

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Relizane Faculté des Sciences et Technologies Département de Génie
Civil et Travaux Publics



Polycopié de cours et travaux pratiques

Matériaux de construction 2

3^{ème} Année Licence

Génie Civil

Dr. Salhi Mohamed

Année Universitaire 2023/2024

PREFACE

Le présent polycopié, intitulé « *Cours et Travaux Pratiques : Matériaux de Construction 2* », s'adresse aux étudiants de troisième année du système LMD en Génie Civil. Après avoir acquis des notions de base sur certains matériaux de construction en deuxième année, il est indispensable pour l'étudiant d'approfondir ses connaissances et, en particulier, de se familiariser avec un matériau clé dans le domaine du génie civil : le béton.

Ce document aborde les principaux chapitres du programme, notamment : le béton, les céramiques, les métaux ferreux et non ferreux, ainsi que les verres. Il propose également des procédures expérimentales essentielles pour effectuer des essais permettant d'évaluer la qualité des bétons et mortiers.

Le contenu de ce polycopié est basé sur des normes françaises et complété par des références issues de divers ouvrages spécialisés.

SOMMAIRE

Table des matières

Chapitre I : Le Béton	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre II : Produits Céramiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre III : Métaux Ferreux et non Ferreux	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre IV : Le Verre	Erreur ! Signet non défini.
TP Matériaux de construction 2	Erreur ! Signet non défini.
1. Les composants du béton.....	9
1.1 Les ciments	9
1.1.1 Constituants principaux.....	9
1.1.2 Clinker.....	9
2. Principe de fabrication des ciments courants	11
2.1 Extraction.....	11
2.2 Concassage	11
2.3 Préparation du cru.....	11
2.4 Préhomogénéisation	12
2.5 broyage-séchage	12
2.6 Homogénéisation	12
2.7 Cuisson.....	12
2.8 Refroidissement	13
2.9 Broyage.....	13
2.10 Stockage et expédition	13
3. Équations de bogue (1955).....	13
4. Hydratation du ciment	14
4.1 Hydratation de C_3S	15
4.2 Hydratation de C_2S	15

4.3 Hydratation de C ₃ A et C ₄ AF	16
5. Différents types de ciment courants	17
Désignation.....	17
5.1 Utilisations des ciments.....	18
5.2 Ajouts cimentaire	19
5.2.1 Avantages des ajouts cimentaires	19
5.2.2 Classification des ajouts cimentaires.....	20
6. Eau de gâchage.....	22
7. Les Adjuvants.....	23
7.1Généralités	23
7.2 Les Catégories d'adjuvants suivant la Norme NF EN 934-2.....	23
7.2.1Plastifiants Réducteurs d'eau	24
7.2.2 Superplastifiants Haut réducteurs d'eau.....	24
7.2.3Accélérateurs de prise.....	26
7.2.4 Accélérateurs de durcissement.....	26
7.2.5 Retardateurs de prise	26
7.2.6 Hydrofuges de masse	27
7.2.7Entraîneurs d'air	27
8.Propriétés du béton à l'état frais	28
8.1. Béton frais	28
8.2. Mesure de l'ouvrabilité du béton.....	28
8.3. Ségrégation du béton	28
8.4. Ressuage du béton	29
8.5. Retrait plastique	30
8.6. Influence de la composition.....	30
8.7. Fabrication et mise en œuvre	31
8.7.1. Préparation.....	31
8.7.2 Fabrication en centrale.....	31
8.7.3 Fabrication en bétonnière	31
8.7.4 Transport	31
8.8. Mise en œuvre.....	32
8.8.1. L'approvisionnement du béton	32
8.8.2La mise en place du béton.....	32

8.8.3 La vibration du béton	33
8.9 Le bétonnage par temps chaud ou par temps froid.....	33
8.9.1 Vibration	33
8.9.2 Rôle de la vibration.....	33
8.9.3 Matériels de vibration	34
8.9.4 Règles de la vibration.....	34
8.9.5 Cure du béton.....	34
8.9.6 Rôle de la cure	34
9. Propriétés du béton au jeune âge	35
9.1 Introduction.....	35
9.2 Prise et durcissement	35
9.3 Degré d'hydratation	36
9.4 Evolution de la résistance à la compression.....	37
9.4.1 Facteurs influençant l'évolution de la résistance à la compression.....	37
9.4.2 Influence des conditions de conservation.....	37
9.5 Notions de maturité et d'âge équivalent	38
10. Bétons spéciaux.....	40
10.1 Béton à haute performance (BHP)	40
10.1.1 Domaine d'application	40
10.1.2 Avantages	40
10.1.3 Caractéristiques.....	41
10.1.4 Eléments de formulation.....	41
10.2 Béton Autoplaçant.....	41
10.2.1 Domaine d'application	42
10.2.2 Avantages	42
10.2.3 Eléments de formulation.....	43
10.2.4 Essais de caractérisation de BAP	43
10.3 Béton à ultra hautes performances (BUHP)	46
10.3.1 Domaine d'application	46
10.3.2 Avantages/Caractères généraux	46
10.3.3 Eléments de formulation.....	47
10.4 Bétons de granulats légers	47
10.4.1 Définition	47

10.4.2 Composition des bétons légers	48
10.5 Bétons lourds.....	48
10.5.1 Définition	48
10.5.2 Domaines d'applications	48
10.6 Bétons réfractaires	48
10.7 Béton Projeté.....	49
10.7.1 Définition	49
10.7.2 Domaines d'utilisation.....	49
10.7.3 Avantages	49
10.7.4 Composition	49
11. Matériaux céramique	50
11.1 Définition	50
11.2 Classification.....	51
11.3 Fabrication.....	52
11.3.1 Gisement, extraction	52
11.3.2 Préparation des terres.....	52
11.3.3 Façonnage des produits	52
11.3.4. Séchage.....	53
11.3.5 Cuisson.....	54
11.4 Propriétés générales des céramiques	54
11.4.1 Retrait à l'air	55
12. Matériaux ferreux et non ferreux	56
12.1 Introduction.....	56
12.2 Applications	56
12.3 Métaux Ferreux	57
12.3.1. Les aciers	57
12.3.2 La fonte.....	57
12.3.3 Le fer pur	57
12.3.4 Aciers Inoxydables.....	57
12.3.5 Utilisation	59
12.4 Métaux non ferreux.....	62
12.4.1 ALUMINIUM	62
12. 4. 2 CUIVRE	62

12.4.3 ZINC	62
12.4.4 LAITON.....	62
12.5 Propriétés des Métaux	63
12.5.1 Propriétés physiques	63
12.5.2 Module d'élasticité longitudinal.....	64
12.5.3 Coefficient de Poisson	64
13.1 Introduction.....	66
13.2 Structure du verre	66
13.2.1 Oxydes formateurs	67
13.2.2 Oxydes modificateurs.....	67
13.3 Propriétés des verres.....	67
13.3.1 Les propriétés optiques du Verre	68
13.3.2 propriétés mécaniques du Verre.....	68
13.3.3 propriétés chimiques du verre	68
13.3.4 propriétés thermiques du Verre.....	69
13.4 Fabrication des verres	70
13.4.1 Etapes de la fabrication d'un verre sodocalcique	70
13.4.2 Traitements thermiques des verres	70
13.4.3 Trempe	70
13.4.4 trempe thermique	70
13.4.5 trempe chimique	70
13.5 Différents types des verres.....	70
13.6 Utilisations des verres	71
14.1 But de l'essai.....	73
14.1.1 Principe de l'essai	73
14.1.2 Equipement nécessaire	73
14.1.3 Conduite de l'essai.....	74
14.1.4 Préparation de l'échantillon	74
14.1.5 Expression des résultats	75
14.1.6 Module de finesse MF	76
14.2 TP N°2 Méthode pratique pour la composition du béton (DREUX-GORISSE).....	77
14.2.1 Données de base	77
14.3 TP N°3 Confection et essais sur mortier.....	89

14.3.1 Définition	89
14.3.2 composition du mortier.....	89
14.3.3 Mortiers fabriqués sur chantier	91
14.3.4 Mortier industriel	91
14.3.5 Caractéristiques principales du mortier	91
14.3.6 Confection du mortier	91
14.3.7 Matériel utilisé.....	91
14.3.8 Mode d'opérateur	92
14.3.9 essais sur mortier frais	92
14.3.10 essais sur mortier durci	95
14.4.TP N°4 : Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams SLUMP TEST (NF P 18-451)	96
14.4.1 Principe de l'essai	96
14.4.2 Classes d'affaissement	97
14.5.TPN°5 Essai d'écrasement sur béton.....	98
14.5.1 Mesure de la résistance à la compression	98
14.5.2 Principe de l'essai	98
14.5.3 Surfaçage des éprouvettes	98
14.6.TPN° 6 Essais non destructifs	101
14.6.1 Essai au sclérométrique.....	101
14.6.2 Essai d'auscultation sonore NFP 18- 418.....	102
15.BIBLIOGRPHIE	103

1. Les composants du béton

Les ciments-les granulats- l'eau de gâchage- les adjuvants

Le béton, mélange de plusieurs composants très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes, présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants.

Une fois connues les propriétés et particularités des différents composants, la troisième partie traitera des méthodes de composition des bétons permettant de calculer les dosages de chacun de ces composants à mettre en œuvre pour obtenir 1 m³ réel de béton capable de répondre aux spécifications de qualité fixées en fonction des différents paramètres en présence, telles résistances mécaniques, conditions de mise en œuvre.

1.1 Les ciments

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

1.1.1 Constituants principaux

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

Du calcaire-du laitier de haut fourneau- cendre volante- pouzzolane naturelle- fumée de silice, dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit des raisons des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.

1.1.2 Clinker

Le clinker, obtenu à la sortie du four à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire (CaCO₃), d'argile (silice-alumine- fer) et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- Silicate tricalcique ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) ou C_3S .
- Silicate bicalcique ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) ou C_2S .
- Aluminate tricalcique C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$).
- Alumino-ferrite tétracalcique C_4AF ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Le ciment Portland (CPA= CEMI) contient au moins 95% de clinker. Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont en moyenne de :

50 à 70% pour le C_3S ;

5 à 25% pour le C_2S ;

2 à 12% pour le C_3A ;

0 à 15% pour le C_4AF

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases.

- ✓ Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide, cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.
- ✓ Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme.
- ✓ Le C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées, elle contribue essentiellement à la prise de pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est facilement attaquée par les sulfates.
- ✓ Le C_4AF forme une solution solide de C_2A et C_2F , réagit moins vite que C_3A , son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment, cette phase donne le couleur grise de ciment.

En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

- ✓ De la chaux libre (n'est pas combiné) dont le pourcentage ne doit pas dépasser 2% dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

- ✓ De l'oxyde de magnésium MgO , qui peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

2. Principe de fabrication des ciments courants

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20%.

Le calcaire apporte le calcium, l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde de fer Fe_2O_3 , nécessaire au processus de formation de clinker.

Ces matières premières contiennent d'autres éléments, tel de la magnésie MgO , des alcalis K_2O et Na_2O .

La fabrication de ciment comporte les étapes suivantes :

2.1 Extraction

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières à ciel ouvert, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateur avant d'être transportée par des camions.

2.2 Concassage

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières, le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50 -100 mm au maximum.

2.3 Préparation du cru

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leur composition chimique particulières, le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes est de l'ordre de :

- 65% de CaO fourchette de 60 à 69%
- 21% de SiO_2 fourchette de 18 à 24%
- 6% d' Al_2O_3 fourchette de 4 à 8%
- 2% MgO fourchette de 0 à 5%
- 1% d'alcalis fourchette de 0 à 2%

- 1% de SO₃ fourchette de 0 à 3%

La préparation du cru peut être réalisée suivant deux procédés différents :

- La voie sèche, la plus généralement utilisée en Algérie dont nous résumons les phases aux paragraphes ci-dessous.
- La voie humide, pratiquement abandonnée parce que grande consommatrice d'énergie et consiste à préparer une pâte, qui est ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevée.

La fabrication par voie sèche comporte les phases suivantes :

2.4 Préhomogénéisation

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitifs cru en couches successives, de faible épaisseur.

2.5 broyage-séchage

Le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grain inférieurs à 160 microns.

2.6 Homogénéisation

C'est au cours obtenu un produit parfaitement homogène, de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit.

2.7 Cuisson

Réalisé dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5m de diamètre et de 80 à 100m de longueur dans les procédés par voie sèche, à une température comprise entre 1400 et 1500°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle de du traitement comportant les phases suivantes :

- Evaporation de l'eau à 100°C très faible, de l'ordre de 1% ;
- Départ de l'eau combinée à l'argile à 450°C ;
- La décarbonatation du calcaire qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

- Combinaison de la chaux obtenue avec l'argile, complète à 1450°C pour obtenir les silicates tri et bicalcique, l'aluminate de chaux et l'alumino-ferrite de chaux C₂S, C₃S, C₃A, C₄AF qui constituent le clinker.

2.8 Refroidissement

Cette opération a pour but d'abaisser la température de clinker à environ 50-250°C à la sortie du four. Cette opération a une influence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C₃S en C₂S qui entraîne une baisse des résistances.

2.9 Broyage

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler la prise), ainsi l'ajout des autres constituants (calcaire, pouzzolane, laitier...) ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

2.10 Stockage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac

3. Équations de bogue (1955)

C'est à partir du pourcentage de la composition chimique on détermine la composition minéralogique des éléments qui compose le ciment (C₂S, C₃S..), au moyen d'équations de bogue (1955), Les équations de bogue sont les suivantes :

Si $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0.64$

$$\%C_3S = (4.071x\%CaO) - (7.600x\%SiO_2) - (6.718x\%Al_2O_3) - (1.430x\%Fe_2O_3) - (2.852x\%SO_3)$$

$$\%C_2S = (2.876x\%SiO_2) - (0.7544x\%C_3S)$$

$$\%C_3A = (2.650x\%Al_2O_3) - (1.692x\%Fe_2O_3)$$

$$\%C_4AF = (3.043x\%Fe_2O_3)$$

Si $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.64$

$$\%C3S = 4.071x\%CaO - 7.600x\%SiO_2 - 4.479x\%Al_2O_3 - 2.859x\%Fe_2O_3 - 2.852x\%SO_3$$

$$\%C2S = 2.867x\%SiO_2 - 0.7544x\%C3S$$

$$\%C3A = 0$$

$$\%C4AF = 2.100x\%Al_2O_3 + 1.702x\%Fe_2O_3$$

Exemple:

Étant donné la composition d'oxyde suivante d'un clinker de ciment portland.

$$CaO=64.9\% \quad SiO_2=22.2\%$$

$$Al_2O_3=5.8\% \quad Fe_2O_3=3.1\% \quad SO_3=0,74\%$$

En utilisant les équations de Bogue calculé la composition minéralogique du clinker

$$C_3S=50.02 \%$$

$$C_2S=2.876*22.2-0.7544*52.1=26.13\%$$

$$C_3A=2.65*5.8-1.692*3.1=10.13\%$$

$$C_4AF=3.043*3.1=9.4\%$$

Pour voir l'effet de la modification de la composition chimique des oxydes sur la variation de la composition minéralogique, supposons que CaO est de 63,9% et que SiO₂ est de 23,2% et que les autres oxydes sont identiques.

$$C_3S=38,4\% , C_2S=37,7\% , C_3A=10\% , C_4AF=9.4\%$$

$$C_3S \text{ changé de } 52.1\% \rightarrow 40.4\%$$

$$C_2S \text{ changé de } 24.5\% \rightarrow 36.2\%$$

Un changement de 1% dans la composition chimique du CaO & SiO₂ implique un changement de plus de 10% dans la composition minéralogique du C₃S & C₂S.

4.Hydratation du ciment

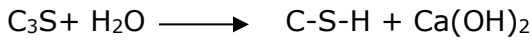
Le ciment portland possède des propriétés hydrauliques. Les réactions d'hydratation des 4 phases de ciment Portland se passent en même temps et contribuent avec une intensité différente au dégagement de chaleur du ciment.

4.1 Hydratation de C₃S

Le C₃S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à 1 année.

La formule complète de C₃S est : 3CaO.SiO₂

Au contact avec l'eau



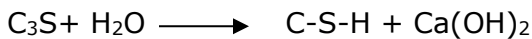
Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou Portlandite (CH).

4.2 Hydratation de C₂S

La vitesse d'hydratation de b-C₂S est beaucoup plus faible que celle du C₃S. Le b-C₂S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours et dégage une très faible chaleur.

La formule complète de C₂S est : 2CaOSiO₂

Au contact avec l'eau :



Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou Portlandite (CH).

La quantité de CH produite dans ce cas est plus faible d'un tiers que dans le cas du C₃S. La faible quantité de CH va favoriser le développement de meilleures résistances que dans le cas du C₃S

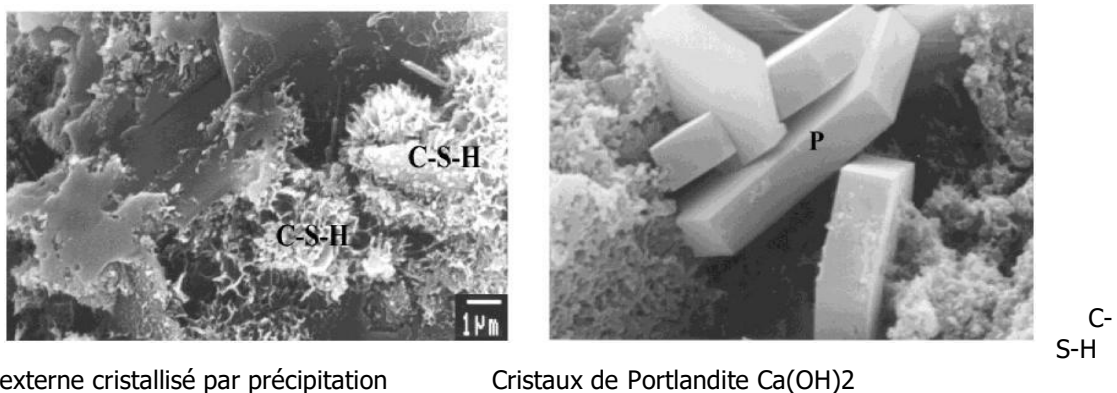


Figure 1 : Produits d'hydratation vus au MEB

4.3 Hydratation de C₃A et C₄AF

La réaction du C₃A avec l'eau est très violente et exothermique, et si rien ne l'empêche, elle causera une prise éclair. C'est pour cette raison que du gypse soit additionné au clinker broyé pour retarder cette réaction. Il réagit avec le C₃A et l'eau pour former des sulfoaluminates de calcium hydraté qui sont insolubles. Le C₃A a une influence sur la prise initiale de la pâte, mais passée cette étape il influence peu le comportement de la pâte sauf en cas d'attaque par les sulfates. Il contribue peu à la résistance de la pâte.

La formule complète de C₃A est : 3CaOAl₂O₃

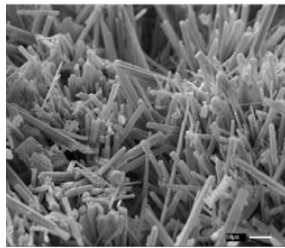
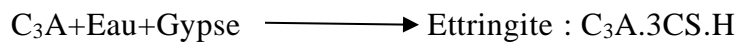


Figure 2 : PHOTO MEB : Ettringite primaire

5. Différents types de ciment courants

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme, le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments normalisés.

Tableau. I Classe des ciments selon la norme NF. EN. 197-1

Désignation	Types de ciments	Teneur en Clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier – pouzzolanes – cendres – calcaires- schistes - fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA- CEM I	Ciment Portland	95à 100%		0à 5%
CPJ –CEM II/ A	Ciment Portland	80à 94%	- de 6 à 20 de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 %	0à 5%
CPJ-CEM II/B	Composé	65à 79%	-de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus .	0à 5%

CHF-CEM III/A		35à 64%	-36à 64 % de laitier de haut fourneau .	0à 5%
CHF-CEM III/B	Ciment de haut-fourneau	20à 34%	-66à 80 % de laitier de haut fourneau.	0à 5%
CLK-CEM III/C		5à 19%	-81à 95 % de laitier de haut fourneau	0à 5%
CPZ – CEM IV/A	Ciment Pouzzolaniques	65à 90%	-10à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%	0à5%
CPZ - CEM IV/B		45à 64%	-36 à 55 % comme ci- dessus	0à 5%
CLC - CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40à 64%	-18à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0à 5%
CLC – CEM V/ B		20à 39%	-31à50 % de chacun des 2 constituants comme ci – dessus	0à 5%

5.1 Utilisations des ciments

CIMENT	Usages
CEMI	<p>Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué.</p> <p>Béton précontraint. Décoffrage rapide, mise en service rapide</p> <p>Bétonnage jusqu'à une température extérieure entre 5 et 10° C.</p> <p>Béton étuvé ou auto-étuvé.</p>
CEM II / A ou B	<p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés</p> <p>CEM II/A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple).</p> <p>Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.</p> <p>Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.</p> <p>Dallages, sols industriels.</p> <p>Maçonneries.</p> <p>Stabilisation des sols.</p>

<p>CEM III / A, B ou C CEM V / A ou B</p>	<p>Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égout, eaux industrielles...).</p> <p>Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments utilisés sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15-319.</p> <p>Travaux à la mer : les ciments utilisés sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317.</p> <p>Bétons de masse. Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations). Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation. Stabilisation des sols.</p>
---	---

5.2 Ajouts cimentaire

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelquefois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique (voir la figure 3.5).



Figure 3 : Ajouts cimentaire

5.2.1 Avantages des ajouts cimentaires

- **Avantages fonctionnels**
 - Amélioration de la maniabilité et la réduction de la demande en eau ;
 - Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton ;
 - Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton ;

- **Avantages économiques**

- Le coût des ajouts minéraux des sous-produits industriels est souvent égal au coût du transport et de la manipulation ;
- Réduction de la consommation d'énergie, ce qui réduit le prix du ciment.

- **Avantages écologiques**

- Diminution de l'émission du CO₂ dégagée par l'industrie cimentaire.
- Elimination des sous-produits de la nature.

5.2.2 Classification des ajouts cimentaires

Selon la norme **ENV 206**, il existe deux types d'addition :

- a- Les additions de type I :** Ce sont des matériaux quasiment inertes, spécialement sélectionnées qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau...). Parmi ces additifs on distingue le calcaire et la poussière ;
- Fillers :** les fillers sont des produits obtenus par broyage de certaines roches (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, ...). Ces produits agissent grâce à une granulométrie appropriée sur certaines qualités du ciment. Les roches dures, comme le quartz, produisent généralement des particules plus anguleuses, dont la demande en eau est supérieure à celle demandée par les fillers calcaires. Les fillers présentent une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker. Cet effet n'est cependant notable qu'aux jeunes âges. A long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant.
- Additions calcaires :** le calcaire (CaCO₃) appartient aux roches carbonatées riches en chaux (CaO). Il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire comme ajout en remplacement du gypse (EL-Alfi, 2000). Les deux principales caractéristiques du calcaire normalisé sont :
 - La teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) supérieure ou égale à 75 % en masse ;
 - Une valeur faible de l'indice d'activité.
- b- Les additions de type II :** Ce sont des matériaux finement broyés pouzzolanique. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés. Parmi ces additifs on distingue la fumée de silice, le laitier, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

- **Pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits d'origine volcanique, présentant des propriétés pouzzolanique, elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et oxyde de fer.

- **Laitier de haut fourneau**

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidir par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium (CaO) dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de la silice entre 25 et 30%, de l'alumine entre 12 et 30% et d'autres oxydes en très faibles quantités.

- **Cendre volante**

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, provienne du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques, du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent en deux catégories qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO, selon la norme ASTM C 618-94 (1995) :

- Classe F : les cendres volantes contenant moins de 10 % de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux ;

- Classe C : les cendres volantes contenant entre 15 % et 35 % de CaO produit de la combustion du lignite ;

- **Les fumées de silice**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines (100 fois plus petites que les grains de ciment), ayant une très haute teneur en silice amorphe (au moins 85% de silice réactive). Leur très grande finesse (20 m²/g) provoque, dans le béton frais, une agglomération importante, ou l'utilisation des super plastifiants est impératif pour dé flocler cette agglomération. On restaure ainsi une partie de la finesse originelle des particules, qui ont alors la capacité de se déplacer dans les interstices des grains de ciment, diminuant la demande en eau du mélange (effet filler) lors de l'hydratation, le processus Pouzzolanique prend place, avec une intensité et une cinétique très grande à celle que l'on rencontre en présence des cendres volantes. La proportion de fumée de silice dans le ciment est limitée à 10 % en masse, selon NA 442 et EN 197-1.

- **Métakaolin**

le méta kaolin est obtenu par calcination d'argile kaolinitique à une température comprise entre 650 et 850 °C, suivie d'un broyage permettant d'atteindre une finesse très élevée. La formation du métakaolin est

sensiblement influencée, par la présence d'impuretés ou par l'état de cristallisation du minéral de départ. Le matériau obtenu présente une pouzzolanité élevée et peut être considéré comme une addition très active.

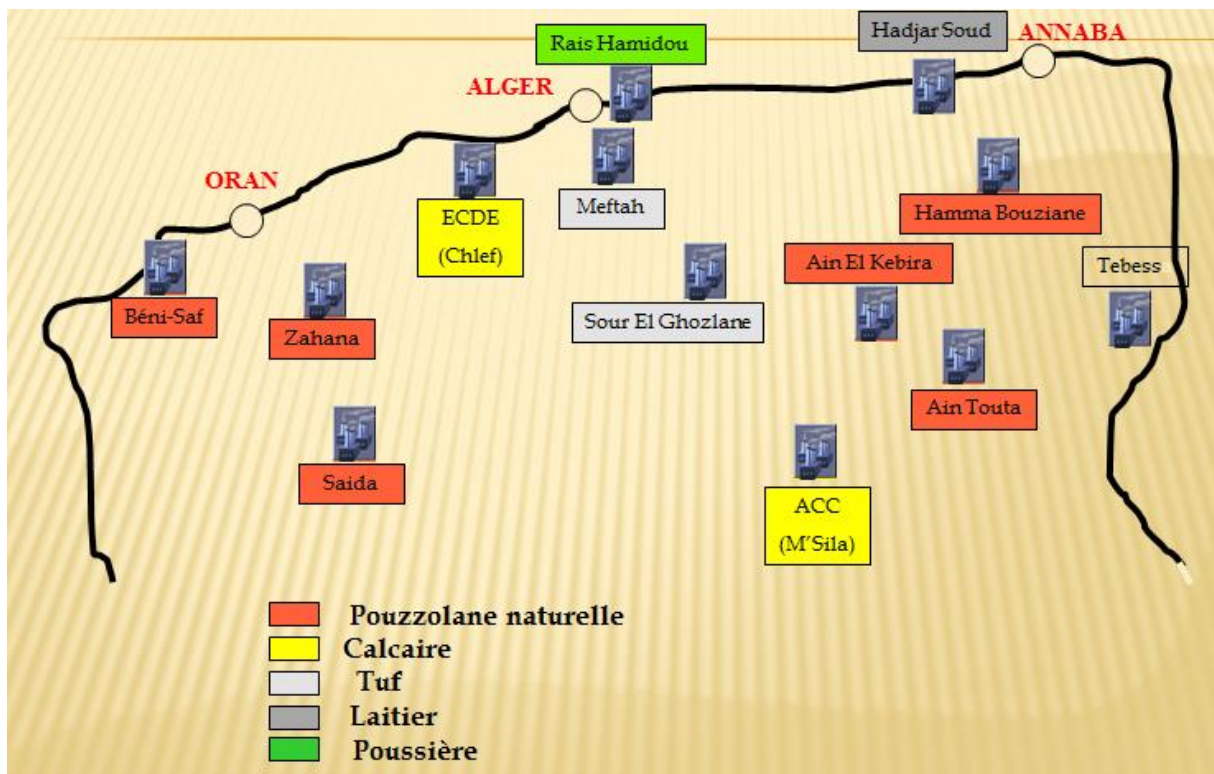


Figure 4 : Implantation des cimenteries en Algérie

6. Eau de gâchage

Seule l'eau potable peut être reconnue pour la fabrication du béton.

L'eau de mer est interdite pour les bétons armés et précontraints.

Toutes les eaux usées, de rejets industriels, de ruissellements doivent faire l'objet d'un contrôle selon la norme NF.

La teneur en chlorure dans l'eau ne doit jamais excéder 500 mg/litre

Les sels de divers nature (NaCl-CaCl2...) leur action sont corrosive sur les armatures, et qui provoque en outre une accélération du phénomène de prise, la quantité de chlorure dans l'eau doit être ajoutée aux autres possibilités d'introduction de chlorure dans le béton (chlorure des adjuvants, de certain sable d'origine marine) pour rester dans les valeurs limites.

Son rôle :

- Permettre l'hydratation de la pâte de ciment

- Mouiller la surface des granulats pour que la pâte de ciment puisse y adhérer.
- Favoriser la maniabilité du béton (essai slump-test, par exemple).
- Un rapport important dans la formulation le rapport : Eau/ciment influence sur la résistance- porosité- retrait.

Exemple : E/C=0.6 à éviter

E/C=0.5 béton courant

E/C=0.3 BHP OU BUHP

7. Les Adjuvants

7.1 Généralités

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % en masse du poids de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule. Un adjuvant peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.

7.2 Les Catégories d'adjuvants suivant la Norme NF EN 934-2

Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton

- Plastifiants-Réducteurs d'eau
- Superplastifiants - Haut réducteurs d'eau

Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton

- Accélérateurs de prise
- Accélérateurs de durcissement
- Retardateurs de prise

Autres catégories normalisées d'adjuvants

- Hydrofuges de masse
- Entraîneurs d'air

7.2.1 Plastifiants Réducteurs d'eau

Adjuvants qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement / l'étalement, ou qui produisent les deux effets à la fois.

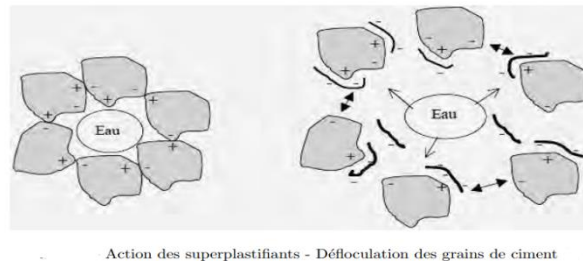


Figure 5 : Effet du plastifiant sur les grains de ciment

Effets sur le béton frais

- Amélioration de l'ouvrabilité.
- Maintien dans le temps.
- Diminution du ressuage.
- Diminution de la ségrégation.
- Amélioration de la pompabilité des bétons.
- Réduction du retrait hydraulique.

Effets sur le béton durci

- Amélioration des performances mécaniques à court et à long terme.
- Diminution de la porosité.
- Augmentation de la durabilité.
- Amélioration de la cohésion ciment/granulats.
- Amélioration de l'adhérence acier/béton.

7.2.2 Superplastifiants Haut réducteurs d'eau

Adjuvants qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement / l'étalement, ou qui produisent les deux effets à la fois.

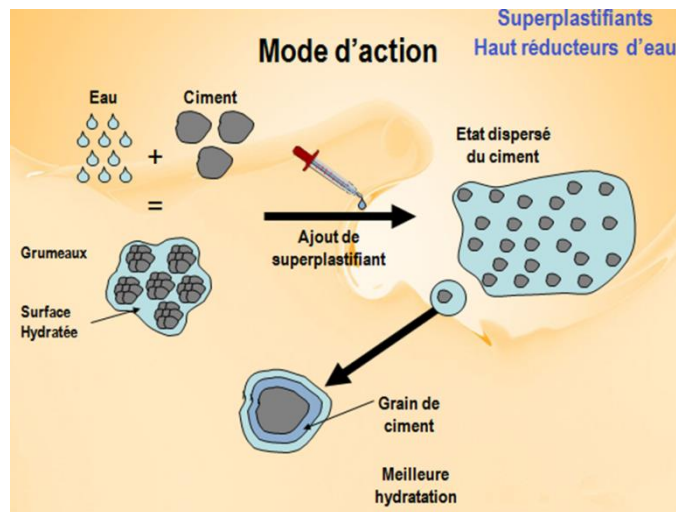


Figure 6 : superplastifiant haut réducteur d'eau

Effets sur le béton frais

- Diminution de la teneur en eau.
- Amélioration de l'ouvrabilité.
- Maintien de l'ouvrabilité dans le temps (jusqu'à 2h30 – 3h00 à 20°C).
- Diminution du ressuage.
- Diminution de la ségrégation.
- Amélioration de la pompabilité des bétons.
- Réduction du retrait hydraulique.

Effets sur le béton durci

- Amélioration des résistances mécaniques à court et long terme.
- Diminution du retrait (due à la réduction du rapport E/C et à l'augmentation du rapport Granulat/Ciment).
- Amélioration de la compacité.
- Amélioration de la liaison béton / acier.
- Réduction de la porosité capillaire de la pâte de ciment.
- Diminution du coefficient de la perméabilité.

7.2.3 Accélérateurs de prise

Adjuvants qui diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

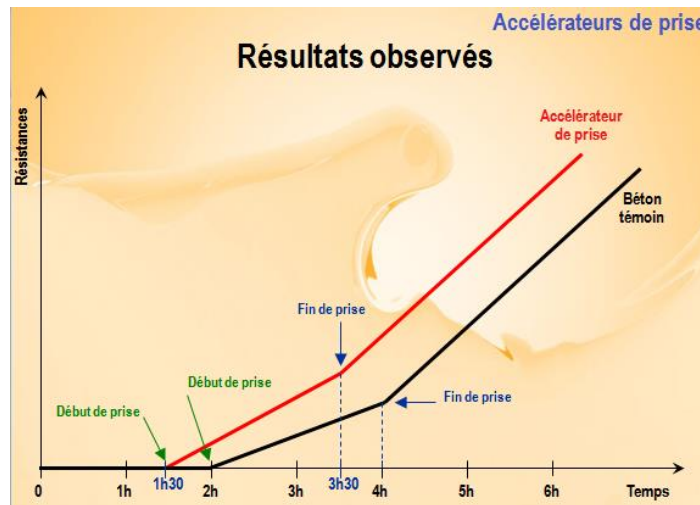


Figure 7 : Accélérateur de prise

7.2.4 Accélérateurs de durcissement

Adjuvants qui augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise.

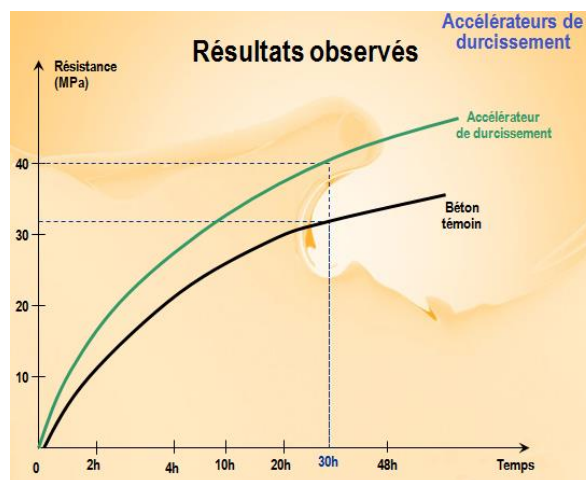


Figure 8 : Accélérateur de durcissement

7.2.5 Retardateurs de prise

Adjuvants qui augmentent le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

Ils régulent le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment.

Le retard de prise favorise le transport du béton sur de longues distances et la reprise de bétonnage.

La diminution de la chaleur d'hydratation favorise le bétonnage en grande masse.

7.2.6 Hydrofuges de masse

Adjuvants qui permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques.

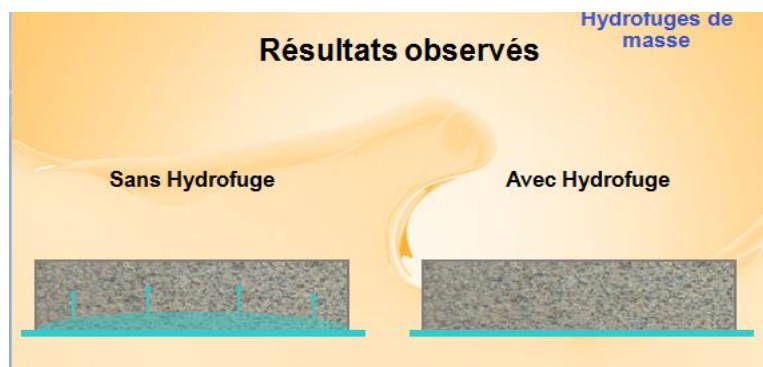


Figure 9 : Hydrofuges de masse

7.2.7 Entraîneurs d'air

Adjuvants qui permettent d'incorporer pendant le malaxage une quantité contrôlée de fines bulles d'air entraîné uniformément réparties et qui subsistent après durcissement.

8. Propriétés du béton à l'état frais

8.1. Béton frais

Possède une propriété bien particulière : son ouvrabilité. Cette caractéristique constitue un atout majeur du matériau en termes de mise en œuvre.

L'ouvrabilité est, en effet, la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton.



Figure 10 : Essai d'affaissement

8.2. Mesure de l'ouvrabilité du béton

Une des grandeurs définissant l'ouvrabilité est la consistance. Elle peut être mesurée facilement par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams, du nom de son inventeur ou "Slump test".

En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton, plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide.

La norme EN 206 retient plusieurs types d'appareils pour la mesure de la consistance du béton frais :

- Cône d'Abrams
- Essai d'étalement à la table à secousses
- Maniabilimètre LCPC

8.3. Ségrégation du béton

La ségrégation se définit comme étant la séparation des constituants d'un mélange hétérogène (perte d'homogénéité) produisant ainsi une distribution non uniforme de ces constituants dans un volume donné.

Dans le cas du béton, on distingue habituellement 2 causes de ségrégation soit :

- Une mauvaise formulation du béton ;
- Une mauvaise technique de mise en place du béton.

Au-delà de la mise en œuvre, la ségrégation compromet l'esthétique des ouvrages, leur homogénéité mécanique et leur durabilité.

En particulier, des accumulations localisées de gravillons conduisent à des différences de déformabilité (par exemple, de retrait), les zones les plus riches en granulat étant les moins déformables ; il s'ensuit souvent des fissures.



Figure 11 : Ségrégation du béton

8.4. Ressuage du béton

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide.

En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

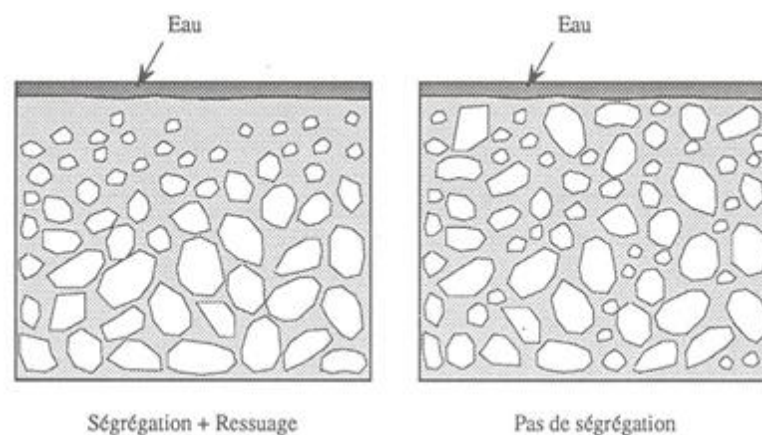


Figure 12 : Représentation schématique de la ségrégation et ressuage

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée.

Si l'eau évaporée est plus faible, le phénomène de ressuage est visible. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

Globalement, la vitesse de ressuage diminue avec :

- ✓ L'augmentation du temps de malaxage ;
- ✓ L'augmentation de la vitesse de rotation des pales du malaxeur ;
- ✓ La diminution du temps d'introduction de l'eau de gâchage.

En ce qui concerne les paramètres intrinsèques au matériau, l'amplitude et la vitesse de ressuage augmentent si :

- Le dosage en eau est augmenté ;
- Le dosage en fine est diminué l'on choisit un ciment à surface spécifique moindre

8.5. Retrait plastique

Lors du développement de l'hydratation, des changements volumétriques apparaissent. Le plus important est celui de la réduction de volume du système « eau+ciment » ; alors que la pâte à l'état plastique, subit une contraction volumétrique de l'ordre de 8 à 10% du volume absolu du ciment sec.

$$V_{\text{hydrates}} = 0.9 (V_{\text{ciment anhydre}} + V_{\text{eau}})$$

Cette contraction est connue sous le nom de retrait plastique parce que le béton est encore à l'état plastique.

Si la quantité d'eau perdue par unité de surface excède largement la quantité d'eau apportée à la surface par le ressuage, des fissures de surface peuvent apparaître.

On dira alors que le béton présente une fissuration de retrait plastique.

8.6. Influence de la composition

En ajustant la composition des bétons (principalement par l'emploi d'adjuvants), il est possible de modifier la consistance du béton ainsi que la durée pendant laquelle le béton reste "ouvrable".

La formulation d'un béton doit aboutir à un béton qui possède la plus grande ouvrabilité, le plus faible frottement interne avec la quantité d'eau minimum. Cette aptitude du béton à la déformation est aussi traduite par les termes consistance et maniabilité.

8.7. Fabrication et mise en œuvre

Comme tout matériau le béton doit fabriquer et mis en œuvre selon des règles de l'art précises afin d'offrir pour des qualités optimales.

8.7.1. Préparation

Le béton est un mélange à froid de matériaux naturels : ciment, granulats (sables ou gravillons), eau et éventuellement des adjuvants. Ce mélange durcit au bout de quelques heures. L'étude de formulation ayant défini les proportions des différents constituants du béton pour atteindre le niveau de performance recherché, ces constituants sont dosés de manière pondérale (de préférence) ou volumétrique, puis malaxés généralement pendant 1 à 3 minutes en fonction du type de matériel et de la nature du béton. On distingue deux techniques de fabrication du béton :

8.7.2 Fabrication en centrale

Le béton est généralement fabriqué dans des centrales de Béton Prêt à l'Emploi (BPE), dans des centrales de chantiers installées sur le site, ou dans des usines de préfabrication. Ces centrales utilisent du ciment livré en « vrac », c'est à dire dans des camions citernes de 25 tonnes. Certaines centrales sont livrées par péniches.

8.7.3 Fabrication en bétonnière

Pour de petits chantiers où les caractéristiques de résistance ne sont pas importantes, le béton peut être fabriqué dans des bétonnières, le ciment étant dans ce cas approvisionné en sacs de 50 kg.

8.7.4 Transport

Le béton est généralement transporté entre le lieu de fabrication et le chantier par des camions malaxeurs, appelés « toupies ». Les camions malaxeurs peuvent avoir des volumes variant entre 4 et 8 m³. Ils sont équipés d'un réservoir tournant sur lui-même (d'où le nom de toupie). Cette rotation est indispensable pendant le transport.

Le temps de transport est limité à 1h30 sauf si des produits retardateurs de prise ont été ajoutés au béton au moment de la fabrication en centrale.

Les rajouts d'eau à l'arrivée sur le chantier sont interdits.

Une fois le camion arrivé sur chantier on utilise différentes techniques, suivant les possibilités d'accès aux coffrages : goulottes, bennes, tapis ou pompes à béton. Le pompage du béton offre une grande productivité, la mise en place de quantités importantes en une seule coulée, et la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites d'accès difficiles



Figure 13 : Mise en place du béton à la goulotte



Figure 14 : Pompage du béton

8.8. Mise en œuvre

La mise en œuvre du béton est une opération très importante, dont dépendent en grande partie la réussite d'un ouvrage et sa pérennité dans le temps. Il convient donc d'y apporter un soin particulier et de prendre en compte tous les paramètres techniques et climatiques. De la sortie du malaxeur à l'ouvrage fini, le béton passe par différentes phases : transport, coulage dans un coffrage ou un moule, vibration, maturation, démoulage et cure. Ces différentes phases impliquent le recours à des techniques devant respecter des règles d'exécution, appelées « règles de l'art ».

8.8.1. L'approvisionnement du béton

Il faut : éviter les chocs ou les manœuvres brutales pouvant entraîner la ségrégation du béton, prévoir un temps de transport compatible avec le temps de début de prise du béton et par temps froid, protéger le béton contre le gel.

8.8.2 La mise en place du béton

Les coffrages doivent être : suffisamment rigides et indéformables pour supporter la poussée du béton frais et étanches pour éviter des fuites de laitance. Ils doivent être nettoyés et traités avec un produit démoulant adapter avant chaque utilisation. Les armatures doivent être correctement calées et positionnées. La hauteur de chute du béton doit être limitée pour éviter les risques de ségrégation ; la vitesse de bétonnage aussi constante que possible.



Figure 15 : Mise en place du béton

8.8.3 La vibration du béton

Elle est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et des parements de qualité.

8.9 Le bétonnage par temps chaud ou par temps froid

Par temps chaud, pour éviter la dessiccation du béton, il convient de limiter la température du béton frais et de protéger le béton par une cure adéquate. On utilisera de préférence un ciment à faible chaleur d'hydratation.

Par temps froid, en dessous d'une température de 5 °C la prise du béton est quasiment arrêtée, et en dessous de 0 °C, le béton risque de geler. Dans ce cas, il est possible de réchauffer l'eau de gâchage ou les granulats ou de chauffer le béton ou de calorifuger les coffrages. On utilisera de préférence un ciment à durcissement rapide.

8.9.1 Vibration

La vibration est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques et une bonne compacité.

8.9.2 Rôle de la vibration

La vibration appliquée au béton frais permet de favoriser l'arrangement des grains constituant le béton (les grains s'imbriquent les uns dans les autres et laissent le moins de vide possible). Sous l'effet de la vibration, le béton est comparable à une sorte de liquide visqueux, ce qui permet une meilleure mise en place dans les coffrages, un parfait enrobage des armatures et de garantir

une compacité optimale.

Les effets de la vibration sur le béton frais se traduisent pour le béton durci par des caractéristiques améliorées : porosité réduite, meilleure homogénéité, retrait diminué et enrobage plus efficace des

armatures.

Seul un béton très compact possède de bonnes caractéristiques de résistance.

8.9.3 Matériels de vibration

Deux catégories principales :

- Les vibrateurs internes, qui agissent directement sur le béton par pervibration, aussi appelés aiguilles vibrantes, ils sont constitués par un tube métallique dans lequel la rotation d'une masse excentrée provoque la vibration.
- Les vibrateurs externes, qui agissent sur le béton par l'intermédiaire d'un coffrage ou d'une poutre.

8.9.4 Règles de la vibration

Le temps de vibration nécessaire est lié aux caractéristiques du béton, au volume à vibrer et à la densité de ferrailage. De manière empirique, on peut dire qu'il faut arrêter la vibration quand le béton cesse de se tasser, le dégagement de bulles d'air s'arrête où la surface se couvre d'une mince couche de laitance.

Le temps de vibration varie en général de trente secondes à deux minutes.

8.9.5 Cure du béton

Cure du béton est la protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton et lui assurer une maturation satisfaisante.



Figure 16 : La cure du béton

8.9.6 Rôle de la cure

Lors du durcissement du béton, et particulièrement quand les conditions atmosphériques sont défavorables (vent, soleil, hygrométrie faible) il convient d'éviter que l'eau du béton ne s'évapore avant d'avoir hydraté l'ensemble des grains de ciment. Cette cure est particulièrement nécessaire pour les dalles et les chaussées, qui offrent une grande surface favorisant l'évaporation.

9. Propriétés du béton au jeune âge

9.1 Introduction

La meilleure connaissance du comportement du béton au jeune âge est essentielle dans le domaine de génie civil. On assiste à une accélération des cadences de travail. Il est important pour une entreprise de génie civil de savoir quand la résistance du béton sera suffisante, pour permettre le décoffrage ou la mise en précontrainte le plus rapidement possible, en toute sécurité.

La maîtrise de toutes ces opérations passe par une bonne compréhension du processus de développement de la résistance du béton à court terme. De plus, la connaissance des phénomènes physico-chimiques liés au développement de la résistance du béton constitue, aujourd'hui, une condition favorable pour reprendre les modèles de comportement mécanique du béton, en introduisant de nouveaux paramètres comme la température.

9.2 Prise et durcissement

Physiquement la prise représente le passage de la pâte de ciment d'une suspension à un squelette rigide. En effet, la prise de la pâte de ciment représente une étape importante, car, à ce moment, apparaît un squelette rigide conférant à la pâte ou au béton des propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, coefficient de Poisson,...) jusque-là inexistantes.

La structure du squelette rigide au moment de la prise et le temps de prise de la pâte de ciment seront grandement influencés par :

La période d'avant prise (floculation, ségrégation, ressuage);

Le rapport E/C; T; SSB du ciment; Ajouts minéraux; Adjuvant.

I : Dissolutions des grains

II : Période dormante

III : Accélération

IV : Décélération

V : Durcissement

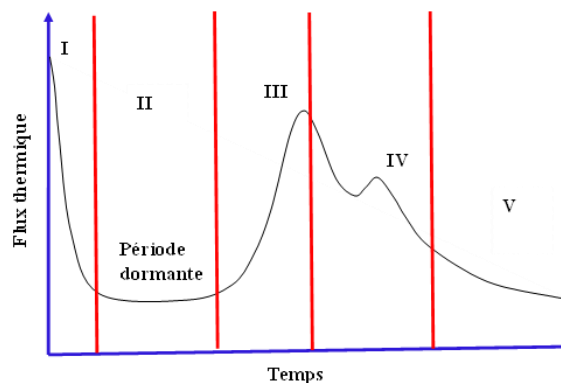


Figure 17 : Chaleur d'hydratation du ciment Portland

9.3 Degré d'hydratation

On parle souvent de résistance à la compression du béton à 1, 7 ou 28 jours considérant alors le temps comme le seul paramètre intervenant dans l'évolution des propriétés physico-mécaniques du béton.

En fait, l'évolution des propriétés du béton ne dépend pas seulement du temps, mais de plusieurs facteurs dont le plus important est la température subie par le béton.

En effet, l'hydratation du ciment est une réaction chimique termo-activée, ce qui explique pourquoi le temps seul ne peut être un paramètre objectif pour décrire l'évolution des propriétés du béton.

Notre tâche sera donc la définition d'un paramètre objectif permettant de caractériser l'évolution des propriétés du béton : le degré d'hydratation. Le degré d'hydratation est défini de différentes façons.

Une définition assez commune est la suivante :

$$\alpha = (\text{quantité de ciment hydraté} / \text{quantité totale de ciment})$$

Détermination à partir de l'eau liée chimiquement

Cette méthode est basée sur la mesure de la quantité d'eau chimiquement liée à une échéance donnée et sur l'estimation de la quantité de l'eau chimiquement liée correspondant à une hydratation complète du ciment. Le degré d'hydratation est obtenu par la relation suivante.

$$\alpha = \frac{\text{Quantité d'eau liée autemps } t}{\text{Quantité d'eau liée autemps } t = \infty} = \frac{W_n(t)}{W_n(t = \infty)}$$

Cette relation fait intervenir la quantité d'eau liée pour une hydratation complète du ciment. Le tableau (ci-dessous) montre que les quantités d'eau consommées par les différents constituants du ciment ne sont pas les mêmes et qu'il faut donc estimer cette quantité.

Composant	Quantité d'eau liée par rapport au composant
C_3S	0.24
C_2S	0.21
C_3A	0.40
C_4AF	0.37

L'eau liée $W_n(t)$ est, quant à elle, définie habituellement comme étant la quantité d'eau libérée de la pâte de ciment lorsqu'elle est chauffée entre 105 et 1050 °C

Détermination par calorimétrie isotherme

La technique permis le suivi de l'évolution des réactions d'hydratation. Un degré d'hydratation «macroscopique» est défini en supposant que les différentes réactions d'hydratation sont synchrones par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{Q(t)}{Q(\infty)}$$

$Q(t)$: est la quantité de chaleur dégagée à l'instant t

$Q(\infty)$: est la quantité de chaleur d'hydratation dégagée pour une hydratation complète, on peut la calculer par la relation suivante :

9.4 Evolution de la résistance à la compression

9.4.1 Facteurs influençant l'évolution de la résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression du béton dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont:

- La formulation (type et classe de ciment, E/C, adjuvants);
- Les conditions de mûrissement (la température et l'hygrométrie).

9.4.2 Influence des conditions de conservation

Le mûrissement est un facteur très important dans l'évolution de la résistance des bétons.

De plus, plusieurs chercheurs ont observé que la réaction d'hydratation s'arrêtait en dessous d'une humidité relative interne égale à 80%.

Au jeune âge, nous pouvons donc conclure que le principal effet du séchage n'est pas tant une modification de la relation résistance-degré d'hydratation qu'un arrêt de l'hydratation qui limite la résistance.

Ainsi, la température joue un grand rôle dans la réaction d'hydratation : parce qu'elle accélère la réaction mais aussi parce qu'elle change la nature des hydrates formés.

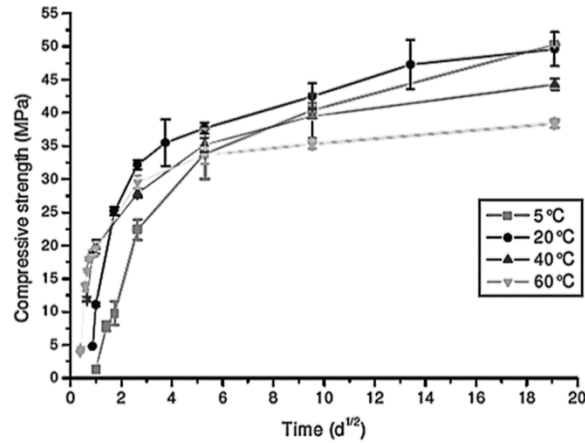


Figure 18 : La résistance à la compression des bétons en fonction de température de cure(Gallucci et al, 2013)

De façon générale, on constate que, plus la température de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée (à cause de l'accélération de la réaction d'hydratation), alors que la résistance à long terme diminue.

Causes de la diminution de la résistance à long terme :

- Des causes d'origine physique ;
- Des causes d'origine chimiques.

Les principales causes physiques sont l'augmentation de la porosité et de la microfissuration de la pâte de ciment hydratée due à des variations volumiques différentielles entre les constituants du béton, entre autres l'air et l'eau qui présentent des coefficients de dilatation thermique plus élevés que les autres constituants (ciment, granulat).

La composition chimique des produits d'hydratation est influencée par la température à laquelle ils sont formés.

Ainsi la microstructure (dimensions des hydrates, répartition spatiale des hydrates, ...) est partiellement modifiée par l'action de la température.

9.5 Notions de maturité et d'âge équivalent

Utilisation du principe de maturité

La première définition de maturité a été proposée par Saul (1951) pour un béton soumis à une cure humide,

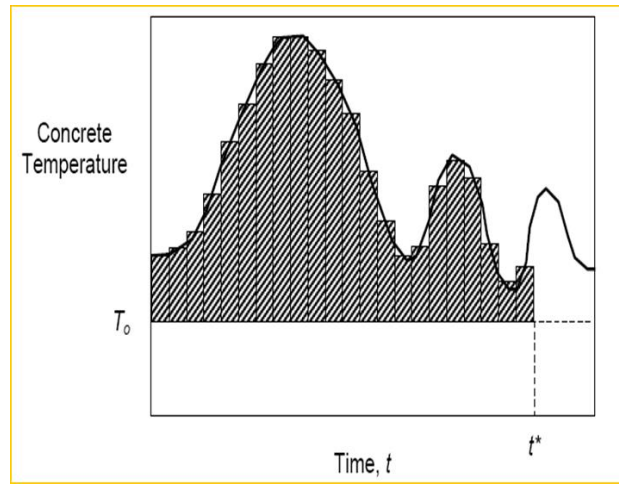


Figure 19 : Maturité et âge équivalent

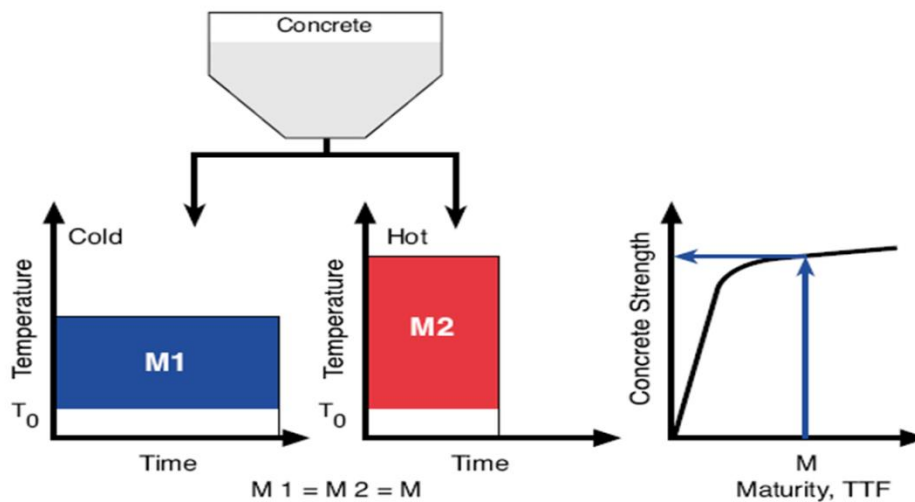
$$M = \int f(T)dt = \int (T - T_0) dt$$

M: maturité (°C*J ou °C*h);

dt : intervalle de temps (h);

T: la température moyenne du béton pendant l'intervalle Δt ;

T₀: température en dessous de laquelle l'hydratation cesse (T₀=-10 °C).



Saul's maturity rule using temperature-time factor

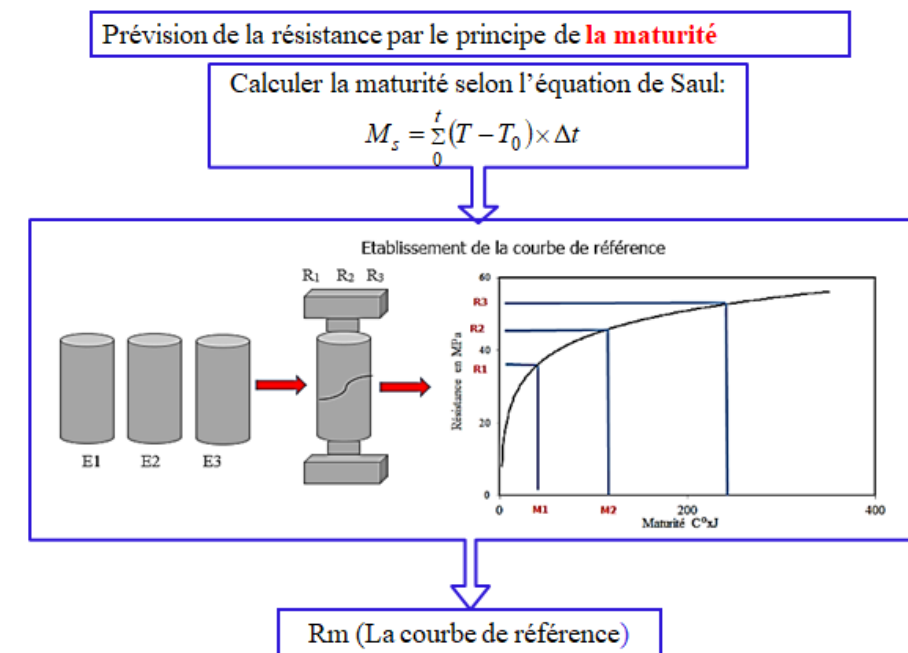


Figure 20 : prévision de la résistance à la compression par le principe de maturité

10. Bétons spéciaux

Selon la nature de l'ouvrage à réaliser et les contraintes effectives à chaque situation, on peut effectivement être amené à utiliser plusieurs types de béton.

10.1 Béton à haute performance (BHP)

Cette nouvelle génération de bétons, plus compacts, se caractérise par une durabilité accrue et une (très) haute résistance (à 28 jours) : à partir de 50 MPa (contre 30/35 MPa pour un béton traditionnel) et un rapport E/C < 0.4.

10.1.1 Domaine d'application

- ✓ Ouvrages d'art - Génie Civil et nucléaire (Ponts, tunnels, voussoirs, ouvrages fortement sollicités, poutres, enceintes, galeries techniques, ouvrages hydrauliques...)
- ✓ Bâtiments - Immeubles de grandes hauteurs - Parkings - Equipements sportifs (Eléments de structures (poutres, poteaux, murs porteurs...))

10.1.2 Avantages

L'utilisation du BHP soulève plusieurs avantages :

- ✓ Les bétons à hautes performances permettent de réduire les sections des éléments porteurs et ainsi d'augmenter les surfaces exploitables (bureaux, parkings...).

- ✓ L'allègement des ouvrages diminue les quantités de matériaux, ce qui relativise le coût du m³ de béton de hautes performances.
- ✓ La facilité et la rapidité de mise en œuvre augmentent la productivité du chantier.
- ✓ La prise et le durcissement plus rapides accélèrent la rotation des coffrages.
- ✓ Le maintien de la rhéologie pendant 1h30 est assuré grâce à l'emploi de superplastifiants.
- ✓ La fluidité importante permet d'assurer un bon remplissage des ferraillements denses.

10.1.3 Caractéristiques

Résistances caractéristiques à 28 jours, mesurées sur éprouvettes cylindriques, supérieures à 50MPa. • Consistance S4 (affaissement au cône d'Abrams de 160 à 210 mm).

- Pompable.
- Résistances élevées au jeune âge.
- Compacité optimale (faible rapport E/C).
- Durabilité exceptionnelle.
- Forte résistance à l'abrasion.
- Faible retrait limitant la fissuration.
- Fluage plus faible que celui d'un béton courant.

10.1.4 Eléments de formulation

Exemple de formulation type BHP

CEM I - 52,5: 385kg/m³

Fumée de silice: 30kg/m³

Sable 0/5: 690kg/m³

Gravillon 4/12: 220kg/m³

Gravillon 10/20: 940kg/m³

Eau efficace: 130kg/m³

Superplastifiant: 7kg/m³

Résistance à 28j: 87MPa

Résistance 7j: 75MPa

10.2 Béton Autoplaçant

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogue à celles des bétons traditionnels dont ils se

différencient par leurs propriétés à l'état frais. La fluidité du BAP permet sa mise en place aisée par pompage.

10.2.1 Domaine d'application

De nombreux produits préfabriqués sont actuellement couramment réalisés en BAP aussi bien en bâtiment qu'en travaux publics :

- Panneaux et voiles verticaux : panneaux de façade, encadrements de portes et fenêtres, encadrements de baies ;
- Éléments de structure : poteaux précontraints, poutres, poutrelles, poutrelles treillis pour plancher béton, dalles, appuis, pré linteaux, caissons précontraints, longrines ;
- Assainissement : cunettes, fond de regard, cuves et citernes ;
- Éléments pour le génie civil : bordures, glissières de sécurité, gradins, fossés ;
- Éléments pour piscines, caveaux, socles de machines-outils, buses rectangulaires, acrotères, corniches.

10.2.2 Avantages

Les architectes et les maîtres d'œuvres ont toujours recherché dans un béton plusieurs critères

- Une mise en place aisée ;
- Un bon remplissage des coffrages et des moules ;
- Un parfait enrobage des armatures ;
- Une forte compacité.

Avec comme principaux objectifs :

- La suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration...)
- L'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes ;
- Le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferraiillées ;
- L'allongement des temps d'ouvrabilité ;

- L'amélioration de la qualité esthétique des parements ;
- L'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines ;
- La réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers ;
- La réduction des nuisances sonores sur les chantiers ;

10.2.3 Éléments de formulation

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage. Ils offrent une plus grande qualité esthétique des parements. La formulation des BAP fait appel à :

Des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;

Une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage ($\sim 500 \text{ kg/m}^3$) ;

Un volume de pâte élevé (350 à 400 l/m^3),

Un faible volume de gravillons afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement ;

Du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées);

Un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ; – éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel-dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.

10.2.4 Essais de caractérisation de BAP

- **Essai d'étalement**

C'est l'essai au cône d'Abrams qui permet de donner une indication sur la mobilité du béton en milieu non confiné. A travers cet essai on obtient l'étalement (SF) (sulmp flow). Le calcul de SF et de

mesurer le diamètre de la galette obtenir suite au soulèvement du cône d'Abrams après un temps suffisamment long. L'étalement est fonction du seuil d'écoulement du béton, contrainte minimale au-dessous de laquelle le béton ne s'écoule pas. Les valeurs d'étalement préconisés pour un BAP (NF EN 206-1) se situent entre 60 cm et 80 cm. Ainsi trois classes d'étalement ont été définies.

SF1 l'étalement compris entre 55 et 65 cm,

SF2 l'étalement compris entre 66 et 75 cm,

SF3 l'étalement compris entre 76 et 80cm.



Figure 21 ; Essai d'étalement au cône d'Abrams

- **Essai J- RING**

Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié. On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm figure 16. Une fois le cône rempli, on soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes.



Figure 22 : Essai J-Ring

- **Essai de la boîte en L (L-box test)**

Cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

La partie verticale du L Figure 17 est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 12) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre

deux barres). Après écoulement, on mesure la hauteur dans la partie verticale (H1) et celle de la partie horizontale (H2) et on calcule le taux de remplissage final (H2/H1). Une valeur de ce rapport supérieure à 0.8 traduit un bon écoulement du BAP en milieu confiné. La viscosité du BAP en milieu confiné peut être mesurée par le temps d'écoulement.



Figure 23 : L- Box

- **Essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »**

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante, un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement, pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue.

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton.

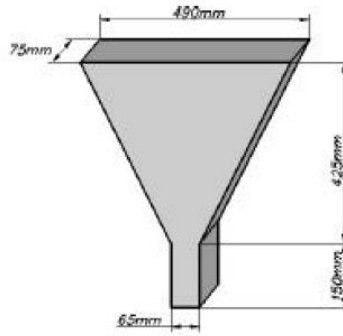


Figure 24 : Essai V-Funnel

10.3 Béton à ultra hautes performances (BUHP)

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique présentant un fort dosage en ciment et en adjuvants, des granulats de faible dimension et une porosité réduite. Ils présentent une durabilité et une résistance exceptionnelles (de 130 à 250 MPa en compression/de 20 à 50 MPa en traction par flexion) qui permet de se passer d'armatures passives dans les éléments structurels. Les BFUP se caractérisent également par :

- Une très grande ouvrabilité leur conférant souvent un caractère auto-plaçant
- Une résistance très importante aux agressions
- Des aspects de parements esthétiques et une texture de parement très fine

10.3.1 Domaine d'application

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, etc.) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc.).

10.3.2 Avantages/Caractères généraux

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- une très grande ouvrabilité ;
- des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 130 et 250 MPa, ainsi qu'à la traction (valeur comprise entre 5 et 12 MPa);

- de hautes résistances à court terme (24 heures) ;
- des résistances mécaniques au jeune âges très élevés ;
- une compacité très importante ;
- une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs) ;
- une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante ;
- une ténacité (résistance à la micro-fissuration) élevée ;
- un retrait et un fluage très faible;
- une dureté de surface très importante ;
- une grande résistance à l’abrasion et aux chocs,
- une faible perméabilité ;
- des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine;
- une optimisation des frais de maintenance et d’entretien des ouvrages ;

10.3.3 Eléments de formulation

<i>Exemples de formulations de BFUP (pour 1 m³)</i>					
<i>Ciment</i>	<i>Sable fin</i>	<i>Quartz broyé</i>	<i>Fumée de silice</i>	<i>Fibres métalliques</i>	<i>Adjuvant (extrait sec)</i>
710 kg	1020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg
1075 kg	1030 kg	—	160 kg	220 kg	35 kg

10.4 Bétons de granulats légers

10.4.1 Définition

Béton dont la masse volumique est comprise entre 300 et 1 800 kg/m³ (au lieu de 2 300 kg/m³ pour un béton courant), soit par une formulation recourant à des granulats légers, Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également

utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que la densité. **La résistance** d'un béton léger est **très inférieure** à celle d'un béton traditionnel. Pour les densités les plus basses, il ne peut être question de béton "structurel" mais seulement de béton de "remplissage". Ces bétons légers possèdent un pouvoir isolant sur le plan thermique et acoustique.

10.4.2 Composition des bétons légers

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la **composition** (bétons caverneux) ou sur l'emploi de **granulats allégés** (des billes de schistes expansés, d'argiles expansés ou de polystyrène, voire des particules de bois remplacent les gravillons habituels).

10.5 Bétons lourds

10.5.1 Définition

Il s'agit d'un béton dont la masse volumique dépasse 3000 kg/m^3 et peut atteindre 6000 kg/m^3 (contre 2300 kg/m^3 pour un béton courant), grâce à l'usage de granulats très denses (barytine, magnétite, hématite).

10.5.2 Domaines d'applications

Les bétons lourds et très lourds sont utilisés notamment dans les domaines suivants :

- Protection contre les rayonnements nocifs (centrales nucléaires, salles de radiologie...).
- Protection contre les explosions (salles anti-déflagrantes)

Exemple :

Sulfate de baryum SO_4Ba c'est une matière opaque plus ou moins blanche sa densité moyenne est de 4.5.

La magnétite : c'est un minéral à base d'oxyde de fer (Fe_2O_3) dont la densité varie de 4 à 5.

10.6 Bétons réfractaires

Les bétons classiques, confectionnés avec des ciments courants, en général ne résistent pas à des températures sup à 300°C . Lorsque la température excède cette valeur les bétons soumis à la chaleur doivent être confectionnés avec des ciments alumineux (comportent un taux d'alumine Al_2O_3 plus élevé supérieure à 40%) et suivant les granulats utilisés il est possible de réaliser des bétons résistant jusqu'à 2000°C , le dosage doit être de 400 kg/m^3 de ciment et le rapport Eau/ciment de 0,40 au maximum.

Ils sont généralement utilisés dans les milieux industriels (pour réaliser des parois intérieures de fours ou des cheminées par exemple).

Type de granulats:

- basalte
- granit
- laitier de haut fourneau

10.7 Béton Projeté

10.7.1 Définition

L'appellation «béton projeté » se réfère à un procédé de mise en œuvre qui consiste à amener le béton ou le mélange sec sous pression dans un tuyau ou une conduite jusqu'au lieu de mise en place, où il est projeté violemment contre la surface d'application.

Cette technique est très utilisée pour la réfection des dessous de dalles de béton et des surfaces verticales sans l'utilisation des coffrages. Le béton se compacte de lui-même grâce à l'effet d'impact. Ainsi, à l'inverse des bétons courants qui doivent être mis en place, puis être vibrés ultérieurement,

10.7.2 Domaines d'utilisation

- Réfection d'ouvrage de béton tels que ponts, viaducs, barrages, réservoirs, tunnels de métro, structures marines et stationnements multi-étagés;
- Réfection et recouvrement de conduites d'aqueducs, d'égouts pluviaux et d'égouts sanitaires;
- Nouvelles constructions tels que stabilisations de pentes, revêtements de parois de tunnel, piscines et toutes autres constructions de béton.

10.7.3 Avantages

- Capacité de projeter une épaisse couche dès le premier passage sur paroi verticale ou en surplomb;
- Excellente résistance au lessivage;
- Faible retrait;
- Très faible perméabilité;

- Résistance élevée aux attaques des sulfates

10.7.4 Composition

Le mélange de béton projeté pré-ensaché pour l'application par voie sèche est souvent utilisé. Le mélange contient du ciment Portland, de la fumée de silice, un agent entraîneur d'air, du sable et de la pierre ainsi que d'autres additifs soigneusement choisis.

11. Matériaux céramique

11.1 Définition

La céramique est l'une des plus anciennes activités humaines; au temps des Egyptiens. 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.

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)- sous toiture,
- tuiles pour couverture,
- carreaux pour les revêtements de sols,
- faïence pour les revêtements de murs,
- boisseaux pour les cheminées (conduites de fumée).



Fig. 2.1 : Briques pleines



Fig. 2.2 : Briques creuses



Fig. 2.3 : Hourdis pour planchers



Fig. 2.4 : Tuiles pour couverture



Fig. 2.5 : Carreaux de sols



Fig. 2.6 : Boisseau cheminée

11.2 Classification

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 ces grès sont généralement blancs et sont utilisés pour la vaisselle, les carreaux et les pièces sanitaires.

Les matières premières utilisées sont l'argile (Silicates d'aluminium hydratés: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Kaolin), le sable (Quartz: SiO_2) et le feldspath. (Silicates d'aluminium et de potassium: $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), L'argile n'est utilisable que si ses composants varient entre les limites admissibles suivantes :

Tableau 2.1 : Composition chimique d'argile utilisable

Nature des éléments	Formation	Tolérances (%)
Silice	SiO_2	35-85
Alumine	Al_2O_3	9-25
Chaux	CaO	0-25
Magnésie	MgO	0-5
Oxydes alcalins	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	1-5
Oxydes de fer	Fe_2O_3	3-9
Oxyde de titane	TiO_3	0.3-2
Anhydride sulfurique	SO_3	0-3
Gaz carbonique	CO_2	0-13
Eau de combinaison	H_2O	5-11

Les éléments nuisibles à éviter sont :

- la craie en gros grains qui se transforme au cours de la cuisson en chaux vive; ces nodules font éclater le produit en présence d'humidité,
- les pyrites sulfureuses ont le même effet que les nodules de chaux,
- les sels solubles (sulfates, ...etc), cristallisent en surface, diminuent de volume à la cuisson et s'hydratent sous la pluie faisant éclater la masse,
- les impuretés organiques (racines, débris végétaux) brûlent à la cuisson laissant des vides dans la masse d'où produits poreux.

Ce qui rend nécessaire de corriger et d'améliorer certaines argiles suivant le produit désiré :

- les terres trop grasses sont amaigries par un apport de produits inertes : sable siliceux très fin, argile cuite finement pulvérisée, mâchefer (cendre de combustion de charbon), cendres volantes, scorie, coke,

- les terres trop maigres, grâce à un apport de kaolinite (argile grasse) ou de marne (argile calcaire), sont rendues onctueuses.

11.3 Fabrication

Malgré 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 et sont :

11.3.1 Gisement, extraction

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 :

- 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.

11.3.2 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).

11.3.3 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).

Briques pleines.

Sont soit directement moulées à la presse ou à la filière. Celles passées à la filière sont moins poreuses, plus résistantes et plus régulières,

Briques de parement.

Sont façonnées par double pressage. En effet, après avoir obtenu des briques pleines à la presse ou à la filière, on les laisse sécher légèrement puis on les repasse à la presse. Ainsi leur compacité est plus grande, leurs arêtes vives et elles même plus calibrées,

Briques perforées

Pour alléger le produit fini et faciliter le séchage, on incorpore à la filière des noyaux qui réalisent diverses perforations dans le pain de la pâte d'argile pour obtenir ainsi des produits perforés de dimensions variables,

Briques creuses

On comprime la pâte dans une chambre avant de la passer dans une filière; les machines employées (étireuses ou mouleuses) utilisent divers procédés pour comprimer l'argile : palettes, piston, cylindre cannelés, hélices.

Tuiles.

Leur façonnage se fait :

- en pâte molle pour tuiles plates et canal,
- en pâte ferme pour tuiles à emboîtement.

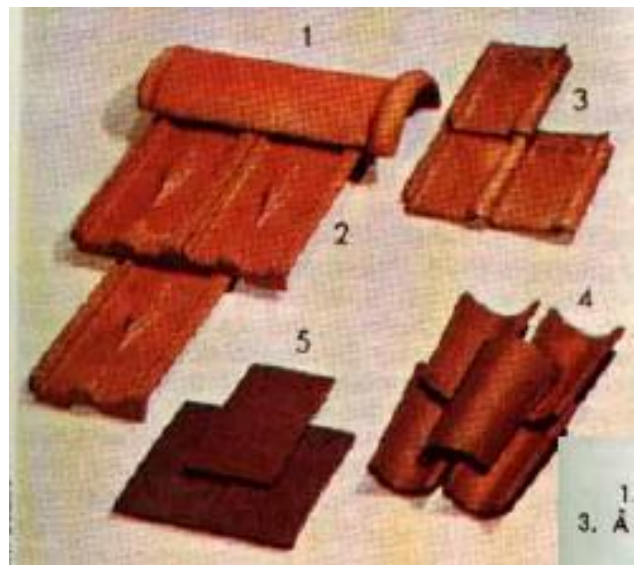
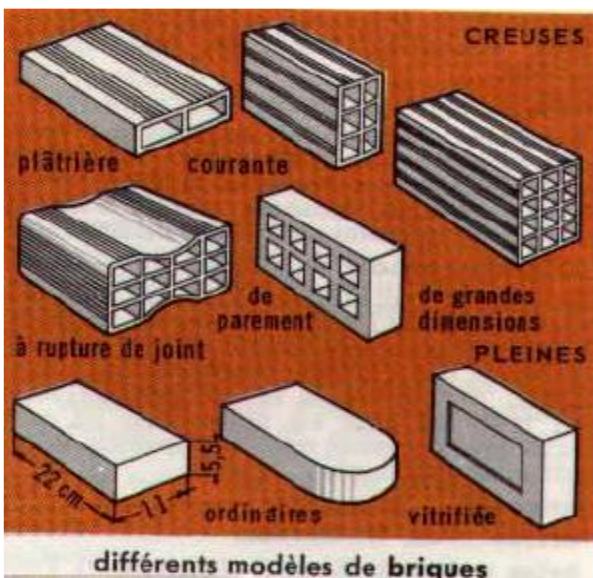


Figure 2.7 : Brique creuse- Brique pleine- Tuiles

11.3.4. 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. Il y a deux procédés de séchage :

- **Séchage naturel.**

Il se pratique par exposition des produits dans des hangars à l'air libre, ceci demande de grandes aires de dessiccation et une quantité importante de main-d'œuvre. 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.

11.3.5 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 ($2 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$) 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.

11.4 Propriétés générales des céramiques

Les céramiques sont des matériaux qui ont généralement les propriétés suivantes :

- Mauvais conducteurs de chaleur ;
- Mauvais conducteurs d'électricité ;
- Température de fusion élevée ;
- Rigidité élevée ;
- Faible résistance en tension (matériau fragile) ;
- Très résistant à la corrosion.

11.4.1 Retrait à l'air

Pendant le séchage à l'air d'une pièce moulée en argile, les dimensions linéaires (et par suite le volume) diminuent à mesure que cette pièce perd son eau, par suite de rapprochement des particules d'argile, ce phénomène est appelé retrait à l'air, car il se produit à la température ordinaire de l'air. On exprime le retrait linéaire à l'air par le rapport (en pourcentage) d'une dimension de la pièce à l'état sec à la valeur initiale de cette même dimension. A l'état humide, le retrait est de 5 à 12%.

Le comportement de l'argile au chauffage est l'une des propriétés les plus importantes de ce matériau, au cours de la cuisson, une pièce moulée en argile se transforme en une masse dure comme de la pierre, qui résiste à l'eau. Au cours de la cuisson, la couleur de l'argile se modifie, sa résistance mécanique augmente, et son volume diminue (**retrait de cuisson**), le retrait de cuisson est de 1 à 2 %. La couleur des pièces cuites dépend des oxydes de fer, qui colorent les pièces céramiques en rouge ou en jaune quand ces objets contiennent de la chaux.

On ajoute les additions amaigrissantes pour réduire le retrait au séchage et à la cuisson, pour améliorer les propriétés de moulage, ces additions peuvent être des substances minérales: sable, scories broyées, etc., on emploie également des matières organiques: poussière de charbon.

Chapitre 3-Métaux Ferreux et non Ferreux



12. Matériaux ferreux et non ferreux

12.1 Introduction

Les métaux ferreux et les métaux non ferreux. La différence essentielle et la plus facile à mémoriser entre les deux est que les métaux ferreux contiennent du fer et que les métaux non ferreux n'en contiennent pas.

12.2 Applications

A température ambiante, la plupart des métaux sont des solides atomiques. Les métaux les plus utilisés sont le fer, l'aluminium et le cuivre. Les alliages métalliques sont, en général, les combinaisons de deux ou de plusieurs métaux comme dans le cas des laitons (alliages de cuivre et de zinc), mais ils peuvent également contenir des éléments non métalliques. Parmi ce type d'alliage on trouve, par exemple, la plupart des aciers (alliages fer-carbone).

Tableau 3.1 : Tableau périodique des éléments

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS																	
GRUPE	MASSA ATOMIQUE RELATIVE (A)																18
1	GRUPE S										GRUPE D						18
2	GRUPE P										GRUPE D						18
3	GRUPE P										GRUPE D						18
4	GRUPE P										GRUPE D						18
5	GRUPE P										GRUPE D						18
6	GRUPE P										GRUPE D						18
7	GRUPE P										GRUPE D						18
8	GRUPE P										GRUPE D						18
9	GRUPE P										GRUPE D						18
10	GRUPE P										GRUPE D						18
11	GRUPE P										GRUPE D						18
12	GRUPE P										GRUPE D						18
13	GRUPE P										GRUPE D						18
14	GRUPE P										GRUPE D						18
15	GRUPE P										GRUPE D						18
16	GRUPE P										GRUPE D						18
17	GRUPE P										GRUPE D						18
18	GRUPE P										GRUPE D						18
19	GRUPE P										GRUPE D						18
20	GRUPE P										GRUPE D						18
21	GRUPE P										GRUPE D						18
22	GRUPE P										GRUPE D						18
23	GRUPE P										GRUPE D						18
24	GRUPE P										GRUPE D						18
25	GRUPE P										GRUPE D						18
26	GRUPE P										GRUPE D						18
27	GRUPE P										GRUPE D						18
28	GRUPE P										GRUPE D						18
29	GRUPE P										GRUPE D						18
30	GRUPE P										GRUPE D						18
31	GRUPE P										GRUPE D						18
32	GRUPE P										GRUPE D						18
33	GRUPE P										GRUPE D						18
34	GRUPE P										GRUPE D						18
35	GRUPE P										GRUPE D						18
36	GRUPE P										GRUPE D						18
37	GRUPE P										GRUPE D						18
38	GRUPE P										GRUPE D						18
39	GRUPE P										GRUPE D						18
40	GRUPE P										GRUPE D						18
41	GRUPE P										GRUPE D						18
42	GRUPE P										GRUPE D						18
43	GRUPE P										GRUPE D						18
44	GRUPE P										GRUPE D						18
45	GRUPE P										GRUPE D						18
46	GRUPE P										GRUPE D						18
47	GRUPE P										GRUPE D						18
48	GRUPE P										GRUPE D						18
49	GRUPE P										GRUPE D						18
50	GRUPE P										GRUPE D						18
51	GRUPE P										GRUPE D						18
52	GRUPE P										GRUPE D						18
53	GRUPE P										GRUPE D						18
54	GRUPE P										GRUPE D						18
55	GRUPE P										GRUPE D						18
56	GRUPE P										GRUPE D						18
57	GRUPE P										GRUPE D						18
58	GRUPE P										GRUPE D						18
59	GRUPE P										GRUPE D						18
60	GRUPE P										GRUPE D						18
61	GRUPE P										GRUPE D						18
62	GRUPE P										GRUPE D						18
63	GRUPE P										GRUPE D						18
64	GRUPE P										GRUPE D						18
65	GRUPE P										GRUPE D						18
66	GRUPE P										GRUPE D						18
67	GRUPE P										GRUPE D						18
68	GRUPE P										GRUPE D						18
69	GRUPE P										GRUPE D						18
70	GRUPE P										GRUPE D						18
71	GRUPE P										GRUPE D						18
72	GRUPE P										GRUPE D						18
73	GRUPE P										GRUPE D						18
74	GRUPE P										GRUPE D						18
75	GRUPE P										GRUPE D						18
76	GRUPE P										GRUPE D						18
77	GRUPE P										GRUPE D						18
78	GRUPE P										GRUPE D						18
79	GRUPE P										GRUPE D						18
80	GRUPE P										GRUPE D						18
81	GRUPE P										GRUPE D						18
82	GRUPE P										GRUPE D						18
83	GRUPE P										GRUPE D						18
84	GRUPE P										GRUPE D						18
85	GRUPE P										GRUPE D						18
86	GRUPE P										GRUPE D						18
87	GRUPE P										GRUPE D						18
88	GRUPE P										GRUPE D						18
89	GRUPE P										GRUPE D						18
90	GRUPE P										GRUPE D						18
91	GRUPE P										GRUPE D						18
92	GRUPE P										GRUPE D						18
93	GRUPE P										GRUPE D						18
94	GRUPE P										GRUPE D						18
95	GRUPE P										GRUPE D						18
96	GRUPE P										GRUPE D						18
97	GRUPE P										GRUPE D						18
98	GRUPE P										GRUPE D						18
99	GRUPE P										GRUPE D						18
100	GRUPE P										GRUPE D						18
101	GRUPE P										GRUPE D						18
102	GRUPE P										GRUPE D						18
103	GRUPE P										GRUPE D						18
104	GRUPE P										GRUPE D						18
105	GRUPE P										GRUPE D						18
106	GRUPE P										GRUPE D						18
107	GRUPE P										GRUPE D						18
108	GRUPE P										GRUPE D						18
109	GRUPE P										GRUPE D						18
110	GRUPE P										GRUPE D						18
111	GRUPE P										GRUPE D						18
112	GRUPE P										GRUPE D						18
113	GRUPE P										GRUPE D						18
114	GRUPE P										GRUPE D						18
115	GRUPE P										GRUPE D						18
116	GRUPE P										GRUPE D						18
117	GRUPE P										GRUPE D						18
118	GRUPE P										GRUPE D						18
119	GRUPE P										GRUPE D						18
120	GRUPE P										GRUPE D						18
121	GRUPE P										GRUPE D						18
122	GRUPE P										GRUPE D						18
123	GRUPE P										GRUPE D						18
124	GRUPE P										GRUPE D						18
125	GRUPE P										GRUPE D						18
126	GRUPE P										GRUPE D						18
127	GRUPE P										GRUPE D						18
128	GRUPE P										GRUPE D						18
129	GRUPE P										GRUPE D						18
130	GRUPE P										GRUPE D						18
131	GRUPE P										GRUPE D						18
132	GRUPE P										GRUPE D						18
133	GRUPE P										GRUPE D						18
134	GRUPE P										GRUPE D						18
135	GRUPE P										GRUPE D						18
136	GRUPE P										GRUPE D						18
137	GRUPE P										GRUPE D						18
138	GRUPE P										GRUPE D						18
139	GRUPE P										GRUPE D						18
140	GRUPE P										GRUPE D						18
141	GRUPE P										GRUPE D						18
142	GRUPE P										GRUPE D						18
143	GRUPE P										GRUPE D						18
144	GRUPE P										GRUPE D						18
145	GRUPE P										GRUPE D						18
146	GRUPE P										GRUPE D						18
147	GRUPE P										GRUPE D						18
148	GRUPE P										GRUPE D						18
149	GRUPE P										GRUPE D						18
150	GRUPE P										GRUPE D						18
151	GRUPE P										GRUPE D						18
152	GRUPE P										GRUPE D						18
153	GRUPE P										GRUPE D						18
154	GRUPE P										GRUPE D						18
155	GRUPE P										GRUPE D						18
156	GRUPE P										GRUPE D						18
157	GRUPE P										GRUPE D						18
158	GRUPE P										GRUPE D						18
159	GRUPE P										GRUPE D						18
160	GRUPE P										GRUPE D						18
161	GRUPE P										GRUPE D						18
162	GRUPE P										GRUPE D						18
163	GRUPE P										GRUPE D						18
164	GRUPE P										GRUPE D						18
165	GRUPE P										GRUPE D						18
166	GRUPE P										GRUPE D						18
167	GRUPE P										GRUPE D						18
168	GRUPE P										GRUPE D						18
169	GRUPE P										GRUPE D						18
170	GRUPE P										GRUPE D						18
171	GRUPE P										GRUPE D						18
172	GRUPE P										GRUPE D						18
173	GRUPE P										GRUPE D						18
174	GRUPE P										GRUPE D						18
175	GRUPE P										GRUPE D						18
176	GRUPE P										GRUPE D						18
177	GRUPE P										GRUPE D						18
178	GRUPE P										GRUPE D						18
179	GRUPE P										GRUPE D						18
180	GRUPE P										GRUPE D						18
181	GRUPE P										GRUPE D						18
182	GRUPE P										GRUPE D						18
183	GRUPE P										GRUPE D						18
184	GRUPE P										GRUPE D						18
185	GRUPE P										GRUPE D						18
186	GRUPE P										GRUPE D						18
187	GRUPE P										GRUPE D						18
188	GRUPE P										GRUPE D						18
189	GRUPE P										GRUPE D						18
190	GRUPE P										GRUPE D						18
191	GRUPE P										GRUPE D						18
192	GRUPE P										GRUPE D						18
193	GRUPE P										GRUPE D						18
194	GRUPE P										GRUPE D						18
195	GRUPE P										GRUPE D						18
196	GRUPE P										GRUPE D						18
197	GRUPE P										GRUPE D						18
198	GRUPE P										GRUPE D						18
199	GRUPE P										GRUPE D						18
200	GRUPE P										GRUPE D						18
201	GRUPE P										GRUPE D						18
202	GRUPE P										GRUPE D						18
203	GRUPE P										GRUPE D						18
204	GRUPE P										GRUPE D						18
205	GRUPE P										GRUPE D						18
206	GRUPE P										GRUPE D						18
207	GRUPE P										GRUPE D						18
208	GRUPE P										GRUPE D						18
209	GRUPE P										GRUPE D						18
210	GRUPE P										GRUPE D						18
211	GRUPE P										GRUPE D						18
212	GRUPE P										GRUPE D						18
213	GRUPE P										GRUPE D						18
214	GRUPE P										GRUPE D						18
215	GRUPE P										GRUPE D						18
216	GRUPE P										GRUPE D						18
217	GRUPE P										GRUPE D						18
218	GRUPE P										GRUPE D						18
219	GRUPE P										GRUPE D						18
220	GRUPE P										GRUPE D						18
221	GRUPE P										GRUPE D						18
222	GRUPE P										GRUPE D						18
223	GRUPE P										GRUPE D						18
224	GRUPE P										GRUPE D						18
225	GRUPE P										GRUPE D						18
226	GRUPE P										GRUPE D						18
227	GRUPE P										GRUPE D						18
228	GRUPE P										GRUPE D						18
229	GRUPE P										GRUPE D						18
230	GRUPE P										GRUPE D						18
231	GRUPE P										GRUPE D						18
232	GRUPE																

12.3 Métaux Ferreux

Il faut savoir que les métaux ferreux ont bien moins de valeur que les métaux non-ferreux, car il s'agit d'une ressource naturelle que l'on trouve en abondance sur la Terre, qui est facile à utiliser et qui est de qualité inférieure : lorsque le fer s'oxyde, il rouille et il perd donc en fiabilité.

12.3.1. Les aciers

Acier c'est le fer allié à une quantité de Carbone inférieure à 2%. Le point de fusion c'est 1400°C.

12.3.2 La fonte

La fonte c'est un alliage de fer et de carbone (2 à 6 %).

12.3.3 Le fer pur

Fer presque pur avec une quantité de carbone inférieure à 0.1 %.

12.3.4 Aciers Inoxydables

Ce sont des aciers, alliage de fer et de carbone (<1,2%) auquel on ajoute essentiellement le Chrome qui au-delà de (12 à 13 %). Produit la résistance souhaitée à l'oxydation.

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.
- La fonte est un métal ferreux solide mais fragile. Il est souvent utilisé dans les pièces automobiles, telles que les culasses et les boîtes de vitesses.
- **Position des aciers de construction en fonction de leur teneur en carbone**

Métaux	Teneur en carbone (%)	Teneur en carbone
Fer	Moins de 0.06	La différence essentielle entre chaque type d'acier réside dans la proportion de carbone qu'il contient si le fer et le carbone sont alliés, dans la mesure où la teneur en carbone ne dépasse pas 1,5%, on obtient les aciers. Par contre, si l'alliage contient plus de 2% de carbone, on entre dans le groupe des fontes. Le carbone détermine la dureté et la ténacité des aciers. Plus un acier en contient, plus il est résistant. Cependant, il faut également tenir compte des procédés de production, des autres éléments d'alliage et de la nature du traitement thermique, lesquels contribuent à modifier certaines propriétés physiques des matériaux.
Acier doux	Entre 0.06 et 0.2	
Acier semi-dur	Entre 0.2 et 0.5	
Acier dur (acier à outils)	Entre 0.5 et 1.5	
Fonte	Plus de 2	

Ténacité qui caractérise la résistance d'un matériau à l'avancement des fissures et peut être mesurée par des essais de fissuration.

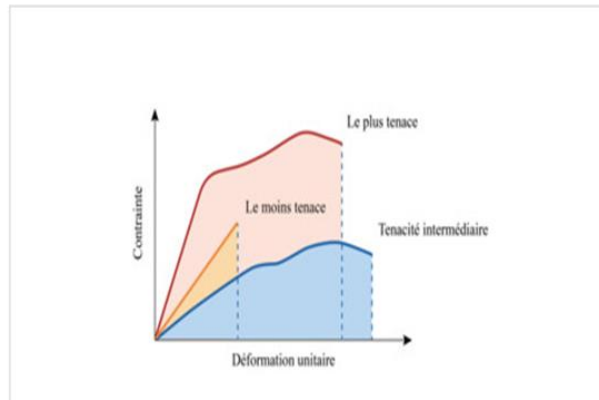


Figure 3.1: Courbe contrainte déformation

- **Production mondiale d'acier brut en 2018**

En 2018, les principaux producteurs d'acier sont (Mt = million de tonnes) :

- la Chine : 928,3 Mt (quasiment 1 milliard de tonnes, soit la moitié de la production mondiale)
- l'Inde : 106,5 Mt
- le Japon : 104,3 Mt
- les États-Unis : 86,6 Mt
- la Corée du Sud : 72,5 Mt
- la Russie : 71,7 Mt
- la Turquie : 37,3 Mt
- le Brésil : 34,9 Mt
- l'Italie : 24,5 Mt
- l'Iran : 24,5 Mt
- Taïwan : 23,2 Mt
- l'Ukraine : 21,1 Mt
- le Mexique : 20,2 Mt
- la France : 15,4 Mt
- l'Espagne : 14,3 Mt
- le Vietnam : 14,1 Mt
- le Canada : 12,9 Mt
- la Pologne : 10,2 Mt
- la Belgique : 8 Mt

- **Distribution géographique de la production / consommation d'acier brut en 2018 :**

- Chine : 51,3%
- Europe : 11,6%
- Asie (hors Chine) : 7,3%
- ALENA : 6,6% (USA-canada-Mexique)
- Japon : 5,9%
- Inde : 5,9%
- Russie : 5,6%
- Amérique centrale et Amérique du Sud : 2,5%
- Moyen Orient : 2,1%
- Afrique : 1%
- Australie et Nouvelle-Zélande : 0,4%

12.3.5 Utilisation

L'acier est transformé après sa production, en éléments de natures variées, nous citons :

- différents profilés généralement utilisés dans la construction métallique, la voie ferrée, etc,
- armatures pour béton armé et béton précontraint : lisse, ondulé, treillis, ...etc.





Figure 3.2 : Utilisation des aciers

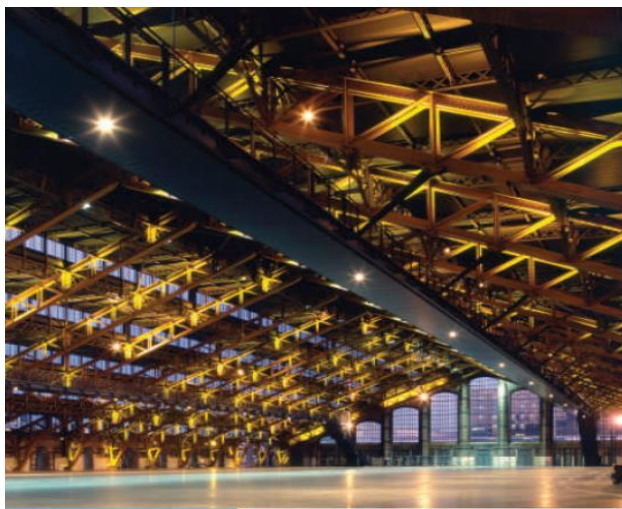


Figure 3.3 : profilés de charpente métalliques

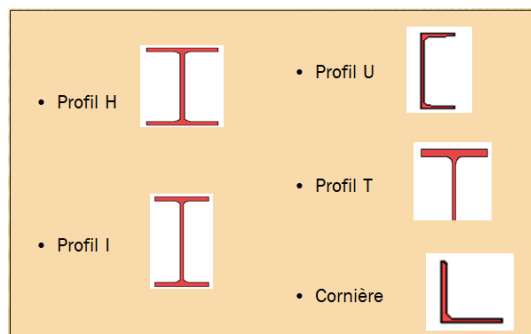




Figure 3.4 : acier de construction

La fonte sert à fabriquer des pièces moulées telles que des pièces d'automobiles, de locomotives et d'équipement agricole.

La fonte résiste nettement mieux à la compression qu'à la traction. Par ailleurs, elle est relativement cassante.

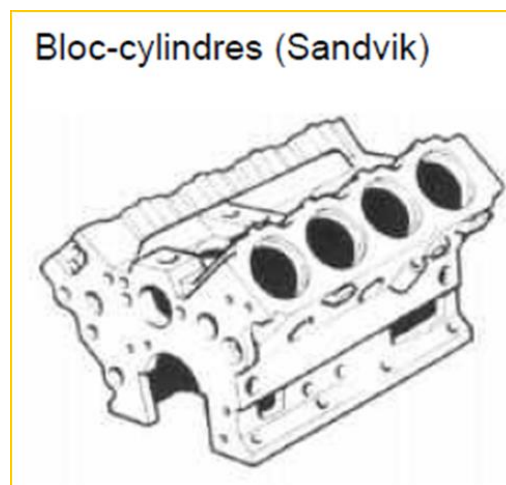
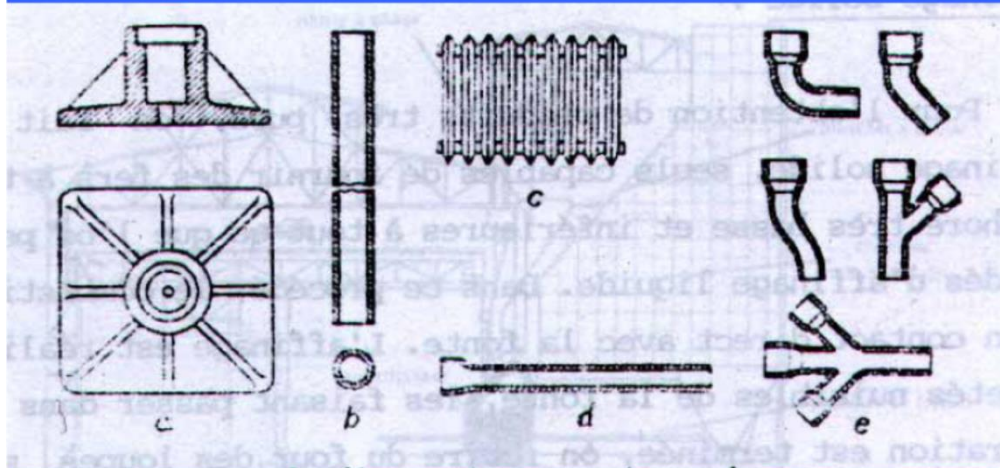


Figure 3.5 : Bloc-cylindre en fonte

Éléments de construction en fonte



a- semelle d'appui des poteaux, b- poteaux, c- radiateurs de chauffage, d- tuyaux, pièces de raccord pour les tubes

12.4 Métaux non ferreux

L'absence de fer dans les métaux non ferreux leur confère un avantage certain sur leurs homologues ferreux : ils sont moins sujets à la corrosion. De plus, ils sont plus souples et peuvent être façonnés plus facilement. C'est pourquoi ils sont souvent utilisés dans les systèmes de gouttières, les tuyaux de transport de liquide,

12.4.1 ALUMINIUM

Non seulement l'aluminium résiste à la corrosion, mais il est également léger. Il est donc idéal pour les pièces de voitures et d'avions, ainsi que pour les machines et les boîtes de conserve.

12.4.2 CUIVRE

Le cuivre est un métal non ferreux très conducteur et a donc de nombreuses applications dans l'industrie électrique. La tuyauterie est le principal usage et le plus commun jusqu'à présent.







12.4.3 ZINC

Le zinc a un point de fusion bas et est souvent utilisé pour recouvrir l'acier et le fer afin d'empêcher ces matériaux de se détériorer ou de rouiller- un procédé appelé galvanisation.

12.4.4 LAITON

Le laiton est fabriqué en combinant le cuivre et le zinc. On le trouve couramment dans les raccords et les prises électriques, les serrures et la plomberie.

Tableau 3.2 : les métaux non ferreux

Metal Pur	Propriétés	Applications
<p>Le cuivre</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • De couleur rougeâtre • Excellent conducteur • Résistant à la corrosion • Très ductile et malléable • Se soude facilement 	<ul style="list-style-type: none"> • Conducteur électrique et thermique • Fils, baguettes métalliques
<p>L'étain</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • De couleur blanche bleutée brillante • Mou • inoxydable 	<ul style="list-style-type: none"> • on l'utilise surtout pour la soudure de composants électriques et électroniques. • On l'utilise aussi pour la soudure de tuyaux de chauffage et d'eau
<p>Aluminium</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • de couleur blanche brillante • léger et bonne résistance à la corrosion • il n'est pas toxique 	<ul style="list-style-type: none"> • câbles de lignes électriques de haute tension • menuiserie métallique • canettes de boissons
<p>Zinc</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • de couleur blanche • très résistant à la corrosion et à l'oxydation 	<ul style="list-style-type: none"> • recouvrement de toits, canaux et tuyaux
<p>Le magnésium</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • très léger • très cher • quand il est liquide ou fondu il réagit violemment à l'oxydation 	<ul style="list-style-type: none"> • Applications aérospatiales car c'est un métal très léger
<p>Le titane</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Très cher • Résistant à la corrosion • Très bonne résistance mécanique • Il est biocompatible (utilisation dans les prothèses médicales) 	<ul style="list-style-type: none"> • Implants biomédicaux • Moteur turbo réacteur • Structures aéronaves

12.5 Propriétés des Métaux

12.5.1 Propriétés physiques

Masse volumique: La masse volumique d'un acier est peu affectée par sa composition chimique et par les traitements thermiques. A la température ambiante, la masse volumique du fer est de 7.88.

Symbolique : ρ (kg.dm⁻³)

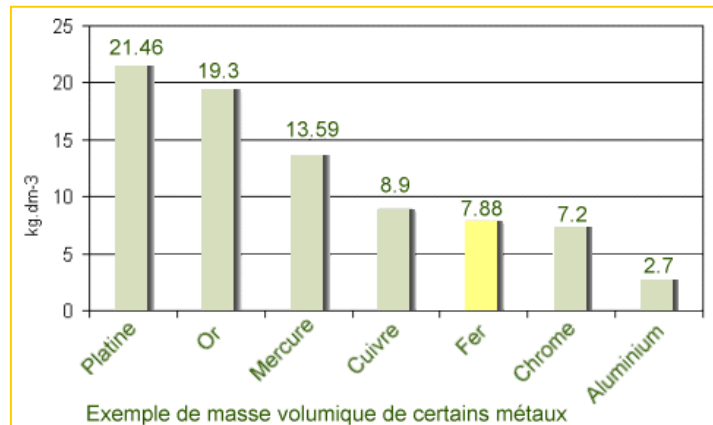


Figure 3.6 : masse volumique de certains métaux

12.5.2 Module d'élasticité longitudinal

Dans le domaine élastique, la contrainte est proportionnelle à l'allongement (loi de Hooke). Pour les forces de traction et de compression, la constante de proportionnalité s'appelle module d'élasticité longitudinale (ou module de Young) et est représentée par E.

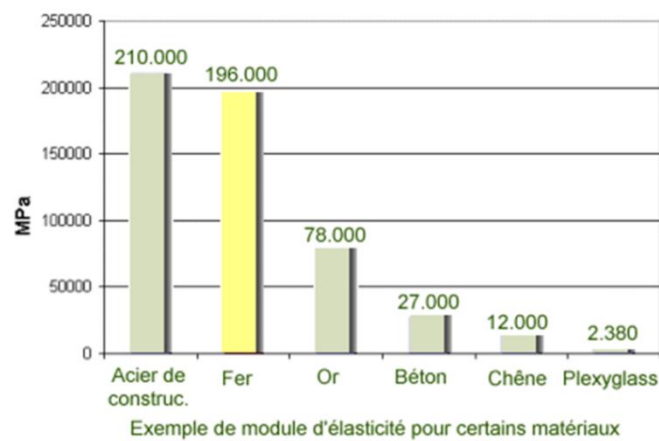


Figure 3.7 : exemple de module d'élasticité pour certains matériaux

12.5.3 Coefficient de Poisson

Lorsqu'une barre est en traction, elle s'allonge dans le sens longitudinal et elle se contracte dans le sens transversal; de même, une charge compressive produit une diminution de la longueur et une dilatation de la section transversale.

ν est le rapport entre la contraction transversale et l'allongement longitudinal.

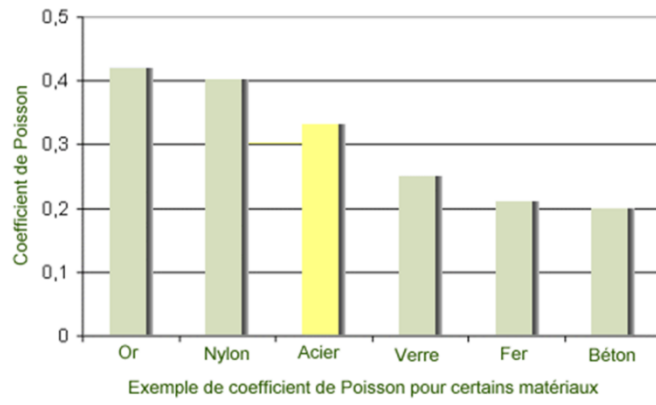


Figure 3.8 : exemple de coefficient de poisson pour certains matériaux

Chapitre 4 : le Verre



13.1 Introduction

Il n'existe pas une, mais plusieurs définitions du verre. Ainsi, on peut le définir différemment suivant que l'on considère :

Les objets que l'on peut fabriquer à partir de cette matière (aspect fonctionnel) : par analogie avec le verre utilisé pour boire ou le verre à vitre. Le verre est un matériau solide transparent, homogène et cassant. Il résiste bien au feu et au contact de pratiquement tous les liquides et solides connus.

Il faut souligner que les professionnels qui travaillent dans le domaine du vitrail, ne fabriquent pas le verre. Celui-ci constitue la matière première principale de leur activité. Ils utilisent en majorité des verres soufflés mais travaillent aussi avec d'autres types de verre plat.

L'univers de ce matériau est extrêmement vaste et regroupe une multitude de domaines liés à notre vie quotidienne.

13.2 Structure du verre

Les verres se composent d'oxydes formateurs du réseau, d'oxydes modificateurs du réseau et éventuellement de substances colorantes.

13.2.1 Oxydes formateurs

Il s'agit principalement du SiO₂, du B₂O₃ ou du P₂O₅.

Ces composés sont responsables de l'état vitreux; en plus ils donnent la résistance mécanique, ainsi que la résistance aux acides; leur coefficient de dilatation thermique est très bas.

13.2.2 Oxydes modificateurs

Il s'agit d'oxydes:

- alcalins → Na₂O, K₂O, qui diminuent le point de fusion. K₂O augmente la brillance du verre.
- métaux bivalents → CaO, BaO, PbO, MgO, qui augmentent la stabilité chimique.
- métaux trivalents → Fe₂O₃ + Al₂O₃ qui augmentent la résistance aux agents chimiques.

Substances colorantes

Oxydes de cobalt, chrome, MnO₂ (blanc), FeO, Fe₂O₃, éléments métalliques Cu, Ag, Au, etc., sulfures divers.

composition de quelques types de verre (d'après Duriez)

	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	PbO	MgO	ZnO	BaO	Mn ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
verre ordinaire et verre à vitre	0.715			0.150	0.135							
verre à thermomètre	0.715		0.004	0.108	0.146						0.016	
glaces de St-Gobain	0.720			0.110	0.160						0.010	
crystal	0.535		0.110			0.535						
verre à bouteilles	0.613		0.020	0.028	0.267						0.037	0.055
flint léger	0.543	0.015	0.080	0.030		0.330						
flint lourd	0.293		0.030			0.675						
flint extra lourd	0.118					0.820						
crown au bore	0.680	0.100	0.100	0.100				0.020		traces		
crown au baryum	0.490	0.120	+alcalis	+alcalis				0.100	0.290			
crown au zinc	0.650	0.205	0.150	0.050				0.020	0.100	traces		
pyrex	0.805	0.118	0.002	0.004	0.002			0.006			0.020	0.003
verre de basalte	0.500		0.003	0.150			0.200				0.011	0.011
verre sans alcalis	0.680	0.130						0.037	0.120		0.037	
verre de silice	1.000											

13.3 Propriétés des verres

La caractéristique commune à un grand nombre de verres est leur isotropie due à leur nature amorphe, non cristalline, ce qui implique l'absence d'ordre au moins à moyenne et longue distance. Les propriétés qui en résultent et l'amélioration continue de leur connaissance ont permis de multiplier les applications du verre.

13.3.1 Les propriétés optiques du Verre

La propriété optique la plus connue est l'indice de réfraction ainsi que toutes les notions de transmission et réflexion qui en découlent. Si l'on y ajoute l'absorption, la diffusion et la dispersion de la lumière, on a une description assez complète de l'interaction entre le verre et la lumière.

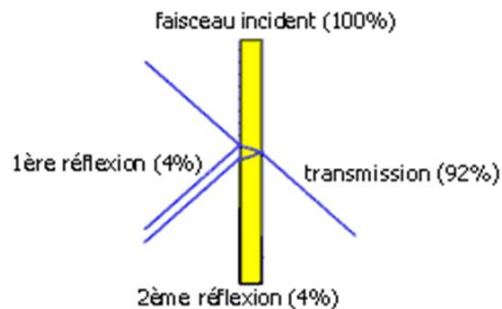


Figure 4.1 : Réflexion et transmission de la lumière sur les verres

13.3.2 propriétés mécaniques du Verre

Le verre est un matériau fragile, qui, après rupture, présente un faciès conchoïdal.

On trouve de nombreux paramètres permettant de décrire les qualités et les défauts du verre dans toutes les situations de mise sous contrainte:

- Le module élastique ou module d'Young (E), qui caractérise la déformation du verre avant la rupture,
- La contrainte à la rupture (s)
- La ténacité (K1c) ou facteur critique d'intensité de contrainte
- La corrosion sous contrainte: l'altération par l'eau d'une fissure augmente sa vitesse de propagation,
- La fatigue du verre: soumis à des traitements cycliques, un verre peut se fragiliser par modification des défauts de surface (taille, nombre)
- La dureté qui caractérise l'aptitude d'un verre à rayer (ou être rayé par) un autre matériau. Sur l'échelle des minéralogistes (échelle de Mohs), elle est voisine de 6 (1=talc ; 10=diamant).

13.3.3 propriétés chimiques du verre

Au XVIIIème siècle, Lavoisier mettait en évidence l'altérabilité chimique des verres. Celle-ci dépend fortement de la composition du verre d'une part, et de la solution altérante d'autre part (un verre standard ne résiste pas à l'acide fluorhydrique). Les mécanismes d'altération sont, dans la plupart des cas, très lents à température ambiante et souvent assimilables à ceux des silicates naturels.

Le comportement d'un verre vis à vis de l'altération aqueuse est caractérisé par :

La vitesse initiale maximale d'altération (V_0)

Les concentrations à saturation qui correspondent à un équilibre entre la solution et le verre, et la vitesse résiduelle induite.

13.3.4 propriétés thermiques du Verre

Les principales propriétés thermiques des verres sont :

- **La chaleur spécifique** qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'une masse unité du matériau de 1 degré centigrade (pour le verre à vitre : 0,8 J/g/K).
- **La conductibilité thermique** (on dit aussi conductivité) qui caractérise le rapport entre le flux thermique par unité de surface et le gradient de température (1,15 W/m/K).
- **Le coefficient de dilatation** qui est le rapport ramené à une longueur unité entre l'allongement et l'élévation de température ($9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour un verre sodocalcique; $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour un borosilicate).

On peut également mentionner la résistance au choc thermique:

C'est la plus grande différence de température à laquelle le matériau peut être soumis sans casser (un borosilicate (Pyrex) est moins sensible qu'un verre sodocalcique).

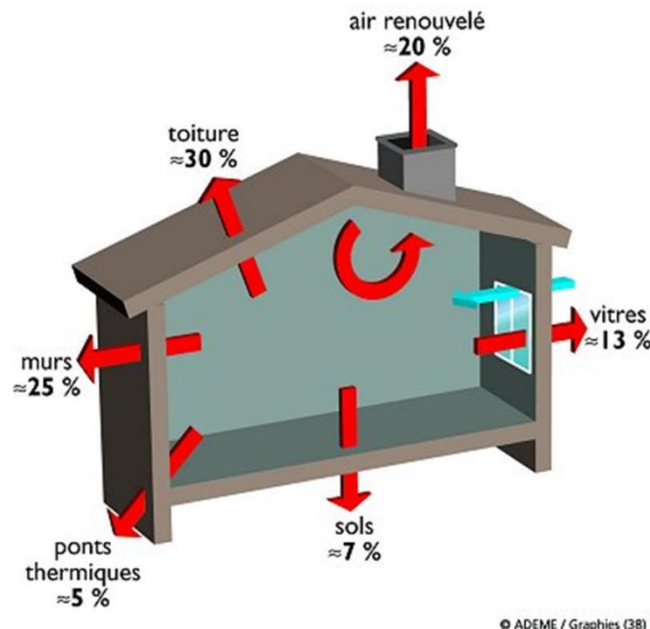


Figure 4.2 : Mouvement d'air dans un maison

13.4 Fabrication des verres

13.4.1 Etapes de la fabrication d'un verre sodocalcique

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

13.4.2 Traitements thermiques des verres

Recuit

Echauffement du verre jusqu'à la température de recuit afin d'éliminer les contraintes thermiques.

13.4.3 Trempe

On trempe le verre pour obtenir :

- une résistance aux chocs
- une résistance en fonction de l'épaisseur

Il existe deux possibilités de traitement: la trempe thermique et la trempe chimique.

13.4.4 trempe thermique

Le volume de verre est chauffé jusqu'à environ 650°C (température où les molécules peuvent se déplacer), puis refroidit très rapidement et uniformément à 300°C par des jets d'air froid. $T > T_g$ mais sans déformation excessive.

13.4.5 trempe chimique

Le verre est immergé dans un bain salin (sel de potasse ou nitrate de potassium fondu) à 400°C pendant une durée de 12 à 36 heures (ou plus en fonction de la résistance désirée). Les ions sodium du verre quittent sa surface et sont remplacés par les ions potassium qui sont plus grands; ceux-ci compressent la surface interne qui se met en extension. Il y a donc une compression très élevée sur une très faible épaisseur de la surface.

Résistance à la rupture entre 200 et 300 MPa, mais peut atteindre 800 MPa

13.5 Différents types des verres

- **Verre à vitre** épaisseur de 0.8mm à 6.8mm
- **Glace** 6mm < épaisseur < 8mm
- **Miroir** glace +4 couche (couche Ag + couche Cu + peinture de base + peinture de protection)
- **Verre colorés :**

-verre et dalle de couleur étirés et polis au feu, teinté dans la masse.

- Glace filtrantes : les propriétés thermiques et optiques sont modifiées de manière à absorber les rayons UV, les IR ou le visible.

Les verres composites

✓ **Verre armés largeur : 125-150cm**

Epaisseur : 3- 10 mm

✓ **Verres feuilletés :**

Balustrade

Vitrage anti-effraction

Vitrage anti-balles

Vitrines

✓ **Verre isolant**

13.6 Utilisations des verres

Les usages du verre sont aussi multiples que ses propriétés le permettent.

Il y a d'abord les usages courants:

- Vaisselle, récipients,
- vitres et bâtiments en verre,
- Optique,
- Décoration,
- Verrerie de laboratoire, etc.

On utilise également le verre dans des applications moins " évidentes ":

- utilisation des fibres optiques pour la;
- vitrocéramiques pour les plaques de cuisson ;
- verres dentaires.



Figure 4.3: Pose de films anti graffiti pour transports publics



Figure 4.4: Économies d'énergie, protection solaire anti-décoloration et isolation thermique

Chapitre 5 : TP Matériaux de construction

TP N°1 Détermination du module de finesse et du taux des fines du sable

14.1 But de l'essai

Le but de cet essai est de déterminer le module de finesse et le taux des fines du sable constituant l'échantillon.

14.1.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains à l'aide d'une série de tamis, emboîtés les uns dans les autres, dont les ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. On place ensuite le matériau en partie supérieure et on obtient le classement par vibration de la colonne de tamis.

14.1.2 Equipement nécessaire

Ce sont des tamis qui sont constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisées. La dimension des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est à dire par la grandeur de l'ouverture du carré, elles vont de 0.08 (module 20) à 80 mm (module 50). Il est également conseillé, dans la mesure du possible, d'utiliser une machine à tamiser électrique, ce qui permet des résultats plus fiables.

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0.08	0.100	0.125	0.16	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	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40	50	63	80		



Figure 5.1 : serré des tamis

14.1.3 Conduite de l'essai

Cet essai est applicable à des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est impératif de prendre toutes les précautions nécessaires afin de ne pas perdre les éléments fins présents dans l'échantillon.

14.1.4 Préparation de l'échantillon

La quantité prélevée doit répondre à plusieurs impératifs :

Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif

Il faut une quantité assez faible pour que l'essai ne dure pas trop longtemps et pour ne pas saturer les tamis.

Pour cela, la masse utilisée sera telle que : $M = 0,2 D$ avec M = masse de l'échantillon en kg et D = diamètre du plus gros granulats en mm.

Dimensions des tamis à utiliser

Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38.

Pour les matériaux plus grossiers, tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

Description de l'essai

Prélever 3 kg de gravier et 1 kg de sable

Les matériaux seront séchés à l'étuve à une température maximale de 105°C.

Les tamis sont emboîtés sur un fond étanche, dans un ordre croissant du bas vers le haut de la colonne.

Le matériau est versé en haut de la colonne.

Un couvercle ferme l'ensemble et permet d'éviter toute perte durant le tamisage.

La colonne est fixée sur une tamiseuse électrique. (On peut aussi effectuer la vibration manuellement).

Le temps de tamisage varie suivant le matériel utilisé et dépend également du matériau, on considère donc que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations d'environ 1 minute.

On appelle **Refus** le poids de matériau retenu par un tamis.

On appelle **Tamisât** le poids de matériau passant par ce même tamis.

Le refus du tamis le plus grand est pesé, on l'appelle R1.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, on l'appelle R2. L'opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes, y compris le tamisât contenu dans le fond étanche. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés à tous les niveaux de la colonne.

La somme des refus cumules doit être égal au poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. Les pertes acceptables durant l'essai ne doivent pas dépasser 2% du poids total de l'échantillon.

Un tableau présenté de cette façon est rempli au fur et à mesure des pesées.

14.1.5 Expression des résultats

Courbe Granulométrique.

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisât cumulés sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Remarque:

- Les courbes granulométriques peuvent être continues, et dans ce cas, tous les tamis enregistrent un refus, ou bien elles peuvent être considérées discontinues lorsque plus de trois tamis consécutifs ne gardent pas de refus.
- La forme des courbes peut conduire à des interprétations rapides. La figure qui suit, présente différentes possibilités pour un sable :
- courbe 1 : courbe granulométrique courante.
- courbe 2 : granulat riche en éléments fins
- courbe 3 : granulat pauvre en éléments fins
- courbe 4 : courbe granulométrique discontinue (il manque les éléments de compris entre 0,4 et 1 mm).

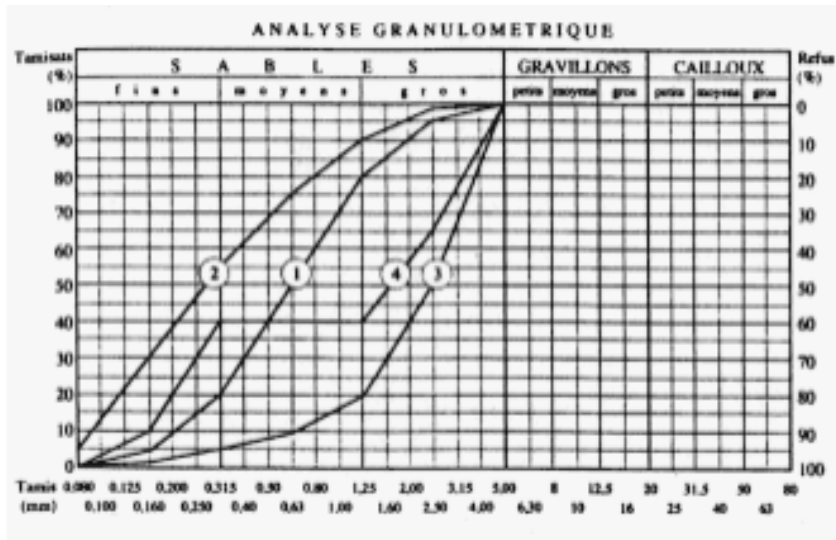


Figure 5.2: Courbes granulométriques

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul de son

14.1.6 Module de finesse MF.

Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5.

On utilise ce paramètre pour caractériser la finesse des sables à bétons. Tableau de classification du sable selon le module de finesse

Type de sable Module de finesse MF

Sable un peu trop fin MF varie entre 1.8 et 2.2

Sable préférentiel MF varie entre 2.2 et 2.8

Sable un peu trop grossier MF varie entre 2.8 et 3.2

Correction du module de finesse

On pourra utiliser la règle d'Abrams :

Un sable grossier S1 de module de finesse MF1.

Un sable fin S2 de module de finesse MF2.

Le sable de mélange S de module de finesse FM.

La proportion du sable S1 : $\frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$

La proportion du sable S2 : $\frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$

Calcul de la teneur en fine d'un sable

A partir de l'échantillon global, on prélève la quantité nécessaire à l'essai.

- Déterminer la teneur en eau du sable, soit : (w), (2 essais au minimum).
- Peser précisément l'échantillon humide (m_0), puis le tamiser par lavage sur une petite colonne du tamis comprenant le 1, le 0.5 et le 0.063 jusqu'à ce que l'eau coulant du tamis soit claire.
- Sécher les refus lavés à la poêle à frire pour aller plus vite.
- Peser les refus lavés sec soit : (m_1).
- Soit la teneur en fines

$$f = 1 - \frac{m_1}{m_0} \times (1 + \omega)$$

14.2 TP N°2 Méthode pratique pour la composition du béton (DREUX-GORISSE)

Nous rappelons que cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées.

14.2.1 Données de base

14.2.1.1 Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couverture par rapport au coffrage.

14.2.1.2 Résistance souhaitée

σ'_{28} La résistance en compression à 28 jours visés.

14.2.1.3 Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée par affaissement au cône comme indiqué au tableau 1.

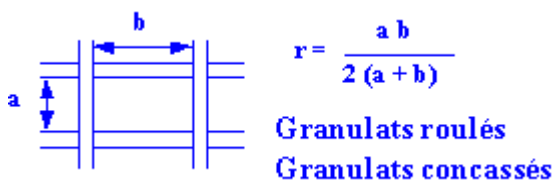
Tableau 5. 1 : évaluation de l'ouvrabilité

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	< 10

14.2.1.4 Dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats (D_{max}) est choisie suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir. Le tableau suivant montre les règles à suivre, en général ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis qu'une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuées de 20% environ.

Tableau 5.2 : Dimension maximale du granulat.

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D_{max}
e_h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$\leq e_h / 1,5$
e_v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$\leq e_v$
d	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive ≥ 5 cm Ambiance moyennement agressive ≥ 3 cm Ambiance peu agressive ≥ 3 cm Ambiance non agressive ≥ 1 cm	$< d$
r	Rayon moyen du ferrailage  $r = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}$	$\leq 1,4 r$ $\leq 1,2 r$
h_m	Hauteur ou épaisseur minimale	$\leq h_m / 5$

14.2.1.5 Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée σ'_{28}

$$\sigma'_{28} = G \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec :

σ'_{28} : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en Mpa,

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f'_{c'28}$$

$f'_{c'28}$: la résistance à la compression désirée à 28 jours.

σ'_c : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en Mpa,

C : Dosage en ciment (en kg/m³),

E : Dosage en eau totale sur matériau secs (en litre), **G** : Coefficient granulaire.

Tableau 5.3: Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G)

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins	Moyen	Gros
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure n°1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

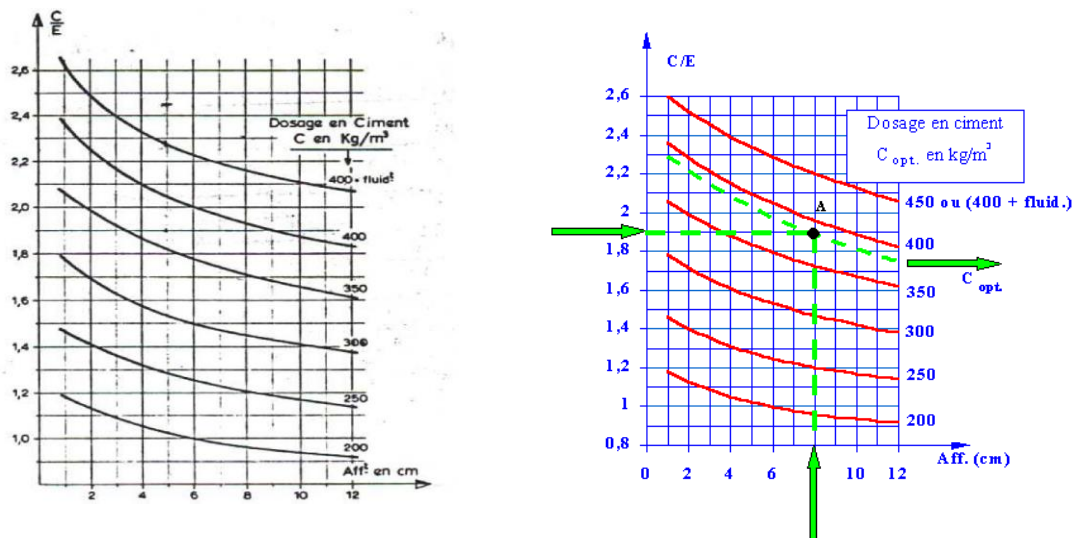


Figure 5.3 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

14.2.1.6 Dosage en eau

L'abaque de la figure (2), donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosée.

- **Correction du dosage en eau en fonction de D_{max}**

Les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ $D = 25$ mm (dimension la plus courante). Si l'on a $D < 25$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice-versa. La correction sur le dosage en eau correspond à $D = 25$ mm, peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau (5) en fonction de D .

Tableau 5.4 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction du dosage en eau (%).	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

✓ **Dosage en eau réelle :**

La quantité d'eau totale (sur matériau supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, en obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats).

14.2.1.7 Analyses granulométriques des granulats

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence OAB. - Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D des plus gros granulats.

- Point de brisure A à pour coordonnées :

- En abscisse Si $D \leq 25$ mm $X = D/2$.

Si $D > 25$ mm X est située au milieu du segment limité par le Module 38 (5mm) et le module correspond à D ;

- En ordonnée :

$$Y = 50 - (D_{\max})^{1/2} + K.$$

Avec K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable.

Les valeurs de K est donnée sur le tableau (6).

Tableau 5.5 : Valeurs de K

Vibration	Faible		normale		Puissante	
Forme des granulats	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé

Dosage en ciment	400+fluidif	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+	+4	0	+	-2	0
	300	2	+6	+	2	0	+
	250	+	+8	2	+	+	2
	200	4	+1	+	4	2	+

Nota 1 : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera effectuée de façon à relever le point A, ce qui correspond à augmenter le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6M_f - 15$.

Nota 2 : Si la quantité 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.

14.2.1.8 Coefficient de compacité (γ)

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matériaux solides (ciment et granulats) réellement contenus dans un mètre cube de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de (γ) dans le tableau (7) :

Tableau 5.6 : Valeurs du coefficient de compacité

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=16	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	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

Nota : 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= - **0.03**
- pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de γ qui correspondent ici à des granulats denses ordinaires.

14.2.1.9 Dosage des granulats

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur la même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants figure 3. La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe de sable au point 5% de la courbe du gravier. Le point de rencontre de ligne de partage avec la courbe de référence donne le partage des pourcentages de sable et de gravier.

%sable=36%

%gravier =64%

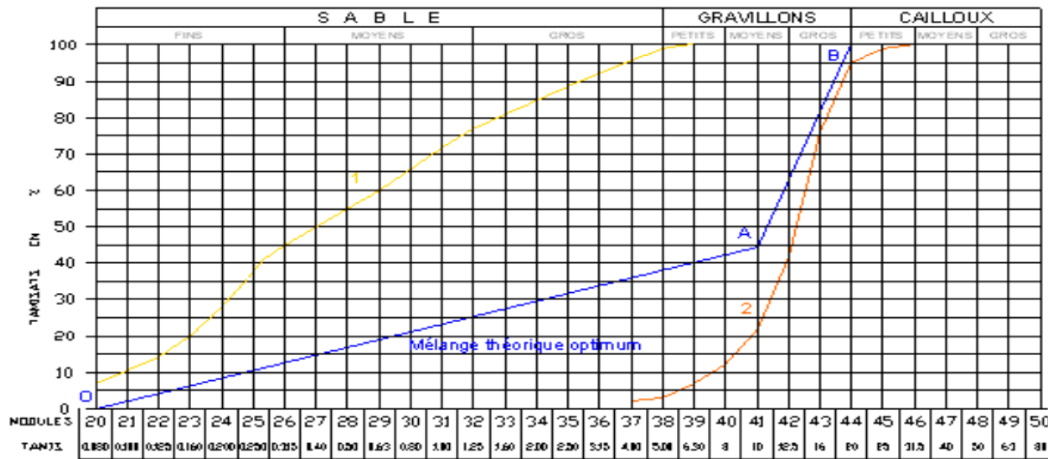


Figure 2 : Courbe de référence (OAB) + courbes granulométrique du sable et gravier

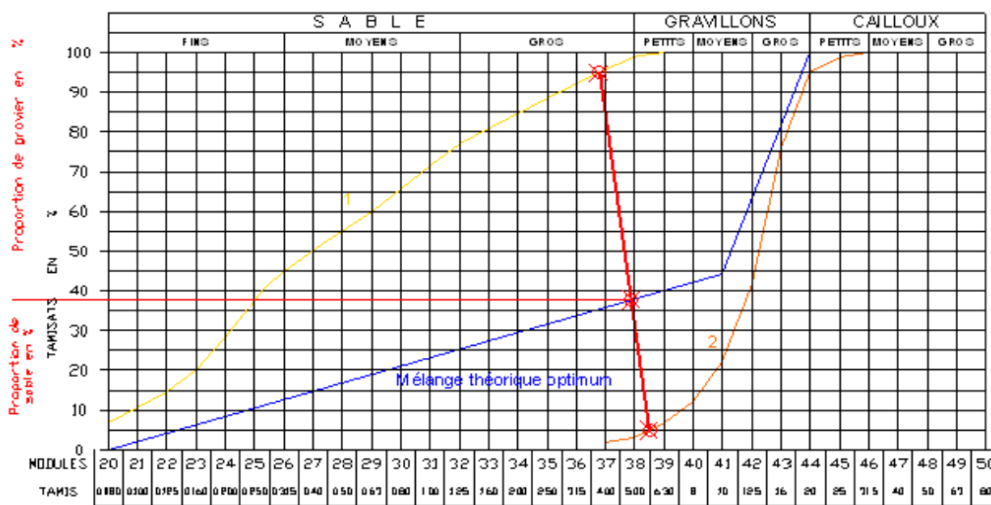


Figure 5.4 : La ligne de partage

Par exemple. Si C est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$\rho_{abs} = \frac{C}{v_1} v_1 = \frac{C}{\rho_{abs}}$$

$$V_1 = C/3.1$$

ρ_{abs} : Masse volumique absolue du ciment

V_1 : volume absolue du ciment

En admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise).

On choisira dans le tableau (7), une valeur convenable du coefficient de compacité γ en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Volume absolu des granulats sable et gravier V :

$$V = 1000 \gamma - v_1$$

Si g_2, g_3 sont les pourcentages en volume absolu des granulats sable et gravier. Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$V_2 = g_2 \cdot V$$

$$V_3 = g_3 \cdot V$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ρ_2, ρ_3 les masses de chacun deux sont :

$$P_2 = V_2 \cdot \rho_2$$

$$P_3 = V_3 \cdot \rho_3$$

$\Sigma P_2 + P_3 = G =$ **masse totale du granulat (sable et gravier).**

Après avoir obtenu les résultats du calcul on fera les essais d'études en préparant des gâchées d'essais et en fonctionnant des éprouvettes afin de vérifier la consistance et la résistance du béton.

Exemple pratique :

Béton binaire D=20mm

Données de base

1. Dmax

D'après les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, les règles concernant la dimension Maximale des granulats conduisent à adopter : D=20mm

2. La résistance caractéristique demandée est : $\sigma'_{28} = 35\text{MPa}$

3. L'ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône A=5 cm

4. Dosage en ciment : le ciment employé est de la classe 32.5, mais il a une résistance vraie moyenne à 28 jours $\sigma'_c = 48\text{MPa}$

Les granulats sont de bonne qualité : $G=0.50$ (tableau)

On peut donc calculer C/E par la formule :

$$\sigma'_{28} = G\sigma'_c\left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

$$\text{Donc } 35 = 0.5 \cdot 48(C/E - 0.5) \longrightarrow C/E = 1.95$$

L'abaque donne pour $C/E=1.95$

Et $A=5\text{cm}$ un dosage en ciment $C=375 \text{ kg/m}^3$

5. Dosage en eau : le dosage en eau total sur matériaux secs sera approximativement :

$$E = 375 / 1.95 = 194 \text{ litre}$$

6. Dosage des granulats

Les courbes granulométriques du sable et gravier sont représentés sur le même graphe

Le module de finesse de sable est satisfaisant (2.71)

Le point de brisure A de la courbe de granulaire de référence est à l'abscisse $D/2=10\text{mm}$ (module 41), son ordonnée est $y = 50 - \sqrt{D} + K$

Pour un dosage à 375 kg/m^3 de ciment, un granulat roulé et une vibration normale, on peut adopter un terme correcteur $K=-2$ (tableau 6)

La correction en fonction du de finesse du sable $MF=2.71$ est $K_s=6MF-15=+1$ (tableau 6)

$$\text{En définitive : } Y = 50 - 4.47 - 2 + 1 = 44.5\%$$

La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe de sable au point 5% de la courbe du gravier. Le point de rencontre de ligne de partage avec la courbe de référence donne le partage des pourcentages de sable et de gravier.

$$\% \text{ sable} = 36\%$$

$$\% \text{ gravier} = 64\%$$

En adoptant pour le coefficient de compacité dans le tableau 7 ($D=20$, béton plastique, vibration normale,) la valeur $\gamma = 0.825$

Les volumes absolus des constituants solides (ciment+sable +gravier) sont :

$$\text{Volume total absolu} = 1000\gamma = 825 \text{ litre}$$

$$\text{Volume absolu du ciment} = 375 / 3.1 = 121 \text{ litre}$$

$$\text{Volume absolu des granulats (sable + gravier)} = 825 - 121 = 704 \text{ litre}$$

$$\text{Volume absolu du sable} = 704 \cdot 0.36 = 253 \text{ litres}$$

Volume absolu du gravier = $704 \times 0.64 = 451$ litres

Les masses volumiques absolues sont supposées les suivantes :

Sable 2.54, gravier 2.62

Les dosages en matériaux secs seront donc en KG

Sable : $253 \times 2.54 = 643$ kg

Gravier $451 \times 2.62 = 1182$ kg

Ciment 375 kg

Eau total 195 kg

Densité théorique du béton frais : $= 643 + 1182 + 375 + 195 = 2395$ kg/m³

Il reste à tester la formule de composition par quelques essais et d'apporter suivant les résultats les corrections nécessaires.

Correction sur l'eau

Si la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams obtenu (Aff_{obtenu}) diffère de la valeur de l'affaissement au cône souhaité ($Aff_{souhaité}$) il est nécessaire de modifier la quantité d'eau de la composition de béton. La correction sur la quantité d'eau s'effectue grâce à l'abaque de la figure 4.

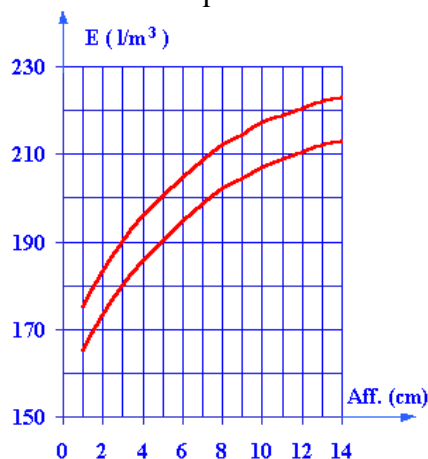


Figure 5.5: Variation de la quantité d'eau en fonction de l'affaissement au cône pour un béton courant.

Pour déterminer la valeur de E corrigée (Fig.5) : Positionner sur le graphe le point caractéristique de la composition effectuée ($E_{utilisée}$ et affaissement au cône obtenu Aff_{obtenu}). Faire passer par ce point une courbe homothétique à celles du diagramme. Pour la valeur de l'affaissement souhaité ($Aff_{souhaité}$) en déduire la quantité d'eau à utiliser ($E_{corrigée}$).

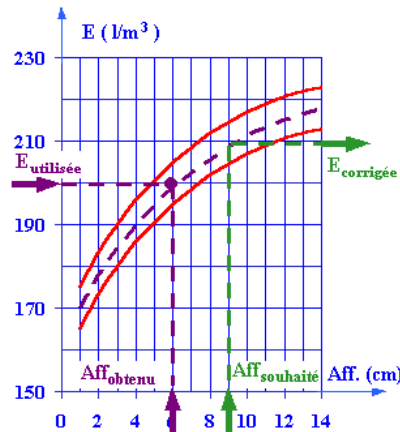


Figure 5.6 : Exemple de détermination de E corrigée.

Exemple : Pour une valeur initiale de E de 200 litres ayant conduit à un affaissement au cône de 6 cm, la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'un affaissement au cône de 9 cm est d'environ 210 litres.

Correction sur la quantité de ciment

Lorsque la résistance obtenue à 28 jours (σ'_{28} réelle) diffère de la résistance souhaitée (σ'_{28}) il convient d'apporter une correction sur le dosage de ciment ($C_{\text{corrigé}}$). Si $C_{\text{réel}}$ et $E_{\text{réelle}}$ sont les dosages initiaux en ciment et en eau effectivement utilisés pour la confection du béton, il est possible d'écrire en fonction des résultats obtenus ou des résultats souhaités deux équations résultant de la formulation de Bolomey :

$$\text{Résultats obtenus : } \sigma'_{28 \text{ réelle}} = G \sigma'_c (C_{\text{réel}}/E_{\text{réelle}} - 0.5)$$

$$\text{Résultats souhaités : } \sigma'_{28} = G \sigma'_c (C_{\text{corrigé}}/E_{\text{réelle}} - 0.5)$$

En combinant les équations précédentes on obtient :

$$\sigma'_{28} / \sigma'_{28 \text{ réelle}} = (C_{\text{corrigé}}/E_{\text{réelle}} - 0.5) / (C_{\text{réel}}/E_{\text{réelle}} - 0.5)$$

D'où la détermination de $C_{\text{corrigé}}$.

14.3 TP N°3 Confection et essais sur mortier

14.3.1 Définition

Le mortier est un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général, le mortier se compose de ciment ou de chaux, de sable, d'eau et d'adjuvant.

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être:

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- Livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

14.3.2 composition du mortier

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

Les liants:

Généralement, on peut utiliser:

- ✓ les ciments normalisés (gris ou blanc);
- ✓ les chaux hydrauliques naturelles;
- ✓ les chaux éteintes

Les sables:

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix.

Ils peuvent être:

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers): (sable de laitier, sable d’oxydes de fer, sable de briques concassés....).

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement 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.

Les différents mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier :

➤ **Les 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.

➤ **Les 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.

➤ **Les 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.

14.3.3 Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

14.3.4 Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

14.3.5 Caractéristiques principales du mortier

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- L'ouvrabilité ;
- La prise ;
- Les résistances mécaniques ;
- Les retraits et gonflements.

14.3.6 Confection du mortier

Principe de la méthode

L'essai consiste à préparer un mortier normal en utilisant un sable normalisé. Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350g±5 g.

14.3.7 Matériel utilisé

- Un malaxeur a deux vitesses.
- Une balance.
- Des bacs.
- Des moules d'éprouvette (4x4x16).
- Une table a choc.

Le sable et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau dans les proportions suivantes : 450g±2 g de ciment / 1350g±5 g de sable normalisé / 225g±1 d'eau, le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.5

14.3.8 Mode d'opérateur

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur
- Verser ensuite le ciment
- Mettre le malaxeur marche à vitesse lente
- Après 30 secondes de malaxage introduire régulièrement le sable pendant 30 s suivantes. Mettre le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1min30s. pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Opération	Introduction l'eau	Introduction Du ciment	Introduction sable		Raclage de la cuve		
durée			30s	30s	30s	15s	1min15s 60s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt Vitesse rapide	

14.3.9 essais sur mortier frais

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

$$\frac{D_r - D_i}{D_r} \times 100$$

Avec : Dr = diamètre final et Di = diamètre initial

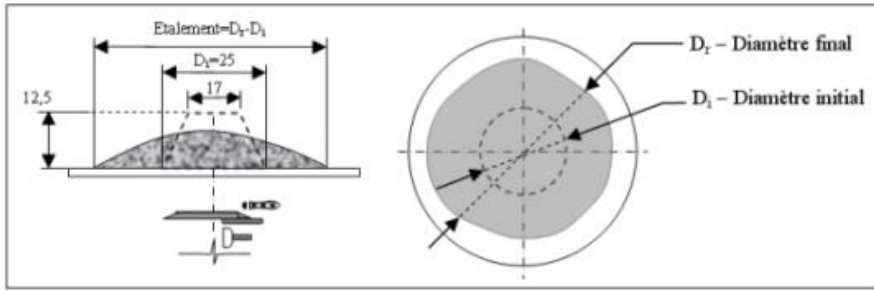


Figure 5.6 : Essai à la table à secousse

b) Le Maniabilimètre B 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.

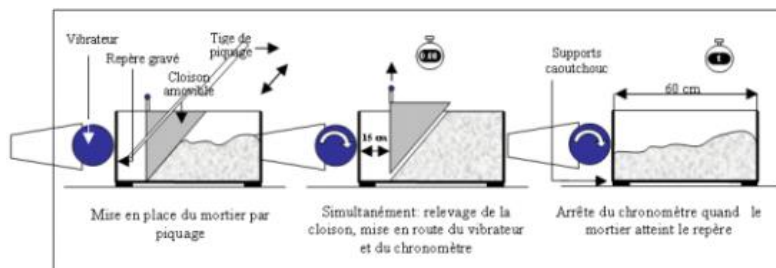


Figure 5.7 : Maniabilimètre LCPC

Principe de l'essai

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

Equipement nécessaire

L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre B" et est schématisé sur la figure ci-dessous. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60 cm x 30 cm x 30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier.

Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 4 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la

paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide (ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil).

c) Essai de l'étalement au Mini Cône de mortier

C'est un essai directement inspiré de l'essai d'affaissement au cône qui sert à tester la consistance des bétons.

Le principe d'essai et la procédure étant les mêmes sauf que les dimensions du cône de mortier sont deux fois plus faibles.

Comme pour l'essai sur béton on mesure l'affaissement du cône de mortier.

Les mortiers seront considérés d'autant plus fluides que leur affaissement sera plus important.

- **Mesure du temps de prise sur mortier (NF P 15-431 et NF 18-356).**

Les essais de prise peuvent être effectués sur mortier. Lorsque l'essai a lieu sur mortier normal, il est gouverné par la norme NF P15-431. Lorsqu'il s'agit d'un adjuvant, l'essai obéit à la norme NF P18-356.

L'appareil utilisé est toujours l'appareil de Vicat, mais surchargé par une masse additionnelle de 700 g. $(300+700) = 1000\text{g}$.

L'aiguille de 1,13mm de diamètre qui pénètre le mortier est alors soumise à une charge de 1000g.

La procédure d'essai est la même que celle décrite où l'aiguille cesse de s'enfoncer sous l'effet de ce chargement et s'arrête à une distance d du fond du moule de 2,5mm.

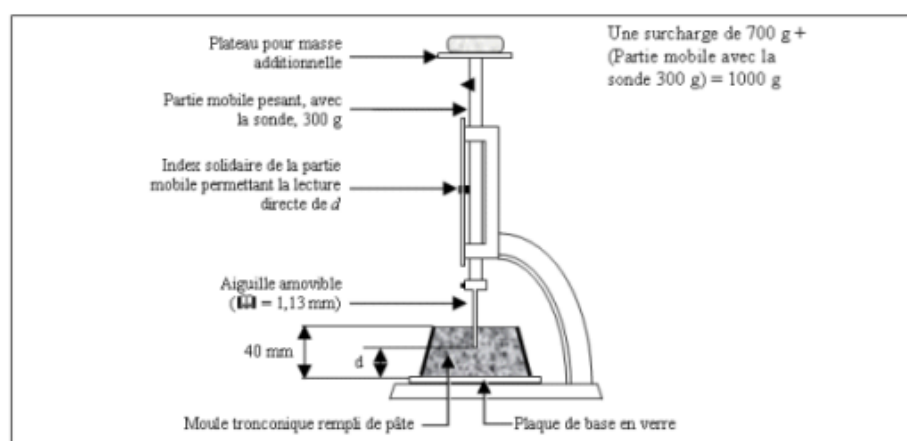


Figure 5.8 : Mesure du temps de prise

14.3.10 essais sur mortier durci

- **Mesure des résistances à la compression et à la traction (EN 1966 - 1)**

Objectif de l'essai

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessous. Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %.

Un malaxeur normalisé.

Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés éprouvettes $4 \times 4 \times 16$).

Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion.

Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{ N/s} \pm 200\text{ N/s}$.

Cette machine est équipée d'un dispositif de compression.

Conduite de l'essai

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 7 jours et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment.

14.4.TP N°4 : Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams SLUMP TEST (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

14.4.1 Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Equipement nécessaire :

L'appareillage est schématisé sur la figure 1, et se compose de 4 éléments :

Un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure

Une plaque d'appui

Une tige de piquage

Un portique de mesure

Conduite de l'essai :

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure).

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté A , mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche.

La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

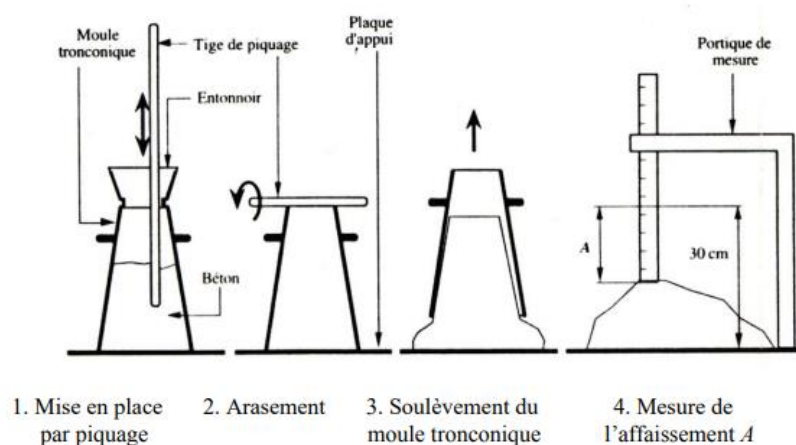


Figure 5.9 : Mesure de l'ouvrabilité de béton (Cône d'Abrams)

14.4.2 Classes d'affaissement

La norme ENV 206 définit 4 classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur la figure 2. Sur cette figure, les rectangles blancs représentent la variation possible d'affaissement correspondant à la classe considérée. Les classes sont notées S1, S2, S3, S4 et appelées classes d'affaissement. S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en anglais : slump test.

La norme NF P 18-305 définit les mêmes classes d'affaissement, mais les note F, P, TP et FL (Ferme, Plastique, Très Plastique et Fluide).

Limites de l'essai d'affaissement:

Grâce aux super plastifiants, on peut réaliser aujourd'hui des bétons très fluides dont l'affaissement au cône dépasse les 25 cm. Le cône ne permet pas de caractériser de manière satisfaisante de telles consistances.

D'une manière générale, il paraît difficile d'obtenir un affaissement supérieur à 15 cm avec des bétons non adjuvés sans rencontrer des problèmes de ségrégation.

D'autre part, il n'est pas possible d'attribuer le même comportement à un béton non adjuvé présentant un affaissement au cône de 10 cm et un béton très dosé en superplastifiant présentant un

affaissement équivalent. Le premier béton sera facile à mettre en place, on dira qu'il est maniable, alors que le béton adjuvanté sera très visqueux et d'un maniement difficile. C'est pourquoi pour des bétons très fortement dosés en superplastifiant il paraît souhaitable de travailler avec des affaissements au moins Déterminer la résistance à la compression d'un béton à partir d'un échantillon sous forme d'éprouvettes, cela consiste donc à la vérification du f_{c28} .

égaux à 15 cm.

De tout cela il ressort que la consistance mesurée par l'essai d'affaissement au cône ne suffit pas pour caractériser la maniabilité d'un béton et qu'il faut toujours préciser la manière dont cet affaissement a été obtenu : notamment le dosage en superplastifiant.

14.5.TPN°5 Essai d'écrasement sur béton

14.5.1 Mesure de la résistance à la compression

But de l'essai :

Cette résistance dépend de :

- la pâte de ciment
- des granulats
- la liaison entre la pâte et les granulats

14.5.2 Principe de l'essai

L'essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques de dimensions : 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur, au nombre de 3 et d'une section de 200 cm². Ces éprouvettes sont surfacées afin d'assurer une bonne planéité et ainsi la perpendicularité, elles auront 28 jours d'existante.

La compression est dite simple et est appliquée à l'axe des éprouvettes.

5.5.3 Surfaçage des éprouvettes

Les surfaces des éprouvettes cylindriques ne sont jamais planes, et pour bien répartir les efforts, les éprouvettes doivent être rectifiées par surfaçage au soufre.

On utilise un mélange de 60% massique de fleur de soufre et de 40% de sable fin ($D < 0.5$ mm) que l'on chauffe dans un récipient approprié (durant l'opération, il est important de ventiler ou d'absorber les vapeurs qui dégagent des odeurs désagréables).

Le dispositif de surfaçage est simple à utiliser, la démarche est la suivante:

- Faire chauffer le mélange de soufre et de sable.
- Huiler le fond de l'appareil.
- Verser une louche du mélange dans la coupelle.

- Descendre aussitôt l'éprouvette sur le mélange tout en l'appuyant sur les guides pour qu'elle soit verticale.
- La maintenir quelques instants jusqu'au durcissement du mélange.
- Recommencer l'opération pour la deuxième face



Figure 5.10: Essai de compression sur une éprouvette de béton (Norme NF EN 12390-3)

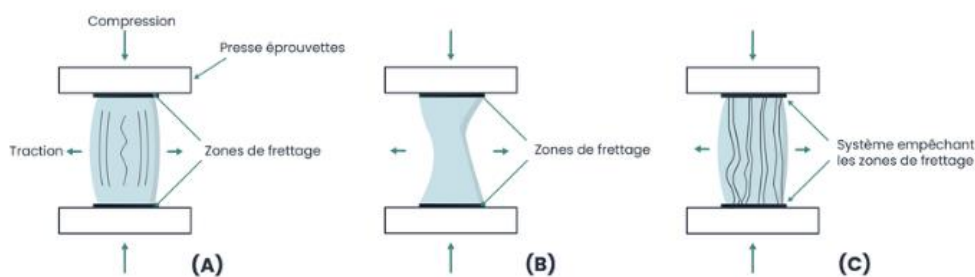


Figure :

Figure 5.11: Essai de compression sur une éprouvette de béton. En (A) et (B) : compression du béton avec frettage. En (C) : compression du béton sans frettage.

Essai par fendage sur une éprouvette de béton (Norme NF P 18-408)

L'essai par fendage du béton est réalisé de la même manière que l'essai de compression, mais l'éprouvette béton sera placée horizontalement afin de la fendre de manière longitudinale. L'essai de fendage permet de mesurer indirectement la **traction** du béton.

On peut réaliser des essais de résistance du béton à "jeune âge", c'est-à-dire au bout de 24 h, 48 h ou 72 h après la mise en œuvre du béton afin de valider la possibilité de décoffrer rapidement certains ouvrages.

On peut tester l'écrasement du béton à 7 jours après le coulage du béton, afin d'avoir une première tendance de la résistance finale. En effet, au bout de 7 jours, un béton classique aura déjà atteint environ deux tiers de sa résistance caractéristique définie par la classe de résistance.

Enfin, l'écrasement le plus important est celui à 28 jours après avoir coulé le béton, car il permet de vérifier que la classe de résistance est respectée, conformément aux normes. On peut considérer qu'à 28 jours, le béton a quasiment atteint sa résistance finale.

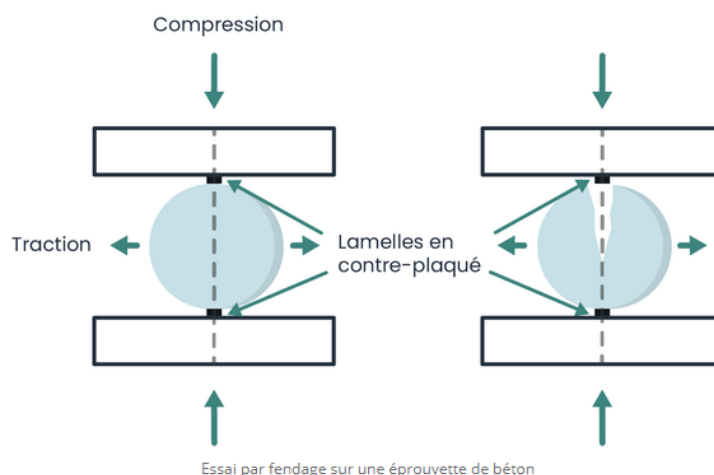


Figure 5.12: Essai par fendage sur une éprouvette de béton

Essai de flexion sur une éprouvette de béton (Norme NF EN 12390-5)

Ce test sert à connaître la résistance à la flexion du béton. On va soumettre des éprouvettes prismatiques à une flexion en appliquant une charge. La charge maximale infligée avant la rupture du béton permet de calculer la résistance à la flexion du béton.

Il existe plusieurs variantes de l'essai de flexion, mais la plus courante est : L'essai de flexion 3 points : l'éprouvette prismatique de béton est placée sur deux appuis et une force graduelle est appliquée au centre de l'éprouvette jusqu'à sa scission. La partie supérieure de l'éprouvette béton subit une compression et la partie inférieure une traction.

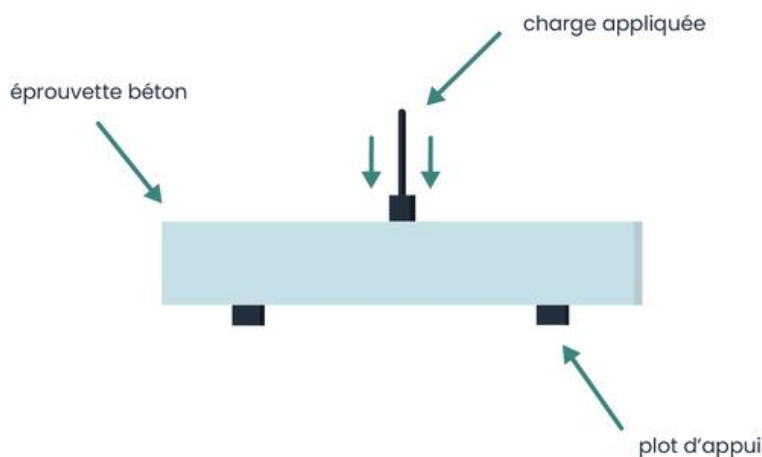


Figure 5.13: Essai de flexion du béton 3 points

14.6.TPN° 6 Essais non destructifs

14.6.1 Essai au sclérométrie

But de l'essai :

Cet essai permet de contrôler les performances mécaniques des bétons et notamment la résistance à la compression notée f_c .

Principe de l'essai :

Il s'agit de mesurer le rebondissement d'une masselotte projetée violemment par un ressort qui se comprime lors de l'application de l'appareil contre la surface du béton à mesurer. La hauteur du rebond de cette masselotte est lue sur une échelle graduée : c'est l'indice sclérométrique noté I_s . Plus la masselotte rebondit haut, plus le béton est résistant.

Conduite de l'essai :

- Les surfaces de béton testées doivent être brutes ; l'enduit, la peinture ainsi que la couche de laitance et les particules étrangères doivent être éliminées par ponçage. → Les zones présentant des nids de gravier, des écaillages, une porosité élevée, des armatures affleurantes doivent être évitées.
- Pour effectuer la mesure on presse l'appareil contre la surface à tester jusqu'au déclenchement de la percussion de la masselotte sur la tige. → Lire directement la valeur indiquée par l'index. Effectuer 5 mesures et en faire la moyenne. La distance entre 2 points de mesure doit être d'au moins 30 mm.
- L'appareil est étalonné pour fonctionner en position horizontale. Dans le cas d'une utilisation sur des surfaces inclinées, une correction doit être effectuée selon l'abaque ci-dessous.

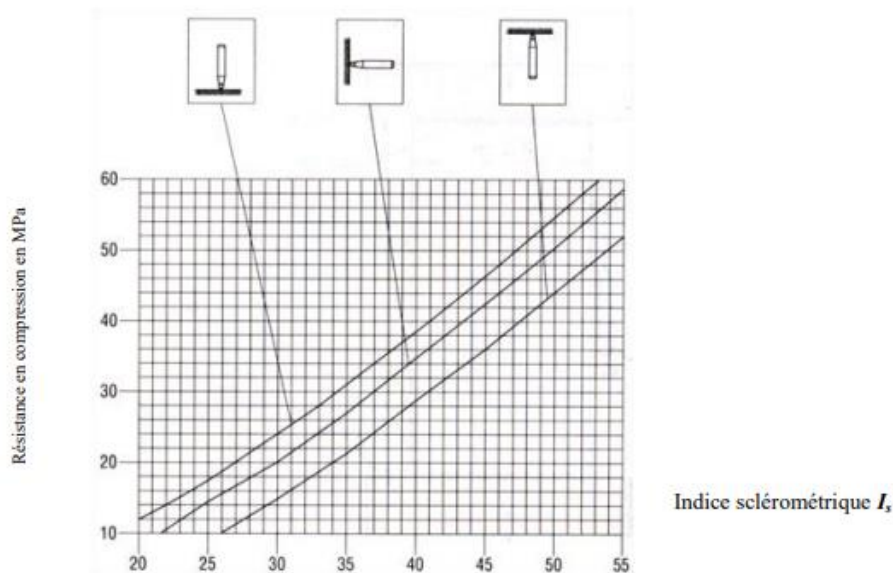


Figure 5.14 : Essai d'indice sclérométrique

14.6.2 Essai d'auscultation sonique NFP 18- 418

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrages. De nombreux facteurs influent sur les résultats :

- la surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et donc l'emploi d'une substance de contact est indispensable (graisse de paraffine),
- Le parcours doit être préférablement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton.
- La vitesse de propagation est sensible à la maturité du béton (état d'avancement de l'hydratation, eau occluse, ...). Cependant, la vitesse des impulsions est peu sensible à la température.
- La présence d'armatures dans le béton perturbe la vitesse de propagation. Il est donc souhaitable et voire indispensable de choisir un parcours d'ondes le moins influencé possible par la présence des d'armatures.

Applications et limites

C'est une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée aussi bien dans le cadre d'un suivi de production qu'en contrôle sur ouvrages. Lorsque de grands écarts de vitesse de propagation sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré. Une vitesse élevée de propagation indique généralement un béton de bonne qualité. Des études réalisées par la RILEM ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression à pour forme :

$$Rc = a.e^{(b \cdot v)}$$

Avec (a, b) coefficients et (v) la vitesse de propagation.

Qualité	Vitesse de propagation m/s	Qualité	Vitesse de propagation m/s
Excellente	Supérieur a 4000	Excellente	Supérieur a 4000
Bonne	3200-4000	Bonne	3200-4000
Douteuse	2500-3200	Douteuse	2500-3200
Mauvaise	1700-2500	Mauvaise	1700-2500
Très mauvaise	Inferieur à 1700	Très mauvaise	Inferieur à 1700

En première approximation, pour des granulats siliceux de qualité courante $D_{max}=16$ mm, et pour un béton de résistance inférieure à 30 MPa, on peut considérer que :

$$Rc = 0.08177e^{(0.00147 \cdot v)}$$

V : Vitesse de propagation.

RC : Résistance à la compression.

De même, 2 corrélations ont été établies entre la vitesse de propagation et le module d'élasticité instantané (E) du béton

$$Eb = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \rho V_m^2$$

$$\text{Et } E_b = 4. H_z^2. L^2. \rho$$

Hz : Fréquence de l'onde en Hertz. Cette fréquence est en fonction des dimensions et de la forme de l'éprouvette. Pour une éprouvette 16x32, on adopte Hz = 6000.

L : longueur de l'éprouvette.

E : module d'élasticité.

μ : Coefficient de Poisson du béton ($\mu = 0.2$).

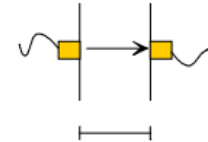
ρ : Masse volumique du béton.

Vm : vitesse moyenne de propagation.

Mesures en transparence :

Cette méthode permet :

- De mettre en évidence des défauts d'homogénéité.
- D'estimer E_b .
- D'estimer la résistance à la compression



Mesures en surface :

Cette méthode permet :

- de déterminer la présence de fissures de masse et éventuellement leur profondeur.
- de mettre en évidence une couche superficielle de moindre qualité (gel, feu, ...).
- de mettre en évidence une mauvaise reprise de bétonnage (sous certaines réserves).

15. BIBLIOGRAPHIE

[1] NF EN 12504-4 (mai 2005). Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son.

[2] DELISLE J.P., ALOU F., « Matériaux de construction 1 », Lausanne, octobre 1978.

[3] JAMAL M., BOULAIDI A., « Rapport bibliographique sur la relation entre le génie civil et la géologie : Matériaux de Construction », Université Mohammed Ier, faculté des sciences – OUJDA -, 2014.

[4] DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Huitième Editions Eyrolles. 1998.

[5] Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables ». Editeur : Holcim (Suisse) SA , 6^{ème} Edition 2015.

[6] BARON J. et SAUTREY R., « Le béton hydraulique », Paris, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 560 p., (1995).

[7] COLLECTION TECHNIQUE CIMBÉTON G10, Fiches techniques, Tome1 : « Les constituants des bétons et des mortiers », Édition septembre 2005.

[8] NEVILLE A.M., « Propriétés des bétons ». Paris, Editions Eyrolles, 824 p., 2000.