

**Intitulé du Master : Géotechnique**

**Semestre : I**

**Intitulé de l'UE : UEM1**

**Crédits : 1**

**Coefficients :1**

**Intitulé de la matière : Matériaux de construction**

### **Objectifs de l'enseignement**

- Comprendre la fonction des matériaux dans la construction ;
- Comprendre les propriétés et sollicitations qui orientent le choix des matériaux de construction
- Comprendre les bases de la chimie, de la physique et de la microstructure qui sont responsables de leur comportement
- Sensibilisation aux questions environnementales

### **Contenu de la matière**

Chapitre I Généralités

Chapitre II Chaux hydraulique

Chapitre III Ciment étapes de fabrication

Chapitre IV Granulats

Chapitre X Bétons : composition préparation transport mise en œuvre

# Généralités

## Perspective historique

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

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

### I.1.Terminologie

**1. Béton :** Mélange de liant avec une proportion variable de sable, Agrégat, et d'eau, si en ajoute des armature le béton devient béton armé

#### 2. Mortier :

Mélange homogène de liant avec une proportion variable de sable et d'eau. Un mortier est désigné par le nom du liant utilisé. Exemples : mortier de ciment, mortier de chaux. Un mortier bâtard comporte au moins deux liants différents. Il est désigné par l'énumération de ses liants. Exemples: mortier de ciment-chaux, mortier de chaux-plâtre.

#### 3. Coulis

Mortier très fin ou pâte de ciment assez fluide pour pouvoir être injecté.

#### 4. Liants

Les liants utilisés en maçonnerie et pour les enduits sont les ciments, les chaux (grasse et hydraulique), les plâtres.

### I.2.Propriétés des matériaux de construction

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

- **Propriétés physiques** : (dimension, densité, masse volumique, porosité, humidité, etc),
- **Propriétés mécaniques** : (résistance en compression, en traction, en torsion, le module de formation, le module d'élasticité, ...etc),
- **Propriétés chimiques** : (alcalinité, acidité, agressivité, dureté... etc).
- **Propriétés physico-chimiques** :( absorption, perméabilité, fissuration, corrosion... etc),
- **Propriétés thermiques** : (dilatation Coefficient d'expansion thermique), Chaleur spécifique, Résistance et comportement au feu ...etc).

Les matériaux de construction doivent :

1. Posséder certaines propriétés techniques, (Rigidité, Résistance, Étanches ...)
2. Pouvoir facilement être travaillés, (par Exemple : Stabilité pour ne pas s'effondrer)
3. Être économiques.

La technologie des matériaux s'occupe des domaines d'application de la science des matériaux à l'art de construire (à savoir : choix des matériaux, détermination de leurs caractéristiques, connaissance de leurs propriétés, techniques de mise en œuvre, méthodes d'essais, développement de nouveaux matériaux ou systèmes de matériaux).

# I Généralités sur le plâtre

## 1) Historique

Plâtre : Les effets conjugués du feu et de l'eau sur la pierre à plâtre étaient connus à travers le monde, il y a bien 16 mille ans Haute antiquité). Employé comme revêtement mural, il y servait de base à un décor géométrique très primitif fait de triangles et de cercles concentriques.

L'île de Chypre fournissait grâce à ces carrières de gypse une matière première abondante à tout le bassin méditerranéen. Il était utilisé principalement dans les pays à climat sec à très sec (Assyrie, Phénicie, Egypte) ; Il était également connu du monde Romain.

Depuis la première guerre mondiale, sa préparation s'est diversifiée et améliorée. Certains plâtres spéciaux ont acquis une très bonne résistance mécanique et une bonne tenue à l'eau.

## 2) L'Origine

La Pierre à plâtre se trouve dans la nature sous deux formes

**Une forme cristalline** : le gypse ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau très abondante ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 79 %  $\text{CaSO}_4$  et 21%  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $d = 2,32$ )

**Une forme anhydre**, anhydrite ou sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ;  $d = 2,90$ ), plus rare associé au sel gemme où à la marne

Il existe deux grandes catégories de gypses : les gypses naturels et les gypses synthétiques

## 3) Les étapes de fabrication

### **Extraction :**

Le plâtre provient du gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté.

Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine.

### **Concassage-calibrage**

Les blocs de gypse extraits des carrières sont fragmentés en morceaux de plus en plus petits par des passages dans divers concasseurs à mâchoires, à cylindres ou à percussions. Pour réduire ensuite le grain des pierres obtenu par concassage, on procède à un broyage primaire à l'aide de broyeurs à percussion ou à marteaux oscillants.

Le concassage-Broyage est suivi d'un classement des grains selon leur grosseur, qui s'effectue à l'aide de cribles. Avant d'être cuit, le gypse peut éventuellement être séché dans des fours rotatifs.

=

## Cuisson

La cuisson permet d'obtenir par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$

Deux méthodes sont utilisées :

Cuisson par voie humide à une température supérieure à 100°C

Cuisson par voie sèche : elle est pratiquée pour obtenir la plus grande partie du plâtre

A la sortie du four, les divers produits obtenus par les deux modes de cuisson, semi-hydrates et surcuit se présentent sous forme d'une poudre nommée plâtre

## Broyage

Les grains dont elle est composée sont à nouveau broyés et tamisés.

## Homogénéisation et l'adjuvantation

La qualité de ces plâtres sera encore améliorée par l'ajout de différents produits (ciment blanc, chaux aérienne, résine synthétique, modificateur de prise, etc.) ou de granulats légers. Il forme une gamme variée de produits pour chaque usage particulier

## Contrôle et la validation des produits

Des échantillons sont prélevés tout au long du processus de fabrication et contrôlé par le laboratoire qualité de l'usine qui se consacre totalement à ce travail. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité plâtres mis en vente.

### 4) Variétés des plâtres :

Les produits commercialisés sont fonction :

- a) Granularité : plâtre gros 'G' et fin 'F'
- b) Mode de mise en œuvre : manuel 'M' et projeté 'P'
- c) Temps d'emploi : 1 court, 2 moyen et 3 lent
- d) Dureté : normal 'N' et très haute dureté 'THD'

**Exemple** : PGM1N : plâtre gros, normal pour application manuelle à temps de prise court

### 5) Principales propriétés du plâtre :

#### 1. Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie :

Du fait de sa faible conductivité thermique, le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois.

## **2.Humidité des locaux :**

Le plâtre est un matériau poreux et, bien qu'il soit rarement laissé nu et qu'il soit souvent recouvert de peinture, de papier ou de tissu.

## **3. Isolement acoustique :**

Le plâtre, grâce à son aptitude au moulage, à la préfabrication comme à la constitution d'éléments décoratifs à reliefs, se prête à la réalisation de panneaux, de structures architecturales ou ornementales capables de supprimer ou d'atténuer les réverbérations gênantes des bruits ou des sons émis dans une pièce.

Le coefficient d'absorption phonique (coefficient de Sabine) d'une plaque de parement en plâtre de 12 mm, perforée et posée sur une couche de 18 mm de laine minérale, est de 0,74 alors que celui d'une couche de 50 mm de laine minérale est de 0,93. Cela montre qu'il est aisé de constituer des parois absorbant une fraction importante des sons et n'en renvoyant qu'une faible partie.

## **4.Résistance au feu :**

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnu et éprouvé de tout temps, Cette protection a pu autrefois être obtenue grâce à de larges garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction. Elle peut aussi consister en enduits projetés de plâtre spéciaux (spécial feu) ou en enduits traditionnels comportant, de préférence, une armature légère de solidarisation ancrée sur l'ouvrage.

## **6) Utilisation de plâtre dans les Bâtiments**

### **Enduits :**

Le plâtre mélangé à la chaux grasse (10 à 15%) et au sable donne un mortier très utilisé comme enduit extérieur et intérieur. On emploie le plâtre gros pour la première couche d'application sur les plafonds et les murs, pour les travaux de remplissage et pour les planchers.

On utilise le plâtre fin pour la dernière couche de finition.

### **Matériaux de construction :**

Le plâtre peut être armé de fibres pour constituer du plâtre armé. Le staff est du plâtre armé de filasse de chanvre ; il est utilisé en décoration.

Le plâtre sert à la fabrication de carreaux et plaques (sandwich de plâtre compris entre deux feuillets de carton) utilisés souvent pour cloisonner

## II) Chaux Hydraulique

La chaux hydraulique naturelle est un liant hydraulique en poudre, obtenue par calcination (cuisson), à une température supérieure à 900 °C, de roches calcaires qui contiennent des éléments siliceux et alumineux.

Au cours de la calcination, il se forme simultanément :

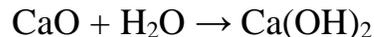
– de l'oxyde de calcium (chaux vive) provenant de la décomposition du carbonate de calcium, constituant principal du calcaire :



Carbonate de calcium → oxyde de calcium + gaz carbonique

– des silicates et des aluminates de calcium provenant de la combinaison d'une partie de la chaux vive avec les éléments siliceux et alumineux.

À l'issue de la calcination, les chaux sont hydratées pour éteindre la chaux vive non combinée



Matière	Calcination au-dessus de 900 °C	Extinction par hydratation	Après tamisage et broyage, produits commercialisés
Calcaire siliceux et alumineux	CHAUX VIVE + silicates et aluminates	CHAUX ÉTEINTE + silicates et aluminates	CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE (NHL)*
Calcaire à faible teneur en silice et alumine	CHAUX VIVE	CHAUX ÉTEINTE	CHAUX CALCIQUE (CL)*
Calcaire dolomitique à faible teneur en silice et alumine			CHAUX DOLOMITIQUE (DL)*

\* Désignations issues de la normalisation européenne (ENV 459-1) - NHL : Natural hydraulic lime  
- CL : Calcium lime  
- DL : Dolomitic lime

### Propriétés principales :

NHL (XHN) : appartient à l'une des classes de résistance : 30, 60 et 100. Ces classes correspondent à des résistances à la compression minimale à 28 jours et en bars.; ex. : une chaux hydraulique naturelle offrant une résistance à la compression minimale à 28 jours de 60 bars est désignée sous le symbole de XHN 60.

La masse volumique apparente du produit est comprise pour les XHN 30 entre 600 et 750 kg/m<sup>3</sup> et pour les XHN 60 et 100 entre 650 et 900 kg/m<sup>3</sup>,

La masse volumique absolue varie de 2600 à 2900 kg/m<sup>3</sup>,

La chaux hydraulique en poudre est jaune clair avec des nuances grisâtres. Elle est plus claire que les ciments et contient au moins 10 % de chaux libre. T de stockage : 6 mois.

Sa granulométrie doit être telle que le refus au tamis d'ouverture de mailles 200 µm < 10%

La surface spécifique Blaine varie entre 3000 à 8000 cm<sup>2</sup>/g

### **Utilisation dans le bâtiment :**

Les mortiers de chaux hydraulique trouvent leur application essentiellement dans le bâtiment où leurs qualités sont appréciées pour les enduits, les menus ouvrages de maçonnerie (joints, pose de carrelage) ou les travaux de restauration tels que l'exécution de moulures.

### **Enduits :**

Les nombreuses qualités de la chaux, notamment plasticité et adhérence pour les XHN, rendent son emploi très intéressant et très efficace dans la réalisation des enduits extérieurs et intérieurs. On l'utilise seule ou mélangée au ciment Portland - souvent blanc -, au ciment prompt ou à la CAEB. Les enduits bâtards (chaux + ciment), tout en étant imperméables à l'eau sont perméables à l'air, ce qui évite les murs humides

La XHN est utilisée dans la restauration des constructions anciennes et monuments historiques (mosquées, palais, remparts); ces ouvrages ont souvent été faits en utilisant de la chaux, et ce liant convient bien puisqu'il redonne à ces constructions leur aspect d'origine.

### **Badigeons :**

Les XHN conviennent bien pour la confection de badigeons qui peuvent être colorés dans la masse. Les chaux sont suffisamment fines et riches en hydroxyde de calcium pour rester en suspension aqueuse et donner un lait de chaux utilisable au moyen d'un pinceau ou d'un pulvérisateur. Leur blancheur est tout à fait satisfaisante pour cet usage.

### **Mortiers de pose et de jointement :**

La chaux hydraulique constitue un matériau de choix pour la préparation des mortiers de pose et de liaison, principalement en élévation – mortiers de chaux pure et bâtard.

Le remplissage des joints se fait parfaitement grâce à l'onctuosité du liant. Les risques de fissuration sont minimes à condition que l'épaisseur du mortier des joints réalisés soit d'au moins 10 à 15 mm.

### **Bétons de remplissage :**

Les chaux hydrauliques ne sont pas utilisables pour la réalisation de bétons destinés à supporter des charges importantes, mais elles peuvent être utilisées comme bétons de remplissage destinés par exemple à niveler le fond d'une fouille de fondation ou à constituer le support d'un carrelage, à la réalisation de murs de clôture ou encore des habitations d'un ou deux étages.

Norme franç.	Dénomination et Composition	Symbole et classe de résistance (éventuellement sous classe)	Valeurs minimales garanties des résistances à la compression ( en MPa)			Utilisation et avantages
			2 j.	7 j.	28 j.	
Ancienne norme NF P-15310  Nouvelle Norme NF P-15311	CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLES (X.H.N.) Obtenue par cuisson de calcaires mameux dont la pulvérisation résulte au moins partiellement, d'extraction (pulvérisation spontanée en présence d'eau).  Natural Hydraulic Lime (NHL)	XHN 100		50	100	Maçonnerie traditionnelle n'exigeant que des résistances mécaniques moyennes. Les mortiers de chaux hydraulique d'un mélange chaux hydraulique - ciment (mortier bâtard) ont une grande plasticité et une faible fissurabilité. Ils conviennent pour l'exécution des enduits. Certaines de ces chaux sont naturellement blanches.
		XHN 60		30	60	
		XHN 30		10	30	
Ancienne norme NF P-15312  Nouvelle Norme NF P-15311	CHAUX HYDRAULIQUE ARTIFICIELLES (X.H.A.) Au moins 40 % de clinker, le surplus étant composé d'inertes. Incorporation d'un "entraîneur d'air" pour améliorer la plasticité.  Ciment de Maçonnerie (C.M.)	XHA 100		50	100	
		XHA 60		30	60	

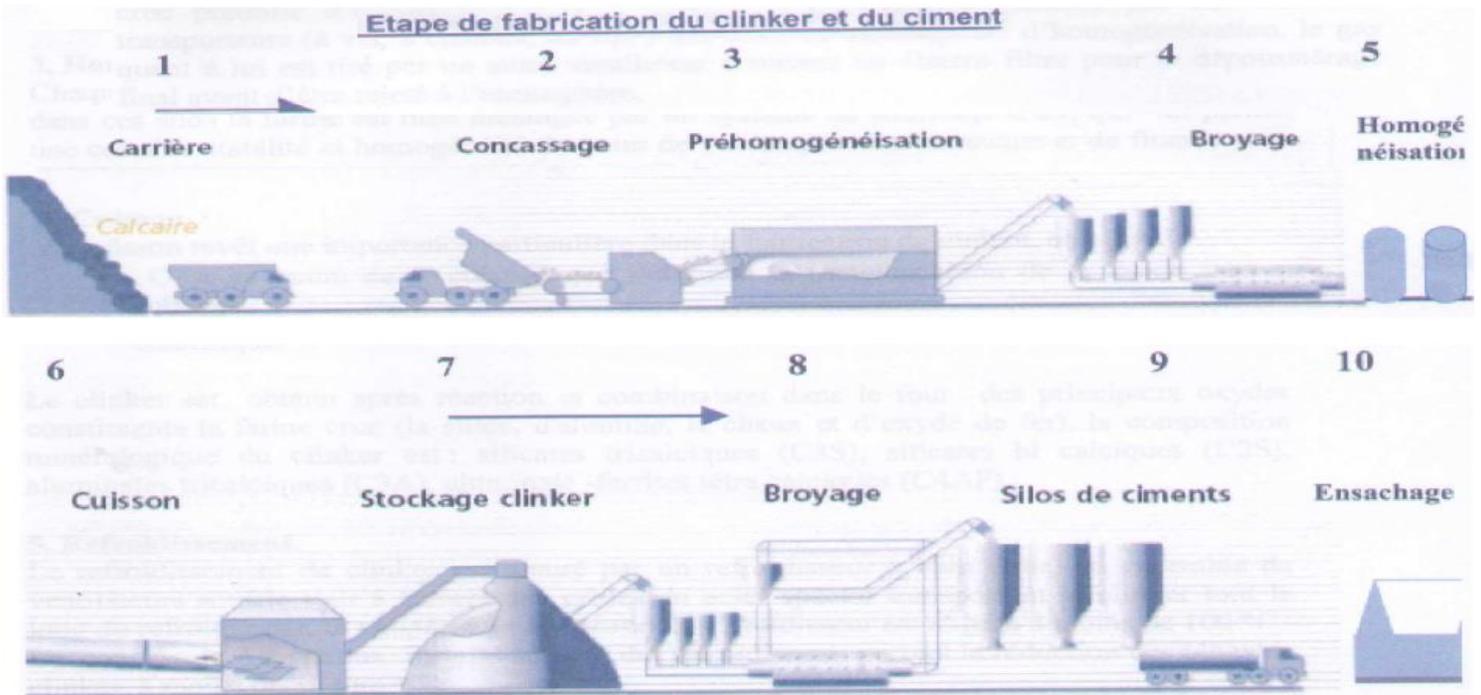
## III Le Ciment

### 1. Introduction

Le liant hydraulique est un composé complexe, dont la propriété est de durcir sous l'eau. Le ciment est un liant hydraulique très utilisé. Il donne avec l'eau une pâte qui se solidifie puis devient de plus en plus dure avec le temps. Le durcissement du ciment est principalement dû aux réactions chimiques complexes. Les ciments sont constitués des poudres fines de silicates et d'aluminates de chaux. Ils sont le résultat d'une cuisson à haute température 1450°C d'un mélange minéral constitué principalement du calcaire et d'argile.



## 2. les étapes de Fabrication du ciment



### 1) Carrière et Concassage

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont l'argile et le calcaire extraits de la carrière à ciel ouvert en générale, l'abattage du calcaire se fait à l'explosif et ripage également, l'argile est obtenue par ripage le mélange de ces deux matières subit deux opérations de concassage. Un concassage primaire qui permet de réduire la granulométrie de 1000 mm à l'entrée jusqu'à 100 mm à la sortie et un second concassage qui permet de réduire la granulométrie jusqu'à 30 mm. Le mélange est ainsi acheminé vers l'usine en suite par bande transporteuse par exemple.

### 2) Broyage

Le Broyage sèche des matières premières (mélange + les additifs) se fait par un broyeur (Vertical à galets par exemple), la matière broyée produite d'une finesse de : (85 % < à 88 microns) est acheminée par des différents transporteurs (à vis, à chaînes, air lift) aux silos de stockage et d'homogénéisation.

### 3) Homogénéisation et stockage

Ligne de fabrication est équipée de silos d'homogénéisation de la matière crue (brut), dans des silos, la farine est bien mélangée par un système de soufflage d'air, qui lui permet une certaine stabilité et homogénéité de point de vue composition chimique et de finesse et ce avant son introduction dans la tour de préchauffage et la cuisson

#### **4) Cuisson**

La cuisson revêt une importance particulière dans la fabrication du ciment, en effet

- C'est au cours de la cuisson que s'effectue la transformation de la farine crue en clinker ;
- C'est la cuisson qui détermine en grande partie les qualités du produit fini ;
- La cuisson participe d'une part importante du coût de la production du ciment ;
- La cuisson détermine d'une façon prépondérante la consommation d'énergie calorifique.

Le clinker est obtenu après réaction et combinaison dans le four des principaux oxydes constituant la farine crue (la silicates, d'alumine, la chaux et d'oxyde de fer), la composition minéralogique du clinker est : silicates tricalciques (C3S), Silicates bicalcique (C2S), aluminates tricalciques (C3A), aluminates ferrites tétra calcique (C4AF)

#### **5) Refroidissement**

Le refroidissement du clinker est assuré par un refroidisseur à bain d'air, la température à la sortie du refroidisseur est réduite à moins de 100°C . Le concasseur à marteaux installé au bout du refroidisseur permet la réduction des blocs de clinker à moins de 30 mm.

#### **6) Broyage et stockage du clinker**

Après refroidissement , le clinker et les ajouts , sont introduits dans un broyeur à boulets. Le produit issu de l'opération de broyage est le ciment , ce dernier subira par la suite une opération de classification dans un séparateur , les particules fines , et suivant la finesse désirée constitue le produit fini et sera acheminée vers des silos de stockage , les grosses particules quand à elle retourne au broyeur pour être dégrossie davantage.

Le contrôle du clinker et du ciment se fait systématiquement , on détermine par analyse chimique les principaux oxydes et la chaux libre. La qualité du ciment produit est contrôlée également par une analyse chimique et des essais physiques normalisés : surface spécifique de Blaine (SSB) , temps de prise , essais d'expansion et de retrait , résistance à la compression et à la flexion.

#### **7) Expédition**

La production est distribuée en sacs , et en vrac

## **IV Granulats**

### **IV.1. Introduction**

On appelle granulats les roches concassées, broyées ou les fragments des roches roulés dans le lit des fleuves. Dans le premier cas on parle du gravier ou de sable concassé et dans le deuxième cas on parle de sable alluvionnaire. Donc, les granulats un ensemble de grains minéraux, de dimensions inférieures à 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle. Ils sont utilisés en mélange avec le ciment pour former une pâte appelée mortier ou béton. Ils sont utilisés avec d'autres liants tels que le bitume pour réaliser des roulements des chaussées.

Les granulats sont les constituants de base de tous travaux de génie civil. Leur intérêt peut venir de deux considérations :

- De point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant, ils présentent quelque 80 % de la masse du béton et environ 75 % de son volume.

- De point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage), ils sont plus résistants que la pâte de ciment toute seule

Il est donc important de maîtriser l'ensemble des propriétés des granulats, du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations, afin de mieux maîtriser le coût tout en respectant des critères de qualité. Par conséquent, il faut augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité,
- La quantité de la pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides

Les granulats constituent trois familles essentielles : le sable d'une taille plus petite, le gravier d'une taille moyenne et le caillou d'une taille grossière. Leur différenciation s'effectue sur des critères variés à savoir :

- La taille,
- La forme,
- La résistance à la compression,
- La composition chimique,

## **IV.2. Différentes sources des granulats**

Les granulats usuellement utilisés pour la fabrication du béton ou mortier proviennent de trois sources :

1. les gisements naturels généralement des sites terrestres ou aquatiques où on extrait des sables dits alluvionnaires. La forme de ce type de granulats est arrondie d'où l'appellation « **granulats roulés** ».

2. les carrières où les roches massives sont concassées pour obtenir le gravier, dit « **granulats concassés** ».

3. la fabrication particulière pour obtenir des sables artificiels à partir d'une pâte moulée et recuite.

## **IV.3. Différents types de granulats**

Les granulats regroupent les trois familles : sable, gravier et cailloux. Ils forment le squelette du béton ou du mortier avec l'eau et le liant hydraulique. La taille des grains des sables varie entre 0,05 mm pour le sable très fin à 1,6 mm pour le sable très grossier. En général, le sable de concassage est dédié à la réalisation des bétons spéciaux. Ce type de sable est caractérisé par un grand pourcentage de grains fins (de 5 % à 20 %). En revanche, le sable alluvionnaire contient moins de grains fins. Concernant le gravier, la taille des grains varie entre (2 mm - 4 mm) pour le gravier très fin et 40 mm pour le gravier très grossier. Souvent la notion G1 et G2 sont utilisées pour faire la différence entre deux tailles de gravier.

## **IV.4. La production des granulats**

Avant l'utilisation dans les chantiers, les granulats passent par les étapes suivantes :

- 1) L'extraction de la matière première,
- 2) Le concassage dans le cas du gravier et le sable artificiel uniquement,
- 3) Le criblage ou tamisage,
- 4) Le stockage,

Le criblage est une opération principale pour sélectionner les grains. Pour les granulats concassés, le criblage se fait généralement à sec. Dans le cas des granulats alluvionnaires, l'opération combine entre le tamisage et le lavage. Elle se fait sous un courant d'eau. Le lavage permet d'obtenir des granulats propres. La propreté des granulats est une nécessité industrielle

## IV.5. Différentes analyses des granulats

### IV.5.1. Analyse granulométrique

La granularité est la répartition des grains d'un ensemble de granulat suivant leur dimension. Pour connaître cette répartition, on procède à une analyse granulométrique. Cette méthode consiste à tamiser les granulats sur une série de tamis ou passoires. Le refus et le tamisât de chaque tamis sont pesés. On trace ensuite la courbe granulométrique qui représente la distribution exacte de la taille des grains « mélange » de granulat. La courbe obtenue donne le pourcentage cumulé en poids de passant (ou refus) en fonction de la dimension de la maille des tamis ou des passoires. Dans la plupart des pays, on utilise les tamis et de moins en moins les passoires. La différence entre les deux instruments réside dans le fait que dans le premier les orifices sont des mailles carrées, tandis que dans le deuxième, les orifices sont des trous ronds.

Le diamètre des mailles de tamis ( $D_{\text{tamis}}$ ) et le diamètre des trous de passoire ( $D_p$ ) sont reliés par la relation suivante :

$$D_p = \sqrt[10]{10} D_{\text{tamis}} \approx 1,25 D_{\text{tamis}}$$

Soit on utilise le diamètre du tamis (passoire) ou bien le module selon la relation suivante :

**Le module algébrique arrondi** est le produit par 10, arrondi à l'entier le plus proche, du logarithme décimal de la dimension exprimée en micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Soit :

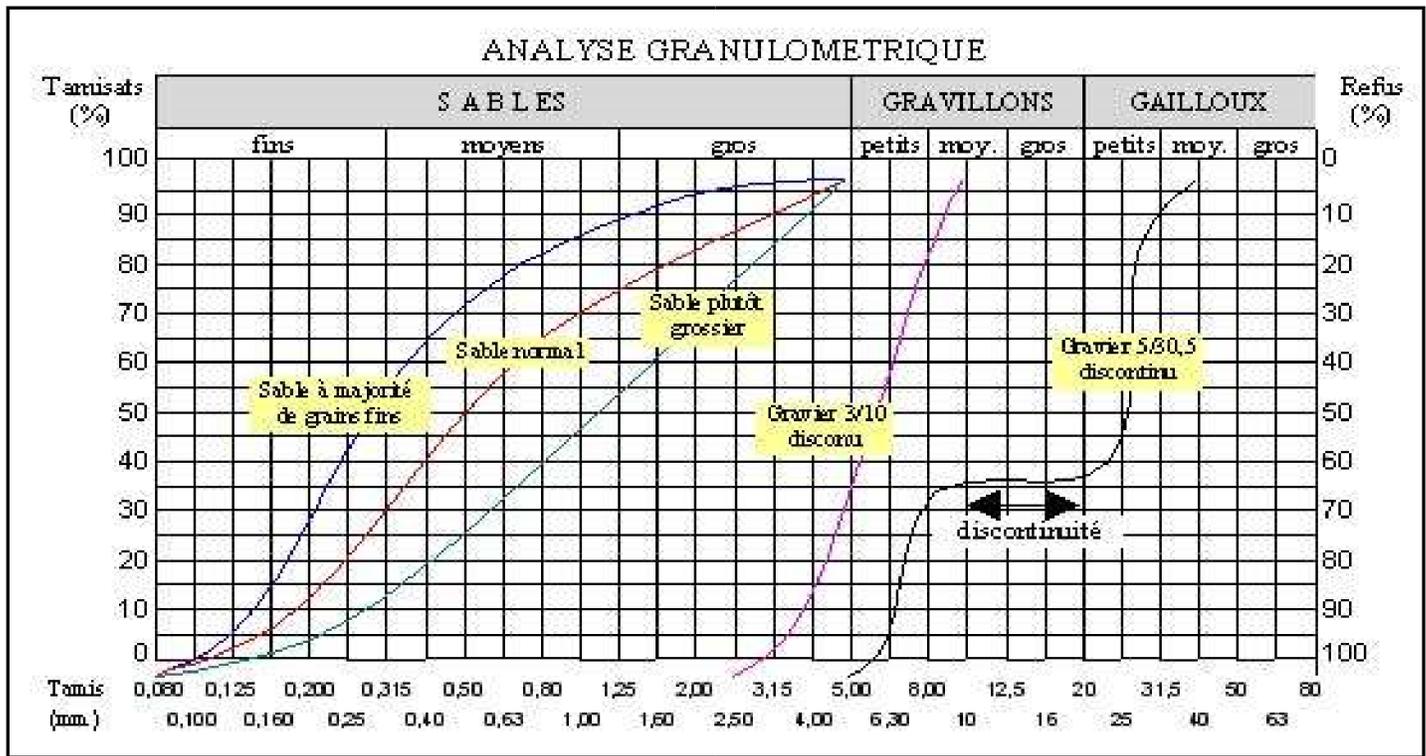
-  $D_n(\mu\text{m})$  est le diamètre de tamis, « le module  $M_n$  » est « **Le module algébrique arrondi** » + 1

$$M_n = 10 \log D_n + 1$$

-  $D_p(\mu\text{m})$  est le diamètre de passoire, « le module  $M_n$  » est **Le module algébrique arrondi** »

$$M_n = 10 \log D_p$$

La figure ci-dessous présente une courbe type de granulométrie :



*Fig : La courbe granulométrique dans différents cas.*

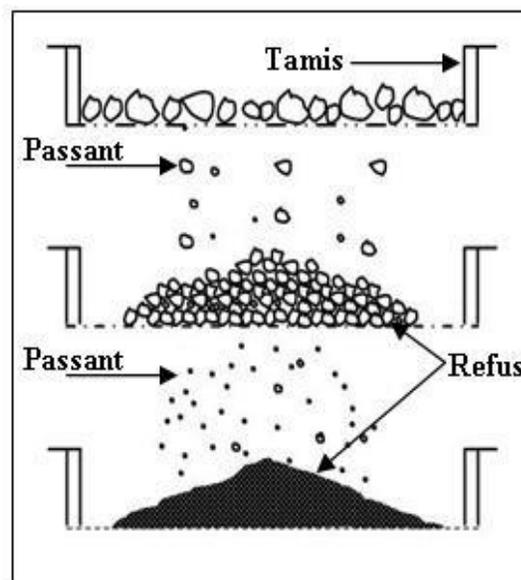
La figure ci-dessous montre les tamis utilisés au laboratoire pour faire l'étude granulométrique :



*Figure : Photos d'une série de tamis avec une tamiseuse électronique.*

Selon la norme NF. P/18-560, pour procéder à une analyse granulométrique, on prend une masse  $m_0$  située entre 200D et 600D (avec D est le diamètre du plus grand grain).

Cette masse  $m_0$  est tamisé sur un tamis de diamètre  $80\ \mu\text{m}$  (dans le cas de sable) et  $500\ \mu\text{m}$  (dans le cas de gravillon), sous un courant d'eau (pour éliminer les particules fins), après séchage des granulats dans l'étuve ( $105^\circ\text{C}$  pendant 24 h), la masse  $m_1$  est la masse des granulats séchés. À l'aide d'une colonne de tamis (figure 2), dont ces derniers sont par ordre croissante en diamètre de bas en haut, on verse la masse  $m_1$  des granulats (sables ou gravier) au sommet de la colonne et on ferme, puis on règle la vitesse de secousses (20 à 30 par second), et la durée de tamisage (15 à 20 mn), à la fin on récupère au niveau de chaque tamis une fraction appelée refus qu'il faudra cumulée. La représentation de tamisât (%) en fonction de diamètre (mm) donne la courbe granulométrique (voir figure ci-dessous).



**Fig 5 : Représentation de Refus et de Passant.**

Pour la définition des classes granulaires par tamisage concernant les sables, les dimensions recommandées (en mm) sont les suivantes : 8,00/ 6,30/ 5,00/ 2,50/ 1,25/ 0,63/ 0,315/ 0,160/ 0,080. Pour la définition des classes granulaires par tamisage concernant les graviers, les dimensions recommandées (en mm) sont dans le tableau ci-dessous :

Type des Tamis	Dimension en (mm)
Tamis en maille carrés	80,00/ 63,00/ 50,00/ 40,00/ 31,50/ 25,00/ 20,00/ 16,00/ 12,50/ 10,00/ 8,00/ 6,30/ 5,00/ 3,15/ 0,50
Grilles à fentes parallèles d'écartement (D/1.58)	31,50/ 25,00/ 20,00/ 16,00/ 12,50/ 10,00/ 8,00/ 6,30/ 5,00/ 4,00/ 3,15/ 2,50

**Tableau : Les dimensions recommandées pour l'étude granulométriques des graviers.**

La courbe granulométrique représente la répartition exacte de la taille des grains du mélange de granulats (granulométrie).

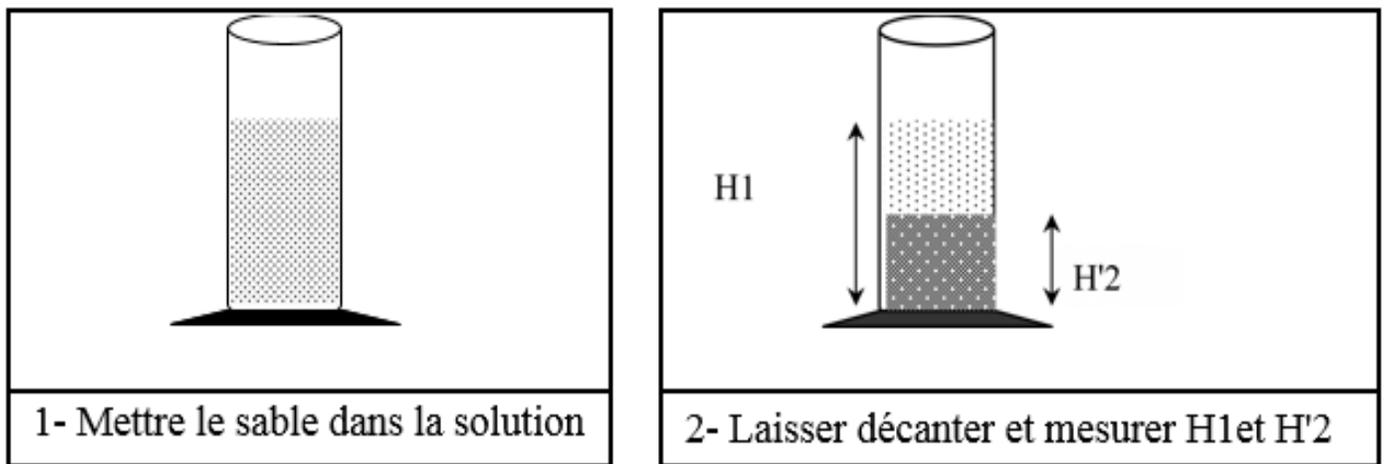
Les granulats sont classés en catégories selon leurs dimensions (classe granulaire). Le tableau ci-dessous présente une classification des granulats selon la norme AFNOR :

<b>Maille des Tamis NFX 11-501 AFNOR en mm</b>	<b>Classe granulométrique</b>		<b>Classe Pétrographique</b>
4000 / 1000 / 250	<b>Bloc</b>		<b>RUDITES</b>
125 / 100 / 80 / 63 / 50	<b>Galet : Caillou</b>		
40 / 31,5	Gravier très grossier	<b>G R A V I E R</b>	
25,0 / 20,0	Gravier grossier		
16,0 / 12,5 / 10,0 / 8,0	Gravier moyen		
6,3 / 5,0	Gravier fin		
4,0 / 3,15 / 2,50 / 2,00	Gravier très fin		
1,60 / 1,25 / 1,00	Sable très grossier		<b>S A B L E</b>
0,80 / 0,63 / 0,50	Sable grossier		
0,40 / 0,315 / 0,250	Sable moyen		
0,200 / 0,160 / 0,125	Sable fin		
0,100 / 0,080 / 0,063 / 0,050	Sable très fin		
0,010 / 0,031	Limon grossier	<b>S I L T</b>	<b>LUTITES</b>
0,026 / 0,020	Limon moyen		
0,016 / 0,0125 / 0,0100	Limon fin		
0,0080 / 0,0063 / 0,0050	Limon très fin		
0,0040 / 0,0020			
0,00100 / 0,00025	Argile		

**Tableau IV : Classification des granulats suivant leurs dimensions.**

## IV.5.2. Équivalent de sable

La propreté de sable est souvent évaluée par l'essai appelé « *équivalent de sable* ». L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers par une solution flocculante. L'équivalent de sable exprime un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux non flocculant qui sédimentent dans le fond des éprouvettes et les éléments fins formant le floculat, qui restent en suspension dans la solution. La solution flocculante contient 111g/480g/12g respectivement en Chlorure de calcium anhydre, glycérine et en formaldéhyde dissous dans 40 l d'eau distillée. La figure suivante schématise les étapes suivies pour faire la mesure de l'équivalent de sable.



*Figure: Mesure de l'équivalent de sable visuel.*

L'essai est effectué sur un poids de sable bien défini de fraction 0/5. Si un tamisage est nécessaire, il doit se faire par voie humide pour ne pas perdre d'éléments fins. Après la décantation pendant 20 min environ on mesure les hauteurs H1 et H'2. Les hauteurs sont mesurées de deux manières, soit visuel et on parle de l'équivalent de sable visuel (ESV) ou par piston et dans ce cas, c'est l'équivalent de sable par piston (ES) qu'on mesure.

La formule donnée pour le calcul de l'équivalent de sable est la suivante :

$$ESV = 100 \times \frac{H'2}{H1}$$

**H1** : étant la hauteur contenant le sable propre et les éléments fins en suspension.

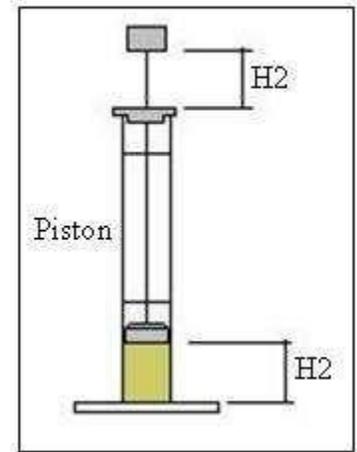
**H'2** : étant la hauteur du sable propre uniquement.

Dans le cas des sols par exemple, la mesure de H'2 peut être délicate. Dans ce cas on substitue l'essai visuel par l'essai au piston (voir figure 6-b). La valeur de H2 est mesurée à l'aide d'un piston qu'on fonce dans l'éprouvette jusqu'au niveau supérieur du sédiment. L'équivalent de sable mesuré par piston est alors :

$$ES = 100 \times \frac{H2}{H1}$$

Le test de mesure de l'équivalent de sable est connu par délicatesse et il est recommandé que le test doit être suivi de près.

Le sable peut être classé dans quatre familles selon la valeur de l'équivalent de sable :



- **ES < 65** : Sable argileux qui peut provoquer un risque de retrait ou de gonflement. Ce type de sable ne doit pas être utilisé pour le béton de qualité. Pour améliorer la propreté de ce type de sable, un lavage doit être effectué avant utilisation.

- **65 < Es < 75** : Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante.

- **75 < Es < 85** : Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses. Un tel sable est utilisé pour le béton de haute qualité.

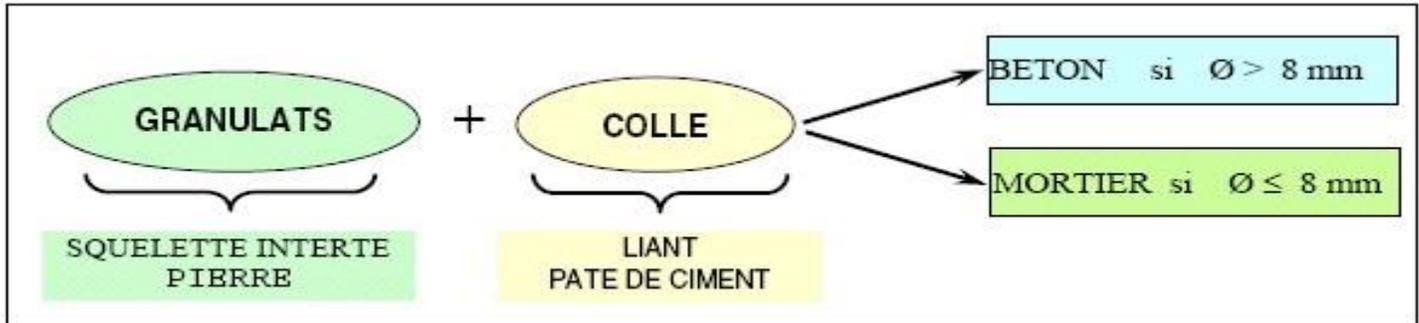
- **Es > 85** : Sable très propre, l'absence presque totale des fines argileuses : risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau. Ce type de sable peut être utilisé en béton de qualité à haute résistance et en béton exceptionnel.

Les fines de nature siliceuse ou calcaire provenant par exemple du broyage, dite "*fines inertes*" ne présentent pas ou peu d'effets néfastes pour la qualité du béton si leur quantité est bien entendu limitée. En revanche, des fines de nature argileuse dite "*fines actives*", à cause de leur surface spécifique interne élevée peuvent entraîner des effets secondaires importants même si leur teneur dans les sables est faible.

## V. Le Béton

### V.1. Introduction

Le mortier-béton est obtenu par le mélange des constituants suivants : granulats, liant hydraulique, eau et éventuellement des adjuvants. La figure ci-dessous montre la différence entre le mortier et le béton.



**Figure : La différence entre le béton et le mortier.**

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. La pâte de ciment est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Le tableau ci-dessous présente l'ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
En volume (%)	14 - 22	1 - 6	7 - 14	60 - 78
En poids (%)	5 - 9		9 - 18	63 - 85

**Tableau : La composition des constituants d'un béton courant en poids et en volume.**

## V.2. Les divers stades de fabrication et de vie du béton

Constituants d'un béton :

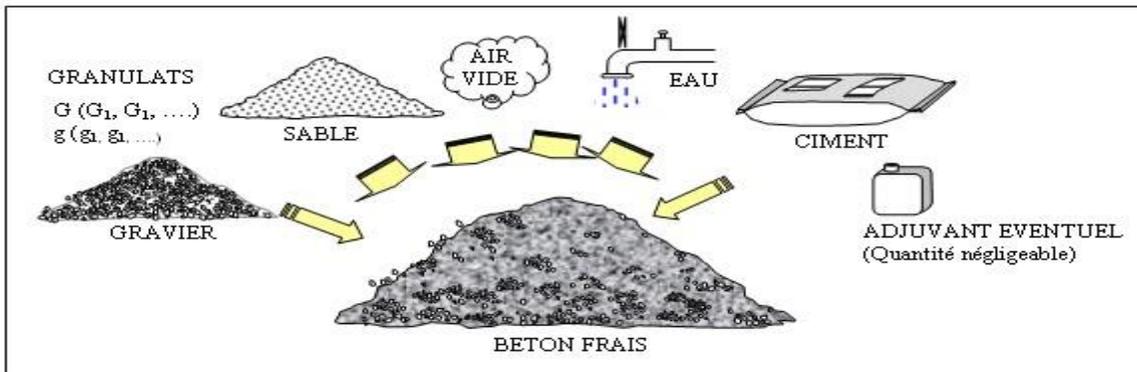


Figure : Les constituants du béton (fabrication du béton frais).

Mise en œuvre :

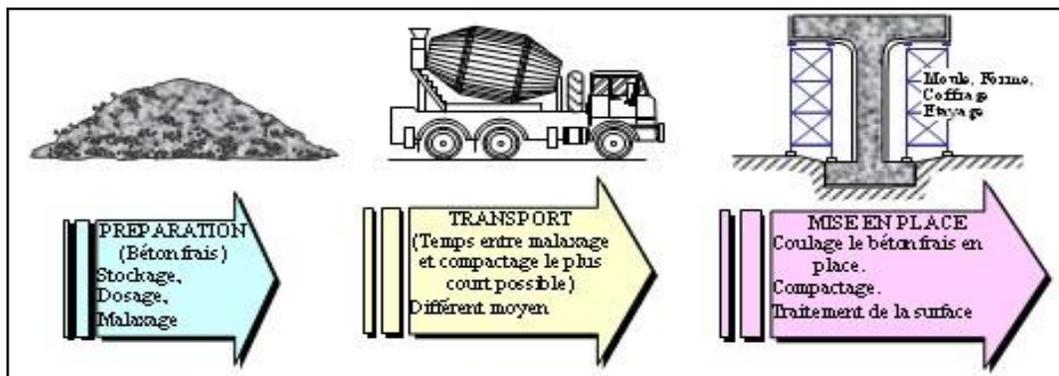
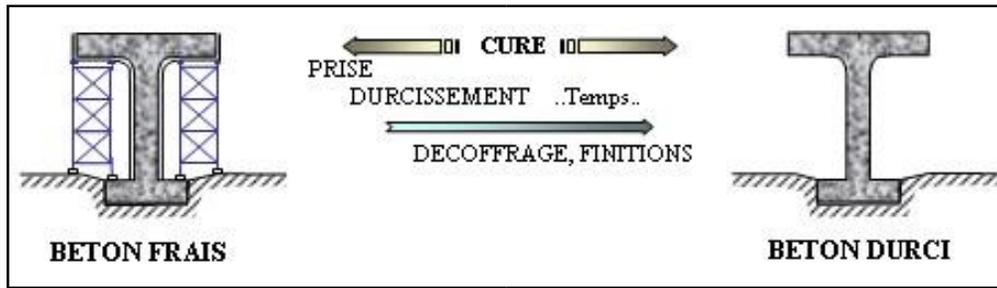


Figure : Transport et mise en place le béton frais.

- Mode et durée de mélange : dans tous les cas, le béton est mélangé environ 1 à 2 min, mais son transport s'effectue de 5 min à 2 h, d'où des contraintes différentes.
- Le Béton Prêt à l'Emploi (BPE) : le besoin de maintien d'ouvrabilité est nécessaire car le transport en toupie peut être long. Le besoin de résistances mécaniques est nécessaire au décoffrage (16 h à 24 h).
- Le béton en Préfabrication : le besoin de maintien d'ouvrabilité est faible car le coulage s'effectue en général dans les 15 à 30 min. En revanche, le besoin de performances mécaniques est très élevé à jeune âge, de 6 h à 15 h en général, il est associé parfois à un étuvage.
- Le béton sur chantier : situation combinée des 2 exemples précédents.

Toutes les opérations de mise en œuvre sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène.

## ***Durcissement :***

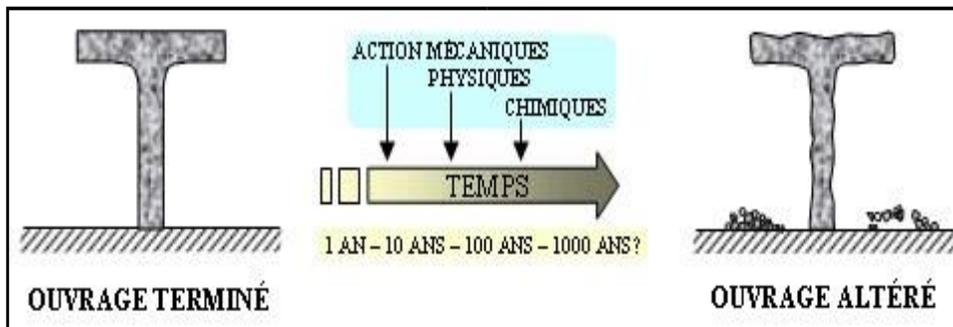


*Durcissement du béton.*

La condition favorable pour le durcissement d'un béton est :

- L'humidité,
- La température supérieure à 00 °C,
- Le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

Vieillessement :



## **Détermination, exploitation et destruction.**

Pour être durable, un béton doit :

- Être bien composé.
- Correctement mis en œuvre.
- Protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

### V.3. Formulation du Béton

#### Principe fondamental

Formuler un béton consiste à intégrer des paramètres essentiels tels que :

- La qualité des matériaux disponibles,
- La nature du projet à réaliser,
- Les moyens de mise en œuvre disponibles sur le site,
- La qualité de l'environnement dans lequel va "vivre" l'ouvrage à réaliser,
- Les conditions de mise en œuvre (besoin d'ouvrabilité, résistance à jeune âge, ...),
- Les conditions climatiques (température, hygrométrie, vent, etc.),
- Les délais de réalisation.

En vue de satisfaire aux objectifs :

- De durabilité,
- D'esthétique,
- De résistances mécaniques,
- D'étanchéité,
- D'isolation thermique (été comme hiver),
- D'isolation phonique,
- Environnementaux (développement durable)

### V.4. Classification du béton

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général, le béton peut être classé en quatre groupes, selon la masse volumique  $\rho$  :

Béton très lourd :  $\rho > 2500 \text{ kg/m}^3$ ,

Béton lourd (béton courant) :  $1800 \leq \rho \leq 2500 \text{ kg/m}^3$ ,

Béton léger :  $500 \leq \rho \leq 1800 \text{ kg/m}^3$ ,

Béton très léger :  $\rho < 500 \text{ kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

#### V.4.1. Béton de terre

La désignation « béton de terre » est récente, ce matériau est plus connu sous les termes traditionnels de pisé ou de torchis.

Les matériaux de base d'un béton de terre sont : l'argile (la plus pure est le Kaolin), sable, gravier, eau. Grâce à sa cohésion interne, l'argile joue le rôle de liant, le gravier et le sable sont le squelette interne, l'eau est le lubrifiant. Le béton de terre n'a cependant pas de résistance mécanique suffisante pour autoriser des applications structurales.

L'argile, qui est susceptible de présenter des variations de volume en cas de modification de la teneur en eau, peut être stabilisée par adjonction de ciment Portland, chaux, d'armatures végétales (paille sèche coupée, chanvre, sisal, fibres de feuilles de palmier, copeaux de bois, écorces), par adjonction d'asphalte, d'huile de coco, etc., pour assurer l'imperméabilisation, par traitement chimique (chaux, urine de bestiaux, etc.)

Le béton de terre est mis en œuvre dans les techniques de torchis (sur pan de bois et clayonnage ou dans la technique du pisé), de bauge, de brique de terre crue (ou adobe) ou dans les briques moulées mécaniquement

#### **V.4.2. Béton de chaux**

Dans le cas du béton de chaux, c'est la chaux hydraulique qui sert de liant. Ce type de béton est notamment utilisé pour réaliser des dalles.

#### **V.4.3. Béton bitumineux**

Le béton bitumineux (aussi appelé enrobé bitumineux) est composé de différentes fractions de gravillons, de sable, de filler et de bitume employé comme liant. Il constitue généralement la couche supérieure des chaussées (couche de roulement). L'enrobé est fabriqué dans des usines appelées « centrales à enrobés », fixes ou mobiles, utilisant un procédé de fabrication continu ou par gâchées. Il est mis en œuvre à chaud (150 °C environ) à l'aide de machines appelées « finisseurs » qui permettent de le répandre en couches d'épaisseur désirée. L'effet de « prise » apparaît dès le refroidissement (< 90 °C), aussi est-il nécessaire de compacter le béton bitumineux avant refroidissement en le soumettant au passage répété des « rouleaux compacteurs ». Contrairement au béton de ciment, il est utilisable presque immédiatement après sa mise en œuvre. Le bitume étant un dérivé pétrolier, le béton bitumineux est sensible aux hydrocarbures perdus par les automobiles. Dans les lieux exposés (stations-services) on remplace le bitume par du goudron.

#### **V.4.4. Béton de ciment**

Le béton de ciment, couramment appelé « béton », est un mélange de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants.

## Dénomination particulière des bétons de ciment

- Béton Armé : matériau composite, composé d'une armature en acier recouverte de béton ;
- Béton extrudé : en technique routière, le béton extrudé est un béton coulé en place à l'aide de machines à coffrages glissants, dénommées machines à extruder ou extrudeuses. Il permet de réaliser des murets de sécurité, des bordures et des dispositifs de retenue sur des linéaires importants ;
- Béton projeté ou gunité : béton propulsé, après malaxage, sur un support sous forme de jet ;
- Béton autoplaçant : béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène ;
- Béton cellulaire : bloc isolant réalisé en autoclave ;
- Béton cyclopéen : béton contenant des gros blocs de pierre, des moellons, des galets, etc. ;
- Béton hautes performances : béton caractérisé par une très forte résistance à la compression ;
- Béton translucide : matériau de construction en béton ayant la propriété de transmettre la lumière due à des éléments optiques intégrés ;
- Bloc de béton : élément de maçonnerie moulé ;
- Béton désactivé : nom donné à un béton dont la surface laisse apparaître les granulats de couleur. Il est obtenu par pulvérisation d'un désactivant sur la surface fraîche d'un béton au moment de son coulage. Ensuite, une fois séché, un rinçage à haute pression de la surface fait apparaître les granulats

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

**a)** Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de l'ordre de  $2300 \text{ kg/m}^3$  environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, et précontraints.

**b)** Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre  $6000 \text{ Kg/m}^3$  servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.

c) Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes ou les ponts.

d) Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de 500 Kg/m<sup>3</sup>. Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.

e) Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

Les bétons peuvent être classés en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau ci-dessous. Dans ce tableau  $f_{ckcyl}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres,  $f_{ckcube}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cubes. Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées. (**Tableau Classes de résistance du béton**)

Classe	<u>C12/15</u>	<u>C16/20</u>	<u>C20/25</u>	<u>C25/30</u>	<u>C30/37</u>	<u>C35/45</u>	<u>C40/50</u>	<u>C45/55</u>	<u>C50/60</u>
$f_{ckcyl}$ (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ckcube}$ (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

## **V.5. Principaux avantages et inconvénients du béton :**

### **V.5.1. Avantage du béton :**

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires.
- Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

## V.5.2. Inconvénients du béton

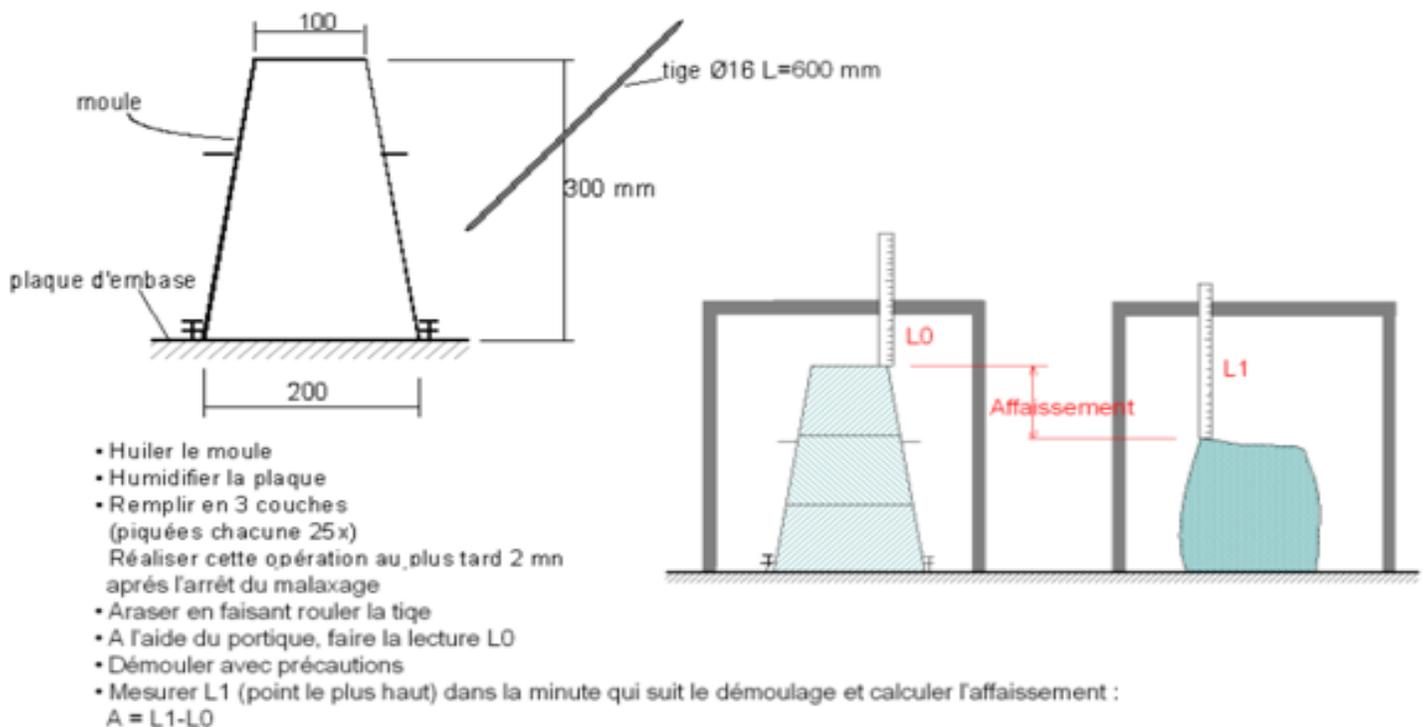
Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation),
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux),
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification.

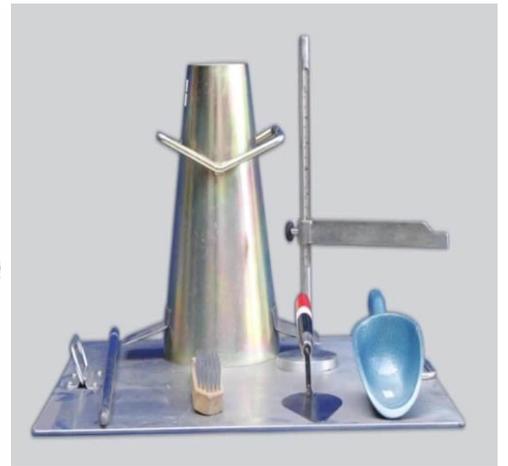
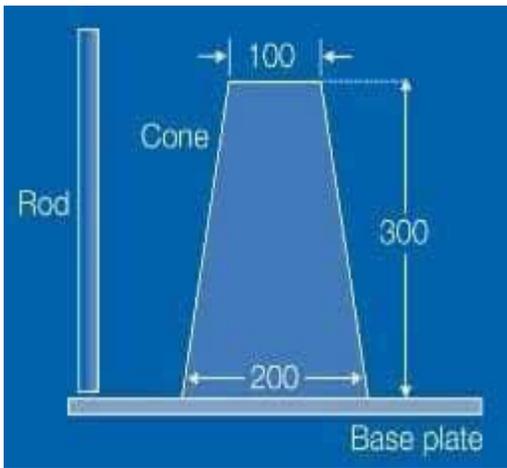
## V.6.ESSAI

### V.6.1. Essai au cône D'ABRAMS

Cet essai, consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais.



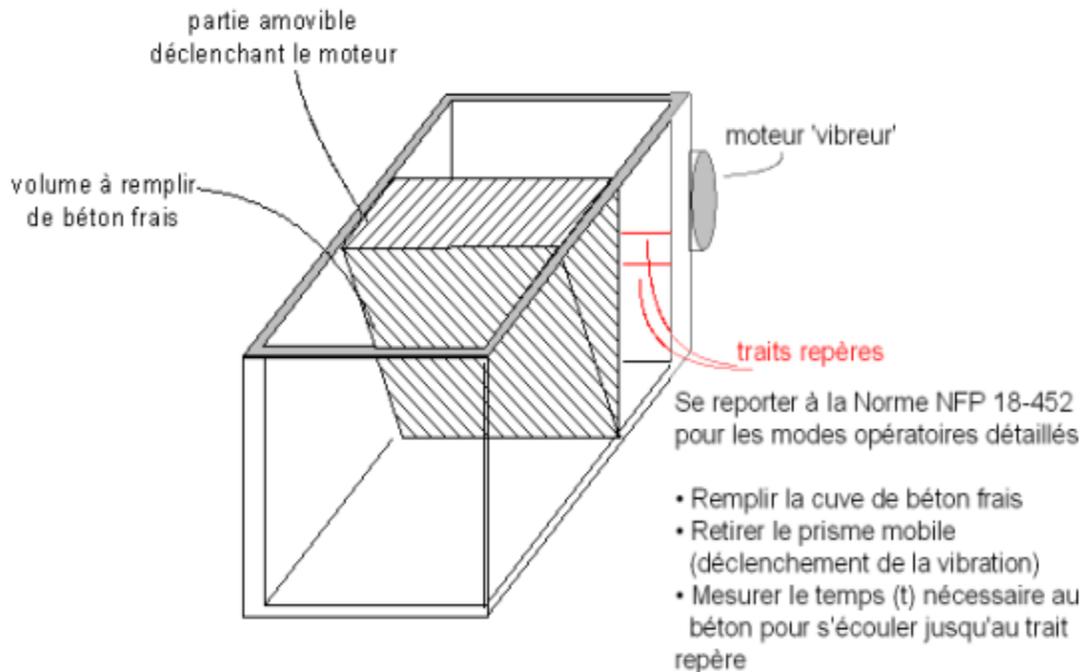
ENV 206		NFP 18-305 et fascicule 65A CCTG		
Consistance	Affaissement (mm)	Consistance	Affaissement (cm)	tolérances
S <sub>1</sub>	10 à 40	Ferme (F)	0 à 4	± 1 cm
S <sub>2</sub>	50 à 90	Plastique (P)	5 à 9	± 2 cm
S <sub>3</sub>	100 à 150	Très Plastique (TP)	10 à 15	± 3 cm
S <sub>4</sub>	160 à 210	Fluide (F)	≥ 16	
S <sub>5</sub>	≥ 220			



## V.6.2. ESSAI D'ÉCOULEMENT AU MANIABILIMÈTRE LCPC

NFP 18-452

Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement nécessaire à un volume de béton soumis à des vibrations pour atteindre un repère donné. Une partie de la cuve étant remplie avec du béton, le soulèvement paroi mobile permet de déclencher la mise en vibration de l'ensemble de l'appareil.

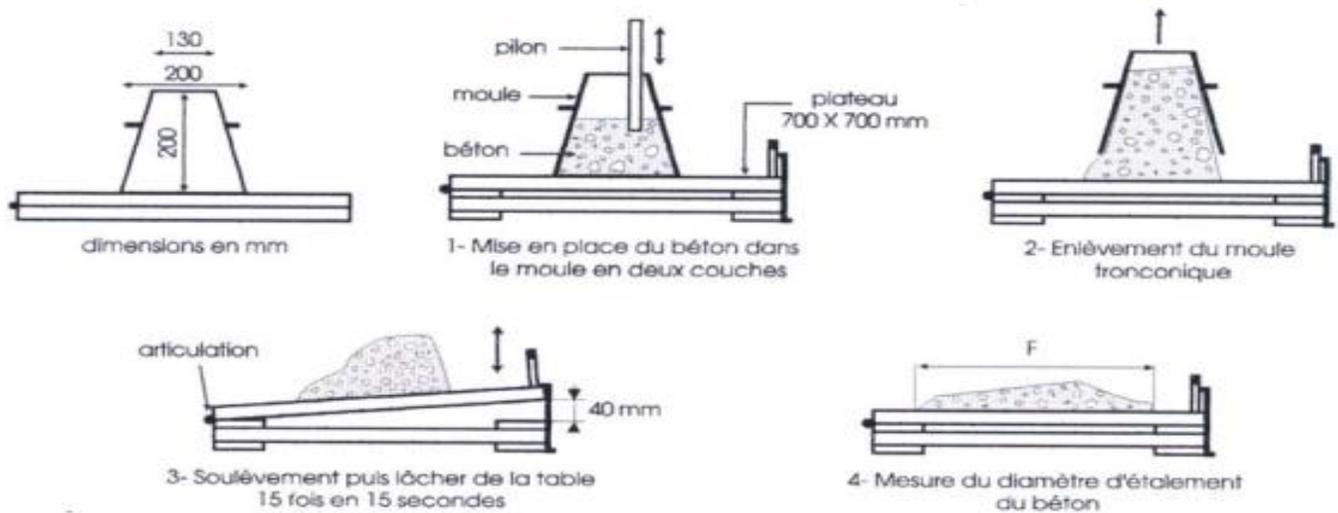


classe de consistance	durée (en s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très Plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

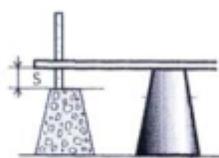
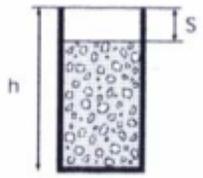
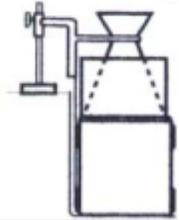
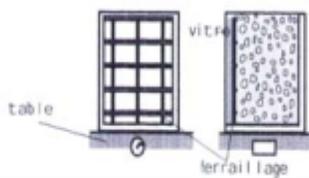
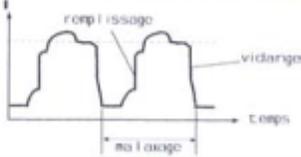
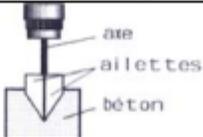
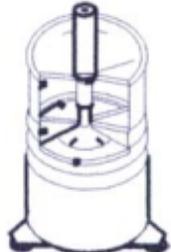
### V.6.3. ESSAI D'ETALEMENT

#### PREN 12350-5

Cet essai simple à réaliser, est très utilisé pour apprécier la consistance des bétons fluides (surtout en Allemagne). Il n'est pas adapté pour les bétons fermes et la dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm. La consistance du béton est estimée par l'étalement d'un cône (moule tronconique de 200 mm de haut, de diamètre 200 mm à sa base et 130 mm à sa partie supérieure) de béton démoulé sur une table à chocs. Ce cône de béton est soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé fluide. Le moule tronconique placé au centre du plateau carré est rempli par 2 couches de béton, compacté par 10 coups de pilon. Après arasement le moule est retiré verticalement. Puis le plateau est soulevé de 40 mm jusqu'à la butée et relâché immédiatement 15 fois de suite en 15 secondes.



classe de consistance	diamètre d'étalement (mm)
F <sub>1</sub>	≤ 340
F <sub>2</sub>	350 à 410
F <sub>3</sub>	420 à 480
F <sub>4</sub>	490 à 550
F <sub>5</sub>	560 à 620
F <sub>6</sub>	≥ 630

essais	principe	paramètre mesuré	schéma	plages recommandées de mesures	commentaires
<b>Essai d'affaissement</b>  NFP 18-451 prEN 12350-2	Moulage d'un tronc de cône de dimensions normalisés et mesure après démoulage de son affaissement.	Affaissement  (S)		$20 \leq S \leq 160 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>mal adapté aux bétons fermes ou fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 40 \text{ mm}</math></li> <li>répétabilité juste suffisante</li> </ul>
<b>Essai d'étalement</b>  prEN 12350-5	Démoulage d'un cône sur une table à chocs manuels et mesure de l'étalement.	Diamètre d'étalement  (F)		$340 \leq F \leq 380 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>mal adapté aux bétons fermes ou très fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 40 \text{ mm}</math></li> <li>répétabilité juste suffisante</li> </ul>
<b>Degré de compactabilité</b>  prEN 12350-4	Evaluation du degré de compactabilité exprimé par le rapport entre un volume de béton avant et après compactage.	Taux (C) $C = \frac{h_1}{h_1 - S}$ $h_1 = 400 \text{ mm}$		$C \geq 1.11$	<ul style="list-style-type: none"> <li>mal adapté aux bétons fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 40 \text{ mm}</math></li> </ul>
<b>Essai Vébé</b>  prEN 12350-5	Mesure du temps mis par un cône de béton frais pour se remouler dans un moule cylindrique sous l'action d'une vibration	durée  (t)		$5 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>mal adapté aux bétons fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 40 \text{ mm}</math></li> </ul>
<b>Essai d'écoulement (maniabilimètre)</b>  NFP 18-452	Mesure du temps d'écoulement sous vibration	durée  (t)		$4 \text{ s} \leq t \leq 100 \text{ s}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>non adapté aux bétons fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 40 \text{ mm}</math></li> <li>bonne répétabilité</li> </ul>
<b>Test C.E.S</b>  G. Dreux	Remplissage de béton dans un moule muni d'un quadrillage d'armatures distant d'une plaque transparente. Mesure du nombre de chocs nécessaires à recouvrir la vitre.	choc  (N)			<ul style="list-style-type: none"> <li>peu utilisé sauf au Centre d'Essais des Structures (CSTB)</li> </ul>
<b>Wattmètre</b>	Appréciation de la consistance par enregistrement de la puissance absorbée du malaxeur.	puissance  (Watt)			<ul style="list-style-type: none"> <li>sur certaines installations industrielles</li> </ul>
<b>Plasticimètre à rotations</b>	Evaluation de la résistance au cisaillement d'un béton par la mesure d'un couple.	viscosité			<ul style="list-style-type: none"> <li>peu utilisé car très mauvaise répétabilité</li> </ul>
<b>BT Rhéom</b>  LCPC (F. de Larrard)	Cisaillement d'un échantillon de béton pour diverses vitesses de rotation, sous l'action d'une vibration ou non. Contrôle de l'essai et exploitation des mesures via une centrale d'acquisition	seuil de cisaillement et viscosité			<ul style="list-style-type: none"> <li>bien adapté aux bétons fluides</li> <li><math>D_{\max} &lt; 25 \text{ mm}</math></li> <li>essai d'avenir ...</li> </ul>