents matériaux, de la matière première jusqu'au produit fini.

Connaissances préalables recommandées:

Durant le S4 l'étudiant aura acquis des connaissances préliminaires et de base sur les caractéristiques physiques et mécaniques des liants et des granulats. L'étudiant sera en mesure de différencier entre les types de mortiers.

Contenu de la matière:**Chapitre 1. Les bétons****(7 Semaines)**

Définition et classification, Caractéristiques physiques et/ou mécaniques, Additions, Adjuvants, Formulation des bétons, Essais sur béton frais, Essais sur bétons durcis, Notions sur les nouveaux bétons et leurs applications.

Chapitre 2. Produits céramiques**(4 Semaines)**

Généralités, Classification des produits Céramiques, Matière premières, Fabrication des produits céramiques (Briques, tuiles, Carreaux de revêtement des murs et des sols, Céramique sanitaires, etc.).

Chapitre 3. Métaux ferreux et non ferreux**(2 Semaines)**

Généralités, Propriétés des métaux (Physiques, chimiques et mécaniques), Classification des aciers selon compositions, Protection des métaux ferreux contre la corrosion.

Chapitre 4. Le verre**(2 Semaines)**

Élaboration, Procédé de fabrication, Propriétés et utilisations.

Mode d'évaluation : Examen: 100%.

Annexe -4-

Semestre : 5**Unité d'enseignement : UEM 3.1****Matière 3 :TP Matériaux de construction 2****VHS : 22h30 (TP : 1h30)****Crédits : 2****Coefficient : 1****Objectifs de l'enseignement :**

Ces TP ont pour objectif principal de développer chez l'étudiant l'intérêt de connaître certaines propriétés spécifiques des matériaux en respectant les normes en vigueur et surtout faire connaissance avec un matériau clé dans le domaine du génie civil : le béton. Mettre l'étudiant en direct avec les techniques de laboratoire.

L'étudiant ayant acquis des notions de base en termes de TP sur les matériaux, il s'avère nécessaire d'approfondir ses connaissances par des essais plus spécifiques sur le béton.

Connaissances préalables recommandées :

Matériaux de construction, TP Matériaux de construction, Résistance des matériaux1.

Contenu de la matière :

TP. 1 : Détermination du module de finesse et du taux des fines du sable.

TP. 2 : Utilisation de la méthode de Dreux-Gorisse pour la détermination de la composition du béton.

TP.3 : confection et essais sur mortiers.

TP.4 : Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams.

TP.5 : Essai d'écrasement sur béton.

TP.6 :Essais non destructifs.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%.