

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
X•O٧•٤X •K١E C:٨:١٨ :١٨•X - X:O٤O:t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département de Génie Civil

Polycopie de cours

En : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en génie civil
Niveau : Master I



Technologie du béton

Par : ARIBI Chouaib

Experts :

Pr. BENMOUNAH Abdelbaki

Pr. LUNICI Hakim

Année 2021-2022

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné aux étudiants de master Génie Civil, notamment ceux de la spécialité Matériaux en Génie Civil.

Ce livre met l'accent sur la technologie concrète, ce qui permet de fournir aux étudiants une base de données nécessaire pour ce module.

Le Programme Ministériel

Semestre : 1

Unité d'enseignement : UEF 1.1.2

Matière1 : Technologie du béton

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Définition et constituants du béton ;

Chapitre 2. Ajouts minéraux ;

Chapitre 3. Adjuvants chimiques ;

Chapitre 4. Formulation du béton ;

Chapitre 5. Propriétés du béton a l'état frais et durci ;

Chapitre 6. Mise en œuvre du béton ;

Chapitre 7. Control et qualité du béton ;

Chapitre 8. Progrès récents dans la technologie du béton.

Sommaire

Chapitre 1. Définition et constituants du béton	
I.1. Définition	1
I.2. Constituants du béton.....	1
I.2.1. Ciment.....	1
I.2.2. Agrégats.....	1
1.2.2.1. Le procédé d'élaboration.....	3
1.2.2.2. Différents types des granulats	4
I.3. L'eau de gâchage	5
1.3.1. Rôle de l'eau de gâchage.....	6
1.3.2. Eau acceptable.....	6
Chapitre 2. Ajouts minéraux	
2. Introduction.....	7
2.1. Ajouts réactives.....	7
2.1.1. Laitier granulé de haut fourneau (S).....	7
2.1.2. Matériaux pouzzolaniques	7
2.1.3. Cendres volantes	8
2.1.4. Schiste calciné (T).....	9
2.1.5. Fumée de silice (D).....	9
2.2. Ajouts inertes	10
2.2.1. Calcaire (L, LL)	10
Chapitre 3. Adjuvants chimiques	
3. Définition.....	12
3.1. Classification des adjuvants	12
3.1.1. Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement.....	12
a. Les accélérateurs de prise et de durcissement	12
b. Les retardateurs de prise.....	13
3.1.2. Les adjuvants qui modifient certaine propriété de béton.....	13
a. Les adjuvants entraîneurs d'air.....	13
b. Hydrofuges	14
c. Les rétenteurs	14
3.1.4. Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité de béton	15
a. Les plastifiants réducteurs d'eau	15
b. Les supersplastifiants hauts réducteurs d'eau.....	15
b.1. Superplastifiants à base de sulfonâtes	15
b.2. Super plastifiant à base de carboxylate	16
3.2. Poly carboxylates de première génération.....	16
3.3. Poly carboxylates de deuxième et troisième génération.....	16
3.4. Dernière génération de poly carboxylate.....	17
Chapitre 4 Formulation du béton	
4.1. Introduction	18
4.2. Formulation des bétons	18
4.2.1. Les BPS	20
4.2.2. Les BCP (Béton à Composition Prescrite)	22
4.3. Choix des constituants pour la formulation de béton	23
4.3.1. Granulats (sables, gravillons)	23
4.3.2. Ciment et liant (voire le cours de matériaux de construction).....	25

Sommaire

4.3.3. Adjuvants	27
4.3.4. Eau.....	27
4.4. Quelques méthodes de formulation	29
4.4.1. Essais d'étude - Corrections.....	29
a. Résistance insuffisante.....	29
b. Ajustement de la formule	29
4.4.2. Méthode simplifiée : les abaques de G. Dreux.....	30

Chapitre 5. Propriétés du béton a l'état frais et durci

5.1. Caractéristiques du béton frais	35
5.1.1. Affaissement au cône d'Abrams (béton ordinaire et BHP).....	35
5.1.2. Essai d'écoulement au maniabilimètre LCPC (NF P 18-452)	36
5.1.3. Essai d'étalement (EN12350-5)	37
5.1.4. Temps Vébé (Béton compacté au Rouleau (BCR)).....	38
5.1.5. Masse Volumique et teneur en air	39
5.1.6. Autres essais sur le béton frais	40
5.2. Caractéristiques du béton durci	41
5.1. Le retrait	41

Chapitre 6. Mise en œuvre du béton

6.1. Fabrication du béton.....	42
6.1.1. Approvisionnement et le stockage des constituants	42
6.1.2. Stockage du ciment.....	43
6.1.3. Stockage des granulats	43
6.1.4. Stockage de l'eau.....	44
6.1.5. Stockage des adjuvants.....	44
6.1.6. Dosage des constituants.....	44
6.1.7. Malaxage des constituants.....	44
a. Bétonnières	45
b. Malaxeurs	45
6.2. Transport du béton.....	46
6.2.1. Transport du béton par benne, goulotte, tapis	46
6.2.2. Transport du béton par pompage.....	46
6.2.2.1. Procédé de pompage.....	47
6.2.2.2. Types de pompes à béton	47
6.2.3. Règles à respecter lors du transport.....	48
6.4. Mise en œuvre du béton sur chantier.....	48
6.4.1. Différentes phases de la mise en œuvre.....	48
6.4.2. Approvisionnement du béton	48
6.5. Mise en place.....	49
Etape 1 : préparation de coffrage.....	49
Etape 2 : préparation des armatures.....	49
Etape 3 : Surfaces de reprise de bétonnage	50
Etape 4. Déversement du béton Cas des dalles, planchers, chaussées	50
6.6. Serrage du béton.....	51
a. Vibration interne.....	51
b. Vibration externe par vibrateurs de coffrage.....	51
c. Vibration externe par règle vibrante	52
6.7. Cure du béton	52
6.8. Bétonnage par temps chaud.....	52
6.8.1. Conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons	53

Sommaire

a. Rhéologie.....	54
b. Temps de prise.....	55
c. Résistance mécanique.....	55
d. Fissuration	56
6.8.2. Préconisations pour le bétonnage par temps chaud	56
6.9. Bétonnage par temps froid.....	59
6.9.1. Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais	59
a. Conséquences du gel sur le béton frais.....	60
6.9.2. Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid.....	60
a. Composition du béton.....	61
b. Apport et maintien de chaleur	61
c. Maintien des dispositions de protection	62
d. Cas des ciments à durcissement rapide.....	62
Chapitre 7 Control et qualité du béton	
7.1. Introduction	63
7.2. Résistances caractéristiques à la compression NF P18-406	63
7.2.1. Evolution de la résistance dans le temps	65
7.2.2. Particularités de l'essai de compression et analyses de la rupture	66
• Quelques ruptures singulières.....	67
7.3. Traction par fendage (essai Brésilien) NFP 18-408	68
5.4. Traction par flexion NFP 18-407	68
7.5. Essais non destructifs	69
7.5.1. ESSAI SCLEROMETRIQUE NFP 18-417	69
a. Limites et avantages	69
b. Mesures sur éprouvette 16x32.....	70
c. Mesure sur ouvrage	70
7.5.2. Essai d'auscultation sonique NFP 18-418.....	71
7.5.2.1. Applications et limites.....	71
CHAPITRE 8 : Progrès récents dans la technologie du béton	
8.1. Introduction	74
BIBLIOGRAPHIE.....	76

Liste des tableaux

Liste des figures

Figure 1: Les différentes classes granulaires.....	2
Figure 2. L'eau de gâchage.	5
Figure 3. Structure chimique d'un poly carboxylate de première génération (R=H, CH ₃)	16
Figure 4. Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération de type ether d'alkyl	17
Figure 5. Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération	17
Figure 6. Structure chimique d'un poly carboxylate de troisième génération.....	17
Figure 7: Constituants de béton.....	20
Figure 8: effet de E/C sur la porosité et la compacité de béton.....	28
Figure 9: Abaque de formulation $D_{max} = 12.5$ mm.....	32
Figure 10: Abaque de formulation $D_{max} = 20$ mm	33
Figure 11: Abaque de formulation $D_{max} = 12.5$ mm.....	34
Figure 12: Affaissement au cône d'Abrams.....	36
Figure 13: Essai d'écoulement au maniabilimètre LCPC	37
Figure 12: Relation entre les essais de cône, étalement et maniabilimètre	37
Figure 15: Essai d'étalement	38
Figure 16: Teste Vébé	39
Figure 17: Mesure de la masse volumique de béton	39
Figure 18. Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants.....	53
Figure 19. Évolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.	54
Figure 20. Évolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.	54
Figure 21. Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température	55
Figure 22. Evolution des résistances en compression en fonction de la température.....	56
Figure 23. Abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton).....	57
Figure 24. Début de prise du béton en fonction de la température.....	59
Figure 25. Délai de décoffrage en fonction de la température.	60
Figure 26. Accroissement de la température du béton en fonction de la température des constituants.	61
Figure 27: Statistique des résultats de compression	64
Figure 28: Evolution schématique de l'évolution des résistances à la compression dans le temps	66
Figure 29. Types ruptures correctes	67
Figure 30: Types ruptures incorrectes	67
Figure 31. Abaque de teste sclérométrique	71

Liste des tableaux

Tableau 1. Concentration maximale suggérée dans l'eau de gâchage pour différentes substances courantes	6
Tableau 2. Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant	18
Tableau 3. Effet du transport et de la mise en œuvre sur la formulation	19
Tableau 4. Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1	21
Tableau 5. Classes de consistance du béton selon l'affaissement au cône d'Abrams	22
Tableau 6. Influence des paramètres géométriques sur la dimension maximale des granulats	23
Tableau 7. Caractère des granulats en fonction de l'application	24
Tableau 8. Exemple d'applications préférentielles des principaux ciments et précautions particulières à certains emplois	26
Tableau 9. Degrés d'humidité des granulats	31
Tableau 10. Classe d'affaissement selon EN206 et NF p18-305	36
Tableau 11. Classe de l'étalement	38
Tableau 12. Différents types de retraits	41
Tableau 13. Dosage en ciment en fonction de la résistance caractéristique	65
Tableau 14. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation	72

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

I.1. Définition

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, c'est un matériau qui évolue continuellement dans le temps, depuis le début de sa fabrication. Le béton est habituellement constitué de ciment portland ; de sable ; de gros granulats ; d'eau et l'adjuvant.

L'interaction entre les différents constituants produit une pierre dure ; non homogène ; triphasiques composée d'une phase solide (granulats et hydrates) ; d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse.

- a) La phase solide est donnée par les granulats et les produits d'hydratation du ciment.
- b) La phase liquide (solution interstitielle) est donnée par l'eau de gâchage qui ne participe pas à la formation d'hydrates et l'eau provenant d'une source externe.
- c) La phase gazeuse est produite pendant le malaxage et par l'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

I.2. Constituants du béton

I.2.1. Ciment

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont les propriétés de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

L'hydratation commence dès que le ciment vient en contact avec l'eau. Cette réaction chimique produit des hydrates de ciment (résultat de l'hydratation), qui se forment à la surface de chaque particule de ciment. Ces hydrates croissent et se répandent, jusqu'au moment où ils se lient avec d'autres qui se sont fixés sur des particules de ciment adjacentes ou adhèrent à d'autres substances voisines. En raison de ce processus continu d'hydratation, le mélange se raidit, durcit et acquiert sa résistance mécanique. L'hydratation continue tant que les conditions d'humidité et de température sont favorables (cure) et que les produits de l'hydratation disposent de l'espace nécessaire [10].

I.2.2. Agrégats

Comme trois quarts de volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, selon leur propriété, ils affecteront la durabilité et les

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

performances structurales du béton. En fait, on peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres.

A l'origine, on considérait les granulats comme des matériaux inertes dispersés dans la pâte de ciment, et cela pour des raisons purement économiques. On peut cependant juger les granulats comme des matériaux de construction liés en une masse cohérente par une pâte de ciment. En fait, les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermique et, dans certaines cas, chimiques influencent les performances du béton.

Les granulats pour bétons – norme de définition XP P 18-540 – sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm.

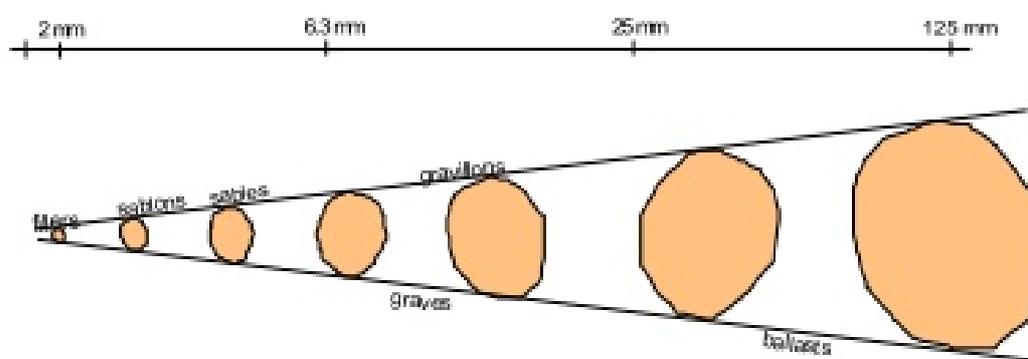


Figure 1: Les différentes classes granulaires.

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice.

La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton.

Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

Les granulats sont classés en fonction de leur origine en trois grandes familles

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

a. Les granulats alluvionnaires ou de carrière

Leurs gisements sont des matériaux meubles, non consolidés. Ils proviennent de lits ou de anciens lits de rivière, les fonds de lacs ou de certains fonds marins. L'extraction des granulats alluvionnaires se fait « à sec » ou « dans l'eau », l'aide de pelles hydrauliques ou de draglines. La technique d'exploitation varie en fonction de la situation de gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique. Ces granulats peuvent être traité suivre à leur extraction. Ils sont concassés si leur granulométrie est trop importante. Cette opération est suivie d'un criblage, d'un lavage et d'un calibrage.

b. Les granulats de roches massives

L'exploitation de cette roche représente la principale filière granulaire, Cette matière est première est représenté dans différent situation géologique : couche plus ou moins massives de roche sédimentaire, massifs de granit, ancienne coulées volcaniques...

Leur extraction se fait généralement à l'explosif. Les roches sont ensuite concassées, lavées et criblées.

c. Les granulats de recyclage et artificiels

Des granulats sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantier de démolition comme le béton ou en recyclant de sous-produits de l'industrie telle le laitier de hauts fourneaux ou les mâchefers [2].

Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours.

1.2.2.1. Le procédé d'élaboration

La production des granulats nécessite deux principaux types d'opération : l'extraction et le traitement.

- L'extraction s'effectue dans des carrières qui utilisent des techniques différentes selon qu'il s'agit de roches ou de granulats alluvionnaires meubles, soit à sec, soit en milieu hydraulique.
- Le traitement est réalisé dans des installations de traitement généralement situées sur le site de la carrière.

Parfois les installations peuvent se situer à un endroit différent du site d'extraction. Dans tous les cas, on trouve les cinq principales étapes de production :

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

- décapage des niveaux non exploitables,
- extraction des matériaux,
- transfert sur les lieux de traitement,
- traitement des granulats pour les produits finis,
- remise en états du site exploité.

1.2.2.2. Différents types des granulats

Pour obtenir un béton de bonne résistance mécanique d'autres critères sont étudiés. Le sable et le gravier doivent être choisis de telle sorte qu'ils soient siliceux, ou calcaire de faut exclure tout granulats altérables, nocif.

Les sables qui décomposent lentement à l'air et à l'eau, les calcaires tendres doivent être éliminés. On a :

a. Granulats courants

On désigne par granulats courant celui qui présente une masse volumique $>2T/m^3$ généralement en utilise des matériaux alluvionnaires : sable et gravier, quand ils se raréfient on utilise des éruptives ou sédimentaires en granulats par concassage :

- **Silex, calcaire dur, silico calcaire** : constituent les matériaux alluvionnaires les plus importants .la densité va de 2,5 à 2,7.
- **Basalte** : est une roche volcanique avec une densité de 2,3 à 3,0.
- **Grès** : sont des grains de silice plus ou moins agglomérés les grès durs de bonne qualité peuvent être comme granulat.
- **Le granite** : ils se composent à l'air humide surtout si la teneur en mica est importante.
- **Laitier** : le laitier donne de granulats de bonne qualité, il est obtenu par le refroidissement brusque dans l'eau ; il peut utiliser comme un sable après le broyage pour améliorer le module de finesse .sa densité est de 2,6.

b. Granulats lourds

Ils sont utilisés dans les bétons lourds dans la construction d'ouvrage nécessitent une protection particulière. On cite le cas accélérateur neutronique, la protection est plus efficace avec l'épaisseur, la barytine (sulfate de baryum) de densité 4,5 ; la magnétite c'est un oxyde de fer de densité 4,5 ; la grainaille de fonte avec une densité de 7,5.

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

c. Granulats légers :

Ils sont utilisés dans les bétons légers pour l'isolation de la construction telle que la préfabrication. On cite les suivantes :

- **Argiles expansées** : Est constitué de l'argile grasse introduite dans un four et ressort après séchage, expansion et cuisson sont formes de modules arrondis à texture interne alvéolaire c'est un granulats prêt à l'emploi, sa densité est faible de 400 à - 800Kg /m³
- **Pierre ponce** : c'est une lave volumique alvéolée de couleur gris-clair.
- **Vermiculite** : Obtenu par refroidissement brusque de silicate genre mica. Elle présent des propriétés ignifuges, donc il est utilisé dans les bétons contre le feu.

I.3. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour produire en mélange de béton ne doit contenir aucune substance qui pourrait avoir un effet négatif appréciable sur la qualité du béton et sur sa durabilité. La présence dans l'eau de gâchage de certains produits, même en très faible concentration, peut nuire sérieusement aux propriétés du béton. Une eau de mauvaise qualité pourra avoir divers effets sur le béton : diminution la résistance mécanique, corrosion des aciers d'armature et de précontrainte, diminution ou accélération le temps de prise, apparition à la surface de taches ou d'efflorescences ; etc. On doit donc veiller à contrôler la qualité de l'eau de gâchage.



Figure 2. L'eau de gâchage.

Chapitre 1. Définition et constituants du béton

1.3.1. Rôle de l'eau de gâchage

Le rôle principal de l'eau de gâchage est de permettre l'hydratation de ciment, qui est responsable de durcissement du béton. La présence de certaines substances dans l'eau peut entraver le processus d'hydratation, et ainsi réduire la résistance et la durabilité du béton. Parmi les impuretés nuisibles on peut citer :

Les huiles ; Les acides ; Les résidus d'égout ; Les produits caustiques ; La matière organique ; Les algues et certains sels ;

Dans certains cas ; dans des autres cas, la présence de ces produits modifie le temps de prise.

1.3.2. Eau acceptable

Le problème de l'eau de mauvaise qualité ne se pose, en fait, pas tellement souvent : on utilise dans la grande majorité des cas de l'eau potable provenant d'un aqueduc. Une eau potable doit d'emblée être considérée comme acceptable pour produire du béton. Toutefois, une eau non potable ne doit pas être rejetée automatiquement. D'une façon générale, une eau claire et n'ayant pas d'odeur ni de goût appréciable pourra être utilisée. Le tableau fournit la liste des principales substances qui nuisent à la qualité du béton et les limites de concentration permise pour chacune (il s'agit de valeur approximative, car il n'existe pas des normes relatives à la contamination de l'eau) [1].

Tableau 1. Concentration maximale suggérée dans l'eau de gâchage pour différentes substances courantes.

Substance	Concentration en mg/l
Bicarbonates (de sodium, potassium, calcium, ou magnésium)	500
Chlorure	20 000
Sels de cuivre, d'étain, de zinc, de plomb et d'arsenic	500
Particule en suspension (argile, silt poussière, etc.)	2000
Carbonates	1000
Sulfates	1000
Sucre	1000
Résidus d'égout	100
Acides	10 000
Sulfures	250
Sels de fer	2500

Chapitre 2. Ajouts minéraux

2. Introduction

Les ajouts sont des produits incorporés au béton et qui ne sont ni des ciments ni des granulats ni de l'eau de gâchage ni des additions. Il s'agit par exemple de fibres, de produits augmentant la viscosité ou la thixotropie, de colorants [6].

La norme NBN EN 206 définit 2 types d'additions : les additions de type I (quasiment inertes), et les additions de type II (à caractère hydraulique latent ou pouzzolanique) ; ces derniers peuvent être prises en compte dans le calcul de la teneur en liant selon le concept du "coefficient k", qui dépend du type d'addition et de sa réactivité chimique.

D'autres concepts sont également décrits dans la norme EN 206 pour tenir compte de l'effet pouzzolanique ou hydraulique latent de certaines additions.

Certains de ces constituants peuvent également être utilisés comme addition au ciment et être ajoutés au béton lors de sa fabrication. Il est ainsi possible de choisir librement les proportions du mélange addition-ciment et de les adapter précisément aux exigences de la formule.

2.1. Ajouts réactives

2.1.1. Laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de la somme de l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de magnésium (MgO) et du dioxyde de silicium (SiO₂). Le restant contient de l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) ainsi que de faibles quantités d'autres composants. Le rapport massique $(CaO + MgO) / (SiO_2)$ doit être supérieur à 1,0.[3]

2.1.2. Matériaux pouzzolaniques

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci. Bien que les cendres volantes et les fumées de silice aient des propriétés pouzzolaniques, leurs spécifications font l'objet d'articles séparés.

Les matériaux pouzzolaniques ne durcissent pas par eux-mêmes lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau mais, lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ dissous, pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistances. Ces composés sont

Chapitre 2. Ajouts minéraux

comparables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matériaux hydrauliques. Les pouzzolanes sont composées essentiellement de SiO₂ réactif et d'Al₂O₃. La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La proportion de CaO réactif est négligeable vis-à-vis du durcissement. La teneur en SiO₂ réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

Les matériaux pouzzolaniques doivent être convenablement préparés, c'est-à-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés ou traités thermiquement et réduits en poudre, en fonction de leur état à la production ou à la livraison. [3]

2.1.3. Cendres volantes

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à l'EN 197-1.

Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcique. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques. La perte au feu des cendres volantes, déterminée conformément à l'EN 196-2, mais avec un temps de calcination de 1 h, ne doit pas excéder 5,0 % en masse [8].

Il est également possible d'accepter des cendres volantes dont la perte au feu est comprise entre 5,0 % et 7,0 % en masse, à condition que les exigences particulières de durabilité, et notamment en ce qui concerne la résistance au gel, et la compatibilité avec les adjuvants, soient respectées, en application des normes et/ou règlements en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton ou du mortier. Dans le cas de cendres volantes dont la perte au feu est comprise entre 5,0 % et 7,0 % en masse, la limite maximale de 7,0 % doit être mentionnée sur l'emballage et/ou sur le bon de livraison du ciment.

NOTE : Si la teneur en sulfate (SO₃) de la cendre volante excède la limite supérieure admissible pour la teneur en sulfate du ciment, cette donnée doit être prise en compte dans la fabrication du ciment en réduisant en conséquence la quantité des constituants contenant des sulfates de calcium.

Chapitre 2. Ajouts minéraux

2.1.4. Schiste calciné (T)

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment SiO₂. En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland.

Déterminée conformément à l'EN 196-1, la résistance à la compression à 28 jours du schiste calciné convenablement broyé doit être supérieure ou égale à 25,0 MPa. Le mortier doit être préparé à partir de schiste calciné finement broyé seul, au lieu du ciment. Les éprouvettes de mortier doivent être démoulées 48 h après leur préparation et conservées en atmosphère humide d'au moins 90 % d'humidité relative jusqu'à l'essai.

Déterminée conformément à l'EN 196-3, sur un mélange contenant 30 % en masse de schiste calciné broyé et 70 % en masse d'un ciment CEM I conforme à l'EN 197-1, l'expansion (stabilité) du schiste calciné ne doit pas dépasser 10 mm.

NOTE : Si la teneur en sulfate (SO₃) du schiste calciné excède la limite supérieure admissible pour la teneur en sulfate du ciment, cette donnée doit être prise en compte dans la fabrication du ciment en réduisant en conséquence la quantité des constituants contenant des sulfates de calcium. [8]

2.1.5. Fumée de silice (D)

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium ; elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe.

La fumée de silice doit satisfaire aux exigences suivantes :

- a) la perte au feu, déterminée conformément à l'EN 196-2, mais avec un temps de calcination de 1 h, doit être inférieure ou égale à 4,0 % en masse.
- b) l'aire massique (BET) de la fumée de silice non traitée, déterminée conformément à l'ISO 9277, doit être supérieure ou égale à 15,0 m²/g.

Lorsqu'elle est destinée à être broyée avec du clinker et du sulfate de calcium, la fumée de silice peut être soit dans son état d'origine, soit densifiée, soit granulée (avec de l'eau). [8]

Chapitre 2. Ajouts minéraux

2.2. Ajouts inertes

Les fillers calcaires et siliceux peuvent améliorer la granulométrie du béton dans le cas d'utilisation de sables pauvres en fines lorsqu'on ne dispose pas de sable correcteur.

Ces fillers sont également utilisés pour confectionner des bétons autoplaçants (BAP). Dans ce cas, leur utilisation permet d'augmenter le volume de pâte nécessaire pour obtenir un écoulement des bétons sans vibration [12].

2.2.1. Calcaire (L, LL)

Le calcaire doit respecter les exigences suivantes :

- a) La teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) calculée à partir de la teneur d'oxyde de calcium (CaO) doit être supérieure ou égale à 75 % en masse.
- b) La teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conformément à l'EN 933-9 ne doit pas être supérieure à 1,20 g/100 g. Cet essai implique que le calcaire soit broyé à une finesse d'environ [13]
5 000 cm^2/g déterminée en termes d'aire massique, conformément à l'EN 196-6 ;
- c) La teneur totale en carbone organique doit, lorsqu'elle est déterminée selon EN 13639 :1999, être conforme à l'un des critères suivants :
 - LL : inférieure à 0,20 % en masse.
 - L : inférieure à 0,50 % en masse. [3]

CHAPITRE 3 : *Adjuvants chimique*

3. Définition

Selon la norme NF EN 934-2, les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton ou mortier à une dose inférieure ou égale à 5% en masse de la teneur en ciment du béton ou mortier, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci [16].

A l'états frais, les adjuvants modifient principalement :

- Les solubilités
- Les vitesses de dissolution
- L'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique.

A l'état durci, les adjuvants contribuent à la maîtrise des caractéristiques finales du béton durable en influençant sa résistance mécanique, aux chocs, et à l'abrasion, ainsi sa résistance au phénomène de gel-dégel, l'aspect esthétique et l'imperméabilité sont aussi maitrisé par les adjuvants [21].

3.1. Classification des adjuvants

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

- **Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement** : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement et retardateurs de prise
- **Les adjuvants qui modifient certaines propriétés de béton** : entraîneurs d'air, hydrofuges de masse et rétenteurs d'eau
- **Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité de béton** : plastifiants réducteurs d'eau, super plastifiants hauts réducteurs d'eau

3.1.1. Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement

a. Les accélérateurs de prise et de durcissement

Ce produit accélère le développement des résistances initiales des bétons. La durée de prise est fréquemment raccourcie à un délai compatible avec la mise en œuvre [5].

Les accélérateurs peuvent être classés selon leur impact sur la prise et le développement de résistance :

- ✚ **Accélérateur de prise** : est un adjuvant qui réduit le temps de prise (réduit le moment où le béton passe de l'état plastique à rigide).
- ✚ **Accélérateur de durcissement** : est un adjuvant qui augmente le taux de développement des résistances à court terme avec ou sans effet sur la prise.

CHAPITRE 3 : *Adjuvants chimique*

Ces produits sont très souvent utilisés dans :

- Bétonnage par temps froid
- Mettre le béton hors gel
- Réduire la période de protection
- Augmenter la rotation des coffrages
- Débuter rapidement les étapes de finition.

b. Les retardateurs de prise

Ce produit intervient lors d'hydratation du ciment, en accroître le temps de passage entre l'état plastique et l'état solide, sans influencer considérablement l'évolution des résistances, il est constaté que les valeurs de résistance sont souvent supérieures du témoin au-delà de 28 jours, même dans un délai plus court.

Ces types des adjuvants permet d'augmenter le temps de début de prise et déréguler le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment ; ces avantages permettent d'élargir les domaines d'application dans plusieurs types des bétons tel que :

- Béton prêt à l'emploi BPE ;
- Bétons pompés ;
- Béton pour ouvrage de masse ;
- Coulage de béton en continu ;
- Coulage de béton par temps chauds ;
- Transports sur longue distance.

3.1.2. Les adjuvants qui modifient certaine propriété de béton

a. Les adjuvants entraîneurs d'air

Vu les contraintes liées par quelques phénomènes tel que le gel-dégel, nécessite de modifier la structure de béton par l'apparition des bulles d'air arrondies dont le diamètre varie entre 10 à 1000 micromètre ; avec une distribution de taille continue, ce qui permet de recouvrir les domaines des mortiers, des ciments et des bétons. Cette technicité est réalisable par l'utilisation des entraîneurs d'air en permettant une diminution de l'eau de gâchage et réduisent ainsi la ségrégation et ressuage. Ces adjuvants améliorent très souvent l'aspect du béton au démoulage. En contrepartie, il est utile de noter que ces

CHAPITRE 3 : *Adjuvants chimique*

produits peuvent être, en très grande quantité, provoquer des baisses de résistances mécaniques.

Les entraîneurs d'air sont pratiquement obligatoires dans les pays froids, pour les routes et les barrages, Ils sont aussi utilisés dans les bétons spéciaux, à savoir le béton lourds et béton léger afin de limiter la ségrégation, même pour la confection de béton classique armé ou non.

b. Hydrofuges

Les agents hydrofuges sont utilisés pour améliorer l'étanchéité des bétons et protègent de l'humidité, en arrêtant l'absorption capillaire. On distingue deux types d'hydrofuges :

➤ **Les hydrofuges de masse**

Ils sont introduits directement dans la bétonnière (lors du malaxage) ou dilués dans l'eau de gâchage, s'il s'agit d'une poudre, avec l'évolution du durcissement, les très fines particules constituant l'hydrofuge gonflent et remplissent les pores du béton, pour une efficacité opérationnelle, le béton doit être compacte et homogène, mais ces types d'hydrofuges ne doivent pas s'employer systématiquement dans la masse du béton mais plutôt dans les enduits de revêtement.

➤ **Les hydrofuges de surface**

Ils sont constitués à base de résine acrylique, vinylique ou silicone, d'autres produits sont aussi à base de bitume. Ces hydrofuges s'appliquent sur le béton durci directement, ce qui permet de former une barrière contre la pénétration d'humidité.

c. Les rétenteurs

Les contraintes du bétonnage par temps chaud imposent de prendre en compte le problème de l'évaporation de l'eau lors de la pose et avant le durcissement total des bétons, ce qui entraîne des conséquences indésirables sur la qualité du béton. Les rétenteurs d'eau qui sont des agents colloïdaux ou dérivés de la cellulose ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau, de réduire les pertes en eau et ainsi d'augmenter l'homogénéité et la stabilité du mélange. Ils réduisent la tendance aux phénomènes de ressuage et de retrait.

CHAPITRE 3 : *Adjuvants chimique*

3.1.4. Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité de béton

Le rôle principal de ces types d'adjuvants est d'améliorer la fluidité des bétons à l'état frais en améliorant leur maniabilité, par conséquent, d'autres améliorations notées comme conséquences secondaires apparaissent à l'état solide telles que la compacité et la résistance mécanique. L'évolution dans ces types des adjuvants est en parallèle avec le développement de secteurs de chimie en générale.

a. Les plastifiants réducteurs d'eau

Sans changer la consistance, un tel ajout adéquat de ces plastifiants réduira la teneur en eau du béton donné, augmentera l'affaissement/l'étalement, ou aura les deux effets.

b. Les supersplastifiants hauts réducteurs d'eau

En anglais ont appelés :«Superplasticisers – high range water reducers », et qui se rapporte à des produits qu'on appelait auparavant en France " fluidifiants".

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement [19].

L'utilisation de superplastifiants permet également de voir un béton compact dans son état durci, ce qui améliore la durabilité, d'où son utilisation dans la formulation de nouveaux types de béton tels que les bétons à hautes performances, les bétons autoplacants.

Il existe différents types de superplastifiants couramment utilisés dans les matériaux de construction, ils sont actuellement très importants dans le marché des matériaux de construction et portent plusieurs noms commerciaux, mais quels que soient ces noms, ils se différencient principalement par la nature des groupements anioniques portés par le polymère, et d'ailleurs ils génèrent une force de répulsion entre les grains de ciment

b.1. Superplastifiants à base de sulfonâtes

Ces matériaux sont des polymères anioniques avec des groupes sulfonâtes SO_3^- à intervalles réguliers. Il existe trois principaux types de superplastifiant à base de

CHAPITRE 3 : Adjuvants chimique

sulfonâtes : les lignosulfonates modifiés, les polynaphtalènes sulfonâtes et les polymélamines sulfonâtes [7].

b.2. Super plastifiant à base de carboxylate

La molécule d'un super plastifiant de type poly carboxylate est composée d'une chaîne principale, qui porte les fonctions carboxylates $-\text{COO}-$, et sur laquelle sont greffées de nombreuses chaînes secondaires.

Les développements dans la recherche scientifique et dans les procédés industriels conduisent au développement de la structure des polycarboxylates, ce développement permet de les classer en trois générations

3.2. Poly carboxylates de première génération

Sont des polymères anioniques et ramifiés obtenus par copolymérisation entre un acide carboxylique insaturé et un ester d'acide carboxylique et de méthacrylate-polyéthylène-glycol (MPEG) [11].

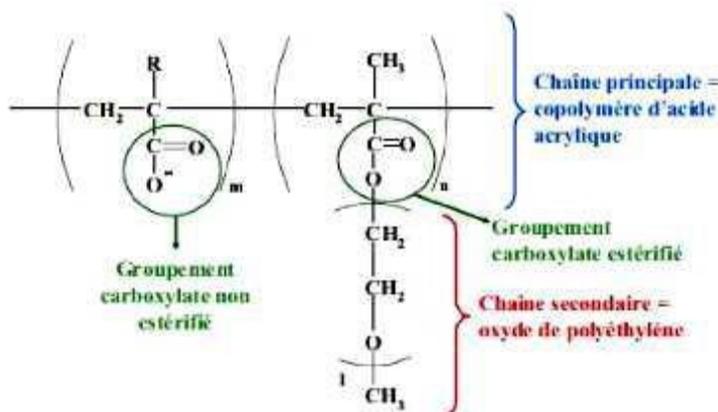


Figure 3. Structure chimique d'un poly carboxylate de première génération ($\text{R}=\text{H}$, CH_3) [12]

3.3. Poly carboxylates de deuxième et troisième génération

Mis au point un polycarboxylate au sein duquel les chaînes secondaires sont greffées à la chaîne principale par des liaisons éthers, La chaîne principale se compose de monomères relativement simples comme l'acide acrylique, l'anhydrite d'acide maléique et la chaîne secondaire est formée par des éthers d'allyle ou de vinyle [18].

CHAPITRE 3 : Adjuvants chimique

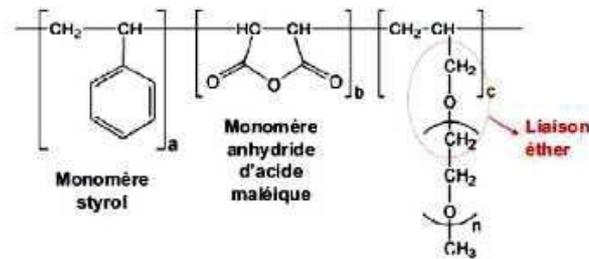


Figure 4. Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération de type ether d'alkyl [15]

L'entreprise GRACE PRODUITS DE CONSTRUCTION (GCP Applied Technologies) a élaboré un poly carboxylate où les chaînes secondaires sont rattachées à chaîne principale par des liaisons amide ou amine.

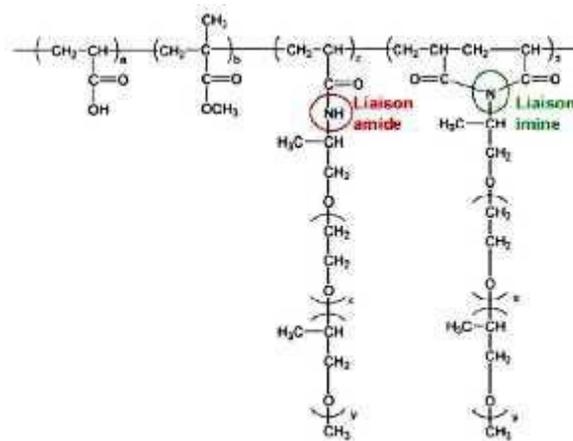


Figure 5. Structure chimique d'un poly carboxylate de deuxième génération

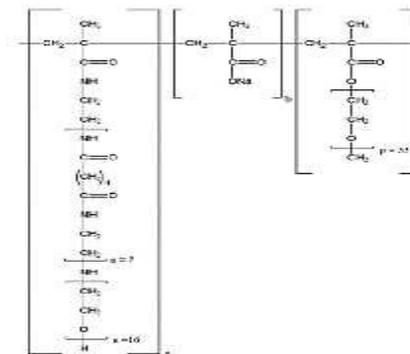


Figure 6. Structure chimique d'un poly carboxylate de troisième génération[19]

3.4. Dernière génération de poly carboxylate

Le polymère de cette génération porte des fonctions carboxylates sur leur chaîne principale et des fonctions amines sur leurs chaînes secondaires, ce qui garantit leur aptitude à être soit un polymère anionique, soit un polymère cationique.

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

4.1. Introduction

Le béton est le matériau composite le plus utilisé pour la construction dans le monde car il est façonnable à volonté, Façonnable à température ambiante, Ne nécessite pas de cuisson, Accessible à tous, Il peut être coulé sur place ou préfaçonné (préfabrication en éléments), par définition, est un matériau composite mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats et de remplir les vides existants entre eux, La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci en formant un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

En bref le béton est un Mélange d'agrégat (sable plus granulat) et de la pâte composée : de ciment, d'eau et d'adjuvant, dont des fourchettes variées comme indique le tableau suivant :

Tableau 2. Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (en %)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (en %)	5-9		9-18	65-85

4.2. Formulation des bétons

La formulation des bétons consiste à intégrer de nombreux critères aussi bien techniques qu'économiques. Ces critères, hypothèses de travail, peuvent être regroupés en cinq classes :

- I.* La qualité de l'environnement de l'ouvrage à réaliser, au cours de son fonctionnement ;
- II.* Les caractéristiques géométriques et la nature de l'ouvrage à réaliser ;
- III.* Les caractères spécifiques du matériau frais, durcissant et durci ;
- IV.* Les conditions de fabrication et les moyens de mise en œuvre et transport disponibles sur le site, ainsi les délais de réalisation, comme indique le tableau suivant :

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Tableau 3. Effet du transport et de la mise en œuvre sur la formulation

Mode de transport	Appellation	Effet sur la formulation
Suspension dans l'air	Béton projeté par voie sèche	Corriger des pertes de mise en œuvre, conserver des gros granulats pour le compactage
	Béton projeté par voie humide	
Pompage	Béton pompé	Seuil de viscosité et viscosité apparente faibles. Fuseau granulaire continu
Tapis roulant	Sans	Béton peu ségrégable, réhomogénéisation obligatoire après transport
Camion plateau		
Mode de serrage	Appellation	Effet sur la formulation
Compactage	Béton compacté au rouleau, béton damé, pressé	Béton très ferme de granularité et de teneur en fines adaptées à la technique
Accélération	Centrifugé	
Vibration	Béton vibré ou pervibré	Béton ferme à plastique de compacité de squelette maximale
	Béton extrudé, à démoulage immédiat	Béton ferme, cohésion forte
Gravité (sans Ségrégation)	Autoplaçant, auto nivelant	Béton fluidifié, riche en éléments fins avec ou sans agent viscosant
Gravité	Coulé sous l'eau	Béton fluide avec antidéflavant (agent de cohésion)
Gravité (sédimentation rapide)	Béton de remplissage	Forte perméabilité du squelette

V. La qualité des matériaux à disposition localement.

A partir de ces cinq classes de critères, il est nécessaire d'établir les spécifications du matériau, dont certaines ne sont pas toujours parfaitement compatibles. Le dosage n'est pas déterminé par un calcul théorique absolu, mais il résulte de l'application de règles dont la pertinence a été appréciée en cours d'utilisation et vérifiée expérimentalement. Dans ce cadre, la norme NF EN 206-1 prévoit les dosages minimaux en ciment et additions minérales, dit liant équivalent, selon les classes d'exposition du béton, et en fonction des actions environnementales (humidité, milieu marin, attaque chimique, cycles de gel-dégel). Par ailleurs, le dosage en ciment a une influence directe sur les résistances mécaniques du béton. Toutes autres conditions égales par ailleurs, on peut dire que dans une certaine plage (300 à 400 kg/m³ de béton) la résistance est sensiblement proportionnelle au dosage en ciment. En générale, les teneurs des constituants ont aussi des influences sur la résistance et la durabilité des bétons comme indique la figure suivante :

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

La norme EN 206 (équivalent de la norme Algérienne NA-16002) s'applique aux bétons de structure, qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier. Elle s'inscrit dans la continuité de la norme française XP P 18-305. Cette dernière distingue deux types de bétons

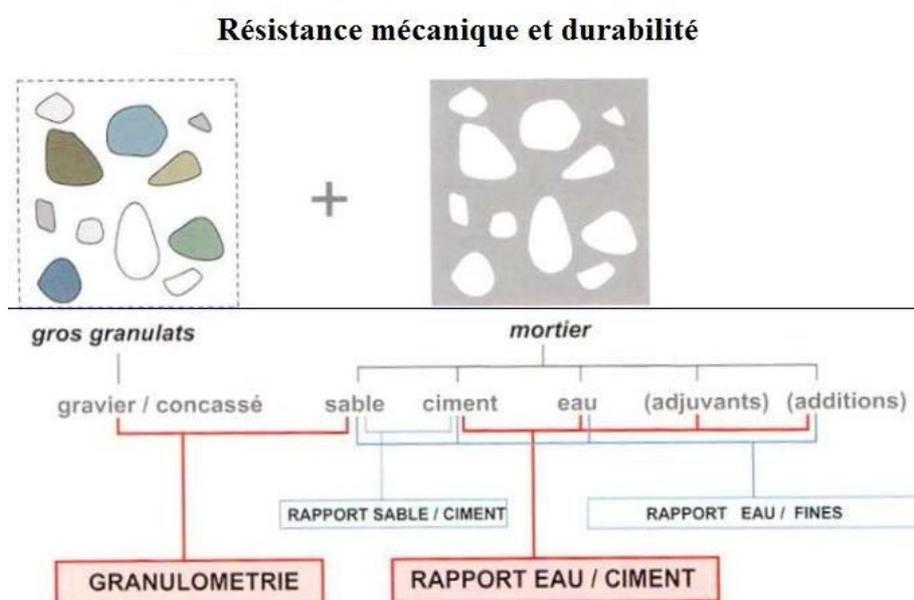


Figure 7: Constituants de béton

4.2.1. Les BPS

(Béton à Propriétés Spécifiées) sont fabriqués par les centrales de BPE.

Il s'agit de béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences. Les spécifications de base sont les suivantes.

- ✓ La conformité à la norme NF EN 206-1.
- ✓ La classe d'exposition (voir tableau).

Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Tableau 4. Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
	XC1 Sec ou humide en permanence	
	XC2 Humide, rarement sec	
	XC3 Humidité modérée	
XC4 Alternance d'humidité et de séchage		
XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage
	XD1 Humidité modérée	
	XD2 Humide, rarement sec	
	XD3 Alternance d'humidité et de séchage	
XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin
	XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
	XS2 Immérgé en permanence	
	XS3 Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns	
XF	Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	XF1 Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2 Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3 Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
	XF4 Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA	Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	XA1 Environnement à faible agressivité chimique	
	XA2 Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3 Environnement à forte agressivité chimique	

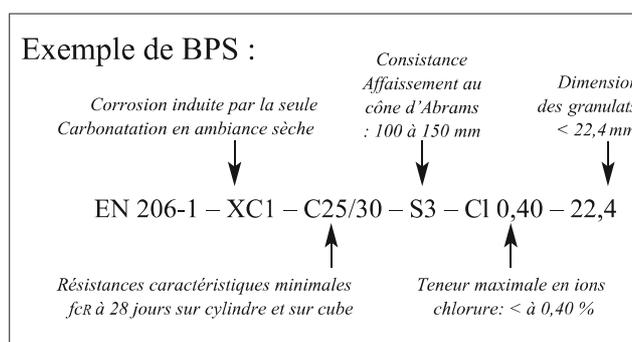
CHAPITRE 4 : Formulation du béton

- ✓ La classe de résistance à la compression avec une limite inférieure à spécifier en fonction de la classe d'exposition. Le prescripteur reste libre de spécifier une classe de résistance plus élevée en fonction des caractéristiques et des contraintes de l'ouvrage.
- ✓ La classes de consistance du béton selon la mesure la plus usuelle d'affaissement au cône d'Abrams

Tableau 5. Classes de consistance du béton selon l'affaissement au cône d'Abrams

Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (en mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	≥ 220

- ✓ La classe de chlorure spécifiant la teneur maximale en ions chlore rapportée à la masse de ciment.
- ✓ La dimension maximale des granulats.



Le client peut également, après accord avec le fournisseur, spécifier des caractères complémentaires tels que la nature et la provenance des constituants, ou toute spécification relative aux propriétés à l'état frais (pompabilité, etc.).

4.2.2. Les BCP (Béton à Composition Prescrite)

Sont principalement fabriqués sur chantier. Soit-ils résultent d'une étude avec composition détaillée et spécifiée au producteur par le client-prescripteur, soit ils sont définis par une norme. Les informations minimales pour définir les BCP sont : le dosage en ciment, le type et la classe de résistance du ciment, le rapport E/C ou la consistance du béton, la dimension maximale nominale des granulats ainsi que leur type, leur catégorie et leur teneur maximale en chlorures et, le cas échéant, le type, la quantité et l'origine des adjuvants et additions. Ce type de béton est réservé à certains ouvrages simples de bâtiment, le producteur est responsable de fournir un béton respectant la composition prescrite. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur (ils incombent au prescripteur ou à l'utilisateur).

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

4.3. Choix des constituants pour la formulation de béton

4.3.1. Granulats (sables, gravillons)

Les granulats assurent le squelette du béton, et permettent de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées au moindre coût. Ils doivent être chimiquement inertes au ciment, à l'eau et à l'air.

En général, pour les granulats utilisés, des granulats constitués uniquement de sable et de gravier sont utilisés, l'ouvrabilité du béton dépend fortement de ces caractéristiques dont les principales sont :

- ✓ La granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules
- ✓ La résistance mécanique (compression, traction et module)
- ✓ La densité relative, la masse volumique
- ✓ L'absorption, la porosité et la teneur en humidité
- ✓ La présence de matières nuisibles
- ✓ La résistance aux cycles de gel et dégel
- ✓ La résistance à l'abrasion et aux chocs

Pour déterminer la dimension maximale des granulats, il faut prendre en considération les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler)

Tableau 6. Influence des paramètres géométriques sur la dimension maximale des granulats [9]

Caractère Géométrique	Paramètre	Effets sur D_{max}
Volume	Volume	Maximise D_{max}
Épaisseur	Épaisseur minimale E_m	$D_{max} < E_m / 5$
Enrobage et armatures	Distance minimale entre l'armature et le parement e_c	$e_c \sup (e_{env} ; 1,5 D_{max})$ $e_{env}^{(*)}$
	Distance verticale entre deux armatures e_v	$D_{max} < 1,5 e_v$
	Taille de la maille $a \times b$	$D_{max} < ab / (a + b)$
	Surface d'armatures et de gaines à enrober	Minimise la proportion de D_{max}
(*) e_{env} : distance conditionnée par les conditions environnementales, le règlement de calcul du projet et éventuellement le CCTP (cahier des clauses techniques particulières).		

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Deux facteurs ayant une influence sur les propriétés du béton, la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S, les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2; la granulométrie est très souvent continue, le type de granulats est sélectionné en fonction de domaine d'application comme indique le tableau ci-après

Tableau 7. Caractère des granulats en fonction de l'application [9]

Application	Caractères principaux recherchés (1) (2)		
	Gravillon	Sable	Fillers
Béton pour chaussée : couche de fondation de base et de liaison, couche de roulement (liant hydrocarboné)	Dureté (LA), résistance à l'attrition (MDE)	Propreté PS ou VB	Propreté VBF, IVR Δ TBA Blaine
	Granularité, angularité, sensibilité au gel, sulfates solubles		
Béton pour chaussée : couche de roulement	Dureté (LA), résistance à l'attrition (MDE), résistance au polissage, Absorption d'eau	Module de finesse (MF), propreté PS ou VB	Propreté VBF
	Absorption d'eau (<i>Ab</i>), teneur en sulfates, teneur en chlorures, sensibilité au gel, granularité		
Bétons hydrauliques pour ouvrages courants, autre que pour chaussées (3)	Dureté (LA), sensibilité au gel, propreté, aplatissement	Module de finesse (MF), propreté PS ou VB	Granularité, propreté VBF
	Granularité, absorption d'eau (<i>Ab</i>), réaction alcali-silice, sulfates et sulfates solubles dans l'eau, chlorures		
Bétons hydrauliques de hautes performances	Idem granulats pour bétons hydrauliques Catégorie A pour toutes caractéristiques suivant les propriétés recherchées (3)		
Bétons lourds, légers	Densités adaptées		
Bétons teintés lisses	Sans incidence	Couleur de fond donnée par les fines ou par des pigments	
Bétons désactivés	Couleur, granularité		
<p>(1) Se référer aux normes en vigueur.</p> <p>(2) ΔTBA température de ramollissement des produits bitumineux (méthode bille et anneau), IVR indice des vides de Rigden ; LA : essai Los Angeles ; VB valeur de bleu ; MDE essai micro-Deval sous eau ; VBF valeur de bleu du filler.</p> <p>(3) Quatre catégories (A, B, C ou D) désignant les caractéristiques dans l'ordre décroissant.</p>			

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

4.3.2. Ciment et liant (voire le cours de matériaux de construction)

La norme NF EN 206-1 fournit les dosages minimaux à respecter selon les classes d'exposition des bétons, en fonction des actions environnementales (humidité, milieu marin, agressions chimiques, cycles gel-dégel), en utilise différente classe de ciment ou on utilise CEM I avec additions minérales, soit inerte ou soit actives, on parle dans ce cas de liant équivalent, dont le des quantités et qualités dépendent à la fois des plusieurs paramètre tel que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les actions environnementales auxquelles le béton est soumis recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs), et de la nature des autres composants.

Le liant équivalent L s'exprime alors par :

$$L = C + kA \text{ ou } L = C + C'$$

Pour la valeur de k se reporter à la norme EN 206-1. Cette valeur est non seulement fonction de l'addition mais peut être aussi fonction des conditions d'exposition des ouvrages et de la nature du ciment utilisé. Par ailleurs, elle ne porte que sur une quantité limitée d'addition.

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Tableau 8. Exemple d'applications préférentielles des principaux ciments et précautions particulières à certains emplois

Types	Classe	Observations	Applications préférentielles	Emplois nécessitant des précautions particulières
CEM I	52,5 52,5 R	Forte chaleur d'hydratation Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m Généralement mouture fine	*Ouvrages nécessitant des résistances finales élevées *Béton de hautes performances *Découffrage rapide ou par temps froid (classe R)	Bétonnage par temps chaud
				Béton en grande masse Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Travaux nécessitant généralement une cure soignée surtout en cas de vent de soleil ou d'utilisation en faible épaisseur
	42,5 42,5 R	Chaleur d'hydratation élevée Temps de prise réduit mais > 1 h. Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m	*Béton armé, coulé en place ou préfabriqué, Découffrage très rapide *Recommandé pour la précontrainte par prétension *Béton étuvé ou auto étuvé	Béton précontraint si CP (norme P 15 318)
CEM II/A- X	52,5 52,5 R	Chaleur d'hydratation élevée Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m	*Béton armé, coulé en place ou préfabriqué, découffrage très rapide Béton précontraint *Ouvrages nécessitant des résistances finales élevées *Béton de hautes performances	Bétonnage par temps chaud
	52,5 52,5 R	Formulations très spécifiques 5 à 10 % de fumées de silice (Finesse Blaine : 5 000 à 6 000 cm ² /g). Utilisation avec fluidifiant E/C < 0,4. Bétons visqueux	*Bétons à hautes performances, ouvrages exceptionnels vis-à-vis des sollicitations mécaniques et de la durabilité *Béton précontraint si CP (norme P 15 318) *Bétons fluides et pompable	Bétonnage par temps chaud Travaux en grande masse Bétons visqueux imposant une mise en œuvre adaptée Tous travaux, la cure est impérative et immédiate
CEM II/AX ou CEM II/B-X	42,5 42,5 R	Moins réactif qu'un CPA CEM I Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m	*Béton armé, coulé en place *Très employés en préfabrication *Béton précontraint si CP (norme P 15 318) *Découffrage rapide (classe R) *Béton étuvé ou autoétuvé	Travaux en grandes masses
	32,5 32,5 R	Le plus couramment utilisé Temps de prise réduit mais > 1 h 30 min Retrait réduit < 800 µm/m	*Béton armé ou non, ouvrages courants *Fondations et travaux souterrains en milieu non agressif *Dallages et sols industriels *Maçonneries *Stabilisation des sols	Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Bétonnage si T < 5 °C
CEM III/A	32,5 42,5 52,5	Faible chaleur d'hydratation Temps de prise > à 1 h 30 min pour la classe 32,5, 1 h pour les classes 42,5 et 52,5	*Travaux souterrains en milieux agressifs *Terrains gypseux, eaux : pures, acides, industrielles. *Ouvrages en milieu sulfaté *Ouvrages à la mer si conforme à la norme P 15 317 *Béton de masse, bétons armés ou non *Stabilisation des sols	En milieu très agressif nécessite des protections supplémentaires
CEM III/B	32,5 42,5 52,5	Des sels solubles peuvent être incorporés un accélérateur de prise agréé		Ouvrages de faible épaisseur exposés aux eaux pures Travaux en élévation nécessitant une cure
CEM III/C	32,5	Très faible chaleur d'hydratation Temps de prise > à 1 h 30 min Des sels solubles peuvent être incorporés On peut par temps froid utiliser un accélérateur de prise agréé		Bétonnage par temps chaud et sec Protection de surface pour les réservoirs alimentaires

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

4.3.3. Adjuvants (voir chapitre 3)

4.3.4. Eau

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton, Théoriquement, 25 à 30 litres d'eau suffisent théoriquement à hydrater 100 kg de ciment, mais il faut prendre en considération l'eau qui sera absorbé par les agrégats, et la nécessité d'ajouter une quantité d'eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, dans la formulation, on parle dans ce cas sur l'eau efficace (E_{eff}), qui s'applique à la partie de l'eau totale, dans un m^3 de béton, disponible pour l'hydratation du ciment. C'est aussi l'eau totale diminuée de celle absorbée par les granulats. En effet, l'eau qui est absorbée par les granulats ne participe ni à l'ouvrabilité ni à l'hydratation.

$$E_{eff} = E_a + G(w_g - Ab_g) + S(w_s - Ab_s) + A'(w_A - Ab_A) + a_w a$$

E_a (kg/m^3) : Quantité de l'eau d'apport (gâchage) ;

G (kg/m^3) : Quantité de chaque gravillon ($G_1, G_2...$ s'il y en a plusieurs) ;

S (kg/m^3) : Quantité de chaque sable ($S_1, S_2...$ s'il y en a plusieurs) ;

a (kg/m^3) : Quantité de chaque adjuvant ($a_1, a_2...$ s'il y en a plusieurs) ;

A' (kg/m^3) : Quantité de chaque addition ($A_1', A_2' ...$ s'il y en a plusieurs) ;

w_g, w_s, etc : Teneur en eau totale de chaque constituant (granulats, sables, etc) ;

Ab_g, Ab_s : Teneur en eau absorbée par les constituants (granulats, etc.) selon la norme NF EN 1097-6.

Une augmentation du dosage en l'eau au-delà de l'optimum entraîne une diminution de la compression / flexion résistance, diminution de la compacité, augmentation de la porosité, augmentation de la perméabilité et augmentation de la perméabilité, ce qui provoque des conséquences directes sur la qualité générale du béton, à l'état frais par ségrégation par exemple, et à l'état durci par plus grande pénétration des agents extérieurs, défauts de parements et sensibilité à l'évaporation ...etc.

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

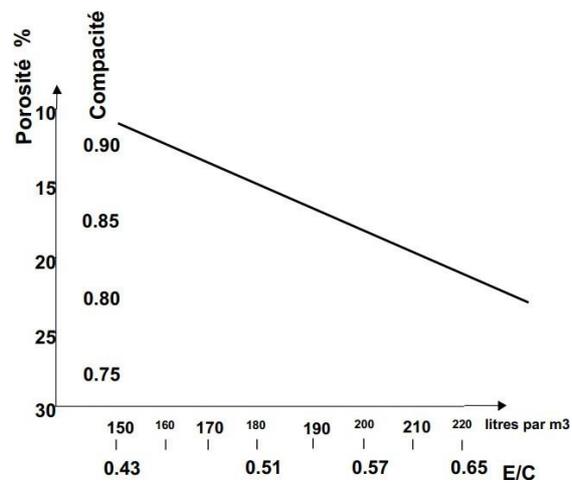


Figure 8: effet de E/C sur la porosité et la compacité de béton

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

4.4. Quelques méthodes de formulation (voir le TD)

4.4.1. Essais d'étude - Corrections

La formule de composition étant déterminée, on procède alors à réaliser divers essais d'étude pour contrôler les résistances et certains critères essentiels afin de corriger éventuellement la formule ainsi proposée.

Pour effectuer ces corrections, on observera les différents cas suivants :

a. Résistance insuffisante

Si la résistance est insuffisante, il faut soit :

- ✓ Augmenter le dosage en ciment
- ✓ Diminuer le dosage en eau mais pour maintenir une plasticité suffisante il faut faire appel éventuellement à un adjuvant fluidifiant,
- ✓ Diminuer le dosage en éléments fins du sable au profit des éléments plus gros (majoration du module de finesse) mais dans ce cas, attention à la diminution de l'ouvrabilité et à l'augmentation de la ségrégabilité,
- ✓ Augmenter le rapport G/S en diminuant un peu la quantité du sable au profit du gravier ; il suffit d'abaisser un peu le point A de la courbe de référence dans le cas de la méthode de DREUX- GORISSE

Des essais d'écrasement des éprouvettes doivent être effectués afin d'adopter la correction satisfaisante à retenir.

b. Ajustement de la formule

Si la masse totale des granulats est P, si la masse du ciment est C et le dosage en eau est E (en litres/m³ sur matériaux secs), la densité du m³ de béton frais serait théoriquement :

$$\Delta_0 = (P + C + E) / 1000$$

On peut en pesant une ou plusieurs éprouvettes mesurer la densité

réelle (Δ) du béton frais en œuvre. Ainsi :

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

- ✓ Si $\Delta \approx \Delta_0$, la formule étudiée correspond bien au m^3 ,
- ✓ Si $\Delta < \Delta_0$, la formule étudiée donne un peu plus d'un mètre cube (m^3) de béton et le dosage réel en ciment se trouve inférieur à celui théoriquement prévu et vice versa,

La correction à apporter sur la masse totale des granulats est alors :

$$x = 1\,000 (\Delta - \Delta_0) \text{ (en kg)}$$

- ✓ Si $\Delta - \Delta_0 < 0$, la correction est à déduire car la formule proposée faisait plus du m^3 ,
- ✓ Si $\Delta - \Delta_0 > 0$, la correction est à ajouter car la formule proposée faisait alors moins du m^3

Sur la masse de chacun des granulats dont les % sont g_1, g_2, g_3 et les masses P_1, P_2, P_3 ; la correction à apporter sera : $(X P_1) / g_1 \quad (X P_2) / g_2 \quad (X P_3) / g_3$

4.4.2. Méthode simplifiée : les abaques de G. Dreux

Cette méthode donne des dosages en volume et non pas en poids, car elle est conçue pour des petits chantiers qui ne sont pas équipés de centrales à bascule, mais de simples bétonnières où les granulats sont mesurés en volume (à la caisse ou à la brouette), Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 MPa et 40 MPa, ces abaques permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués [17].

Les abaques donnent une indication sur la réduction d'eau procurée par l'emploi d'un adjuvant de type plastifiant réducteur d'eau, mais il est évident que la valeur réelle de réduction d'eau sera à déterminer selon l'adjuvant utilisé et son dosage.

Pour tenir compte de l'apport d'eau dû au degré d'humidité des granulats, les abaques introduisent un correctif défini dans le tableau suivant

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Tableau 9. Degrés d'humidité des granulats

		Sec	Humide	Mouillé	Trempé
Aspect		Mat Un peu poussiéreux	Brillant Légère adhérence sur la main	Très humide Dépôt d'eau sur la main	L'eau ruisselle sur les granulats qui sont saturés
% d'eau	Sables	0 à 3 %	4 à 7 %	8 à 11 %	12 à 15 %
	Gravillons	1 %	3 %	5 %	6 %

Le dosage d'un béton s'obtient par lecture directe (en fonction de la résistance en bar, et la plasticité désirée) sur l'un des abaques qui sont en fonction dimension des granulats, on distingue : D = 12,5 mm (figure 9), D = 16 mm (figure 10), D = 20 mm (figure 11).

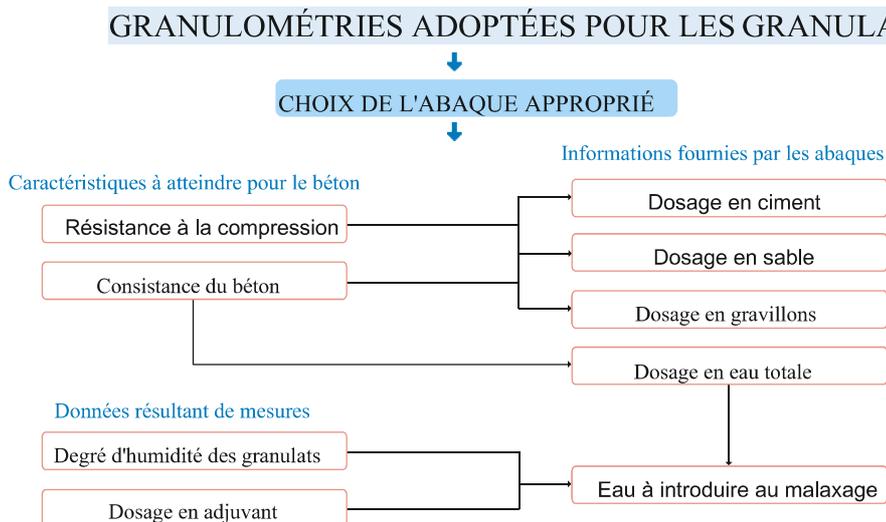
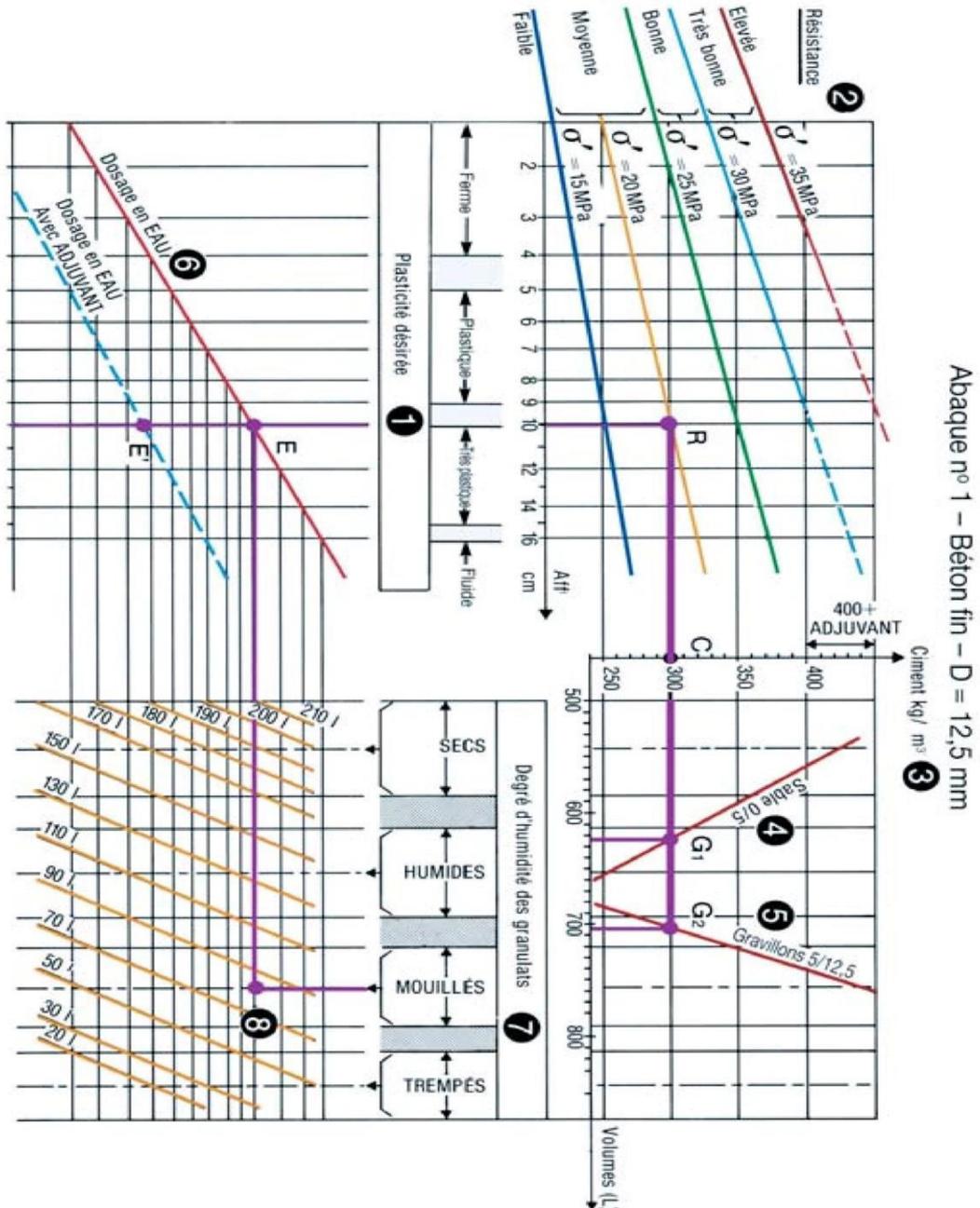


Figure 8 : Utilisation des abaques de Dreux [9]

CHAPITRE 4 : Formulation du béton



On désire :

1. Un béton très plastique (affaissement 10cm)
2. Une résistance moyenne: 20 MPa (environ)
3. Ciment (classe 32,5)300kg/m²
4. Sable 0/4mm à l'état sec625 litres

5. Gravillons 5,6/12,5mm705 litres
6. Dosage en eau – point E
7. On suppose que les granulats sont « mouillés »
8. La lecture sur la grille donne 80 litres d'eau environ à ajouter.

Figure 9: Abaque de formulation $D_{\max} = 12,5 \text{ mm}$

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

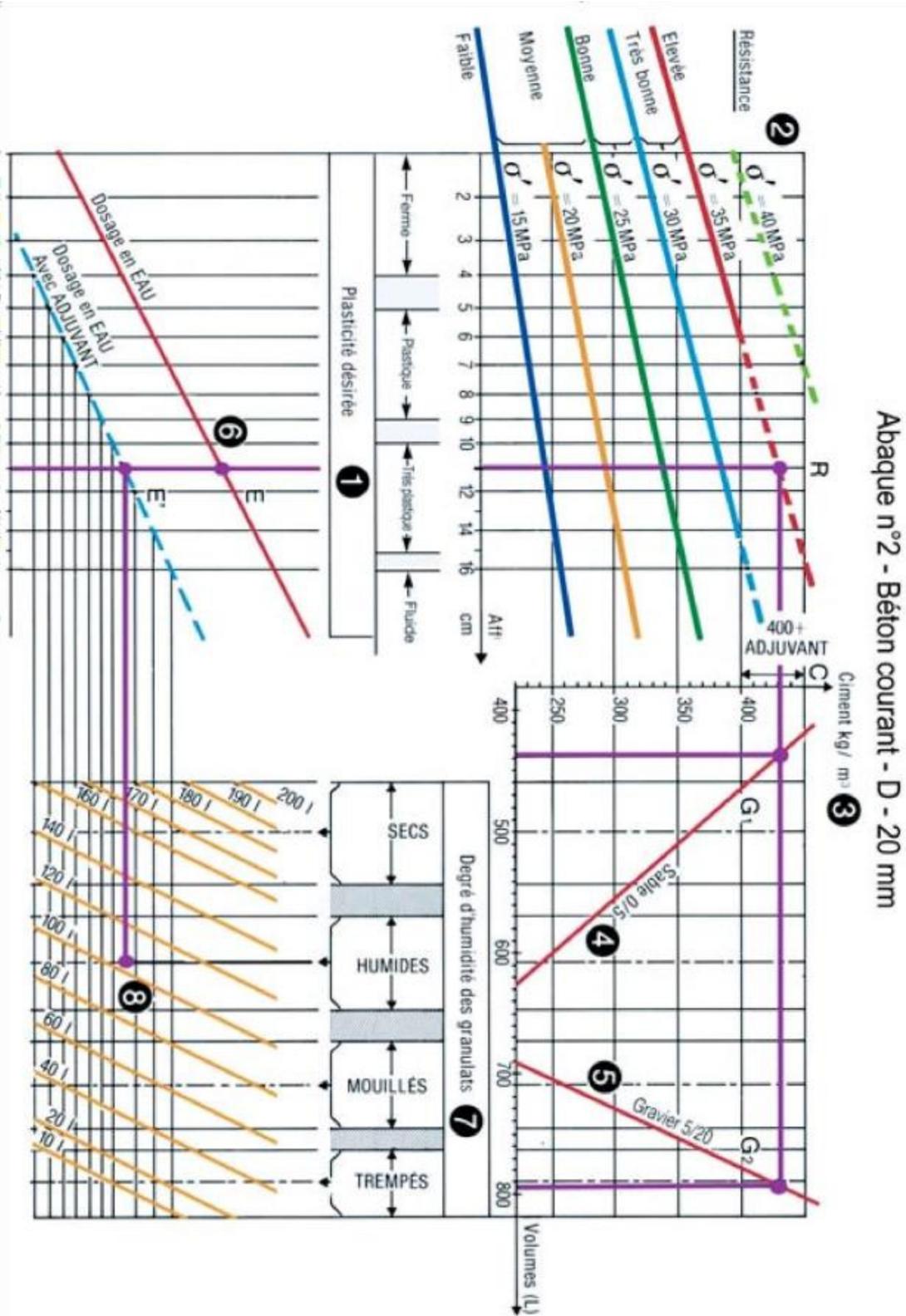


Figure 10: Abaque de formulation $D_{\max} = 20 \text{ mm}$

CHAPITRE 4 : Formulation du béton

Abaque n°3 – Béton normal – D = 25 mm ; Ciment de classe 32,5

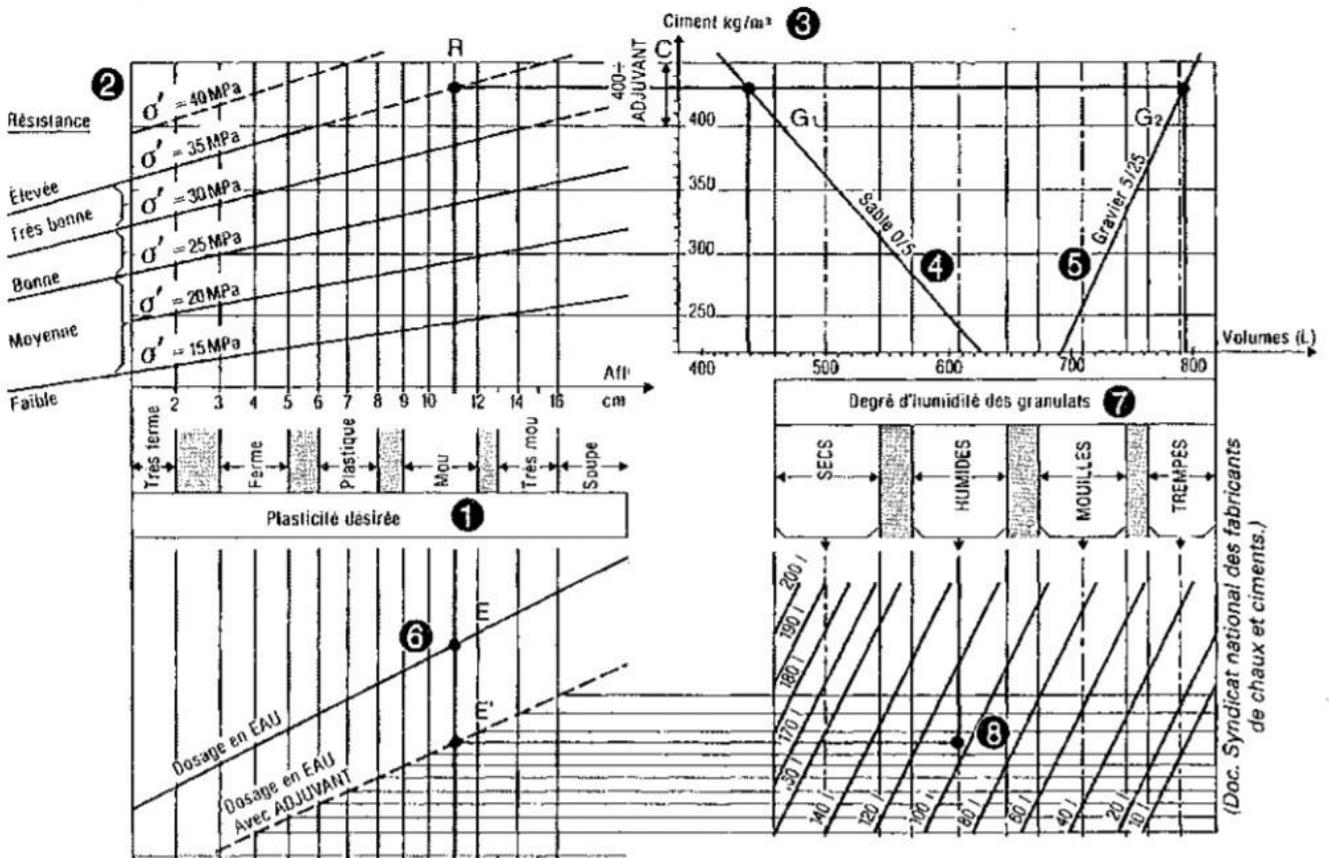


Figure 11: Abaque de formulation $D_{max} = 25$ mm

CHAPITRE 5 : Caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci

5.1. Caractéristiques du béton frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton :

- Méthode et durée de transport
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats)
- Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement etc...

5.1.1. Affaissement au cône d'Abrams (béton ordinaire et BHP)

Cet essai (slump-test), consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais, Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est schématisé sur la figure.

CHAPITRE 5 : Caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci

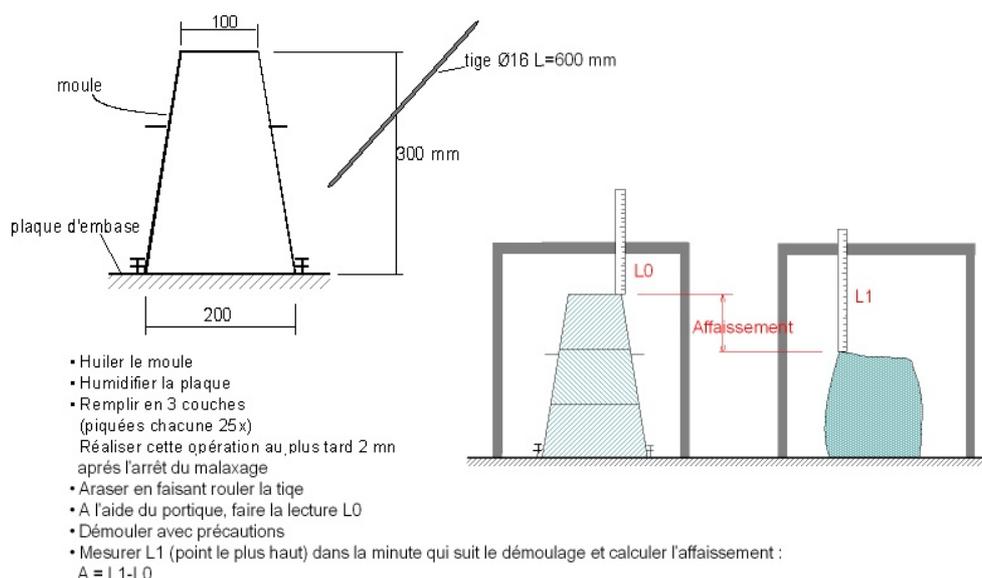


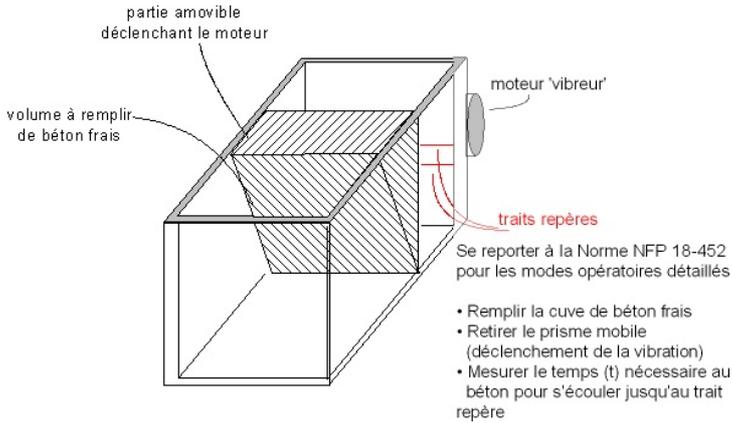
Figure 12: Affaissement au cône d'Abrams

Tableau 10. Classe d'affaissement selon EN206 et NF p18-305

ENV 206		NFP 18-305 et fascicule 65A CCTG		
Consistance	Affaissement (mm)	Consistance	Affaissement (cm)	Tolérances
S1	10 à 40	Ferme (F)	0 à 4	±1 cm
S2	50 à 90	Plastique (P)	5 à 9	±2 cm
S3	100 à 150	Très Plastique (TP)	10 à 15	±3 cm
S4	160 à 210	Fluide (F)	≥16	
S5	≥220			

5.1.2. Essai d'écoulement au maniabilimètre LCPC (NF P 18-452)

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



Classe de	Durée (en s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t$
Très Plastique	$10 < t$
Fluide	$t \leq 10$

Figure 13: Essai d'écoulement au maniabilimètre LCPC

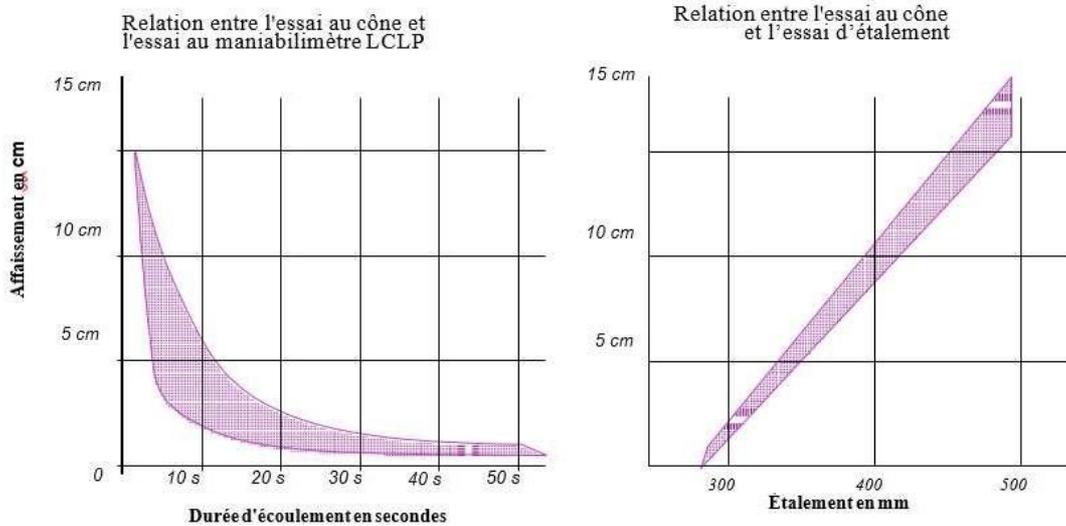


Figure 14: Relation entre les essais de cône, étalement et maniabilimètre

5.1.3. Essai d'étalement (EN12350-5)

Cet essai simple à réaliser, est très utilisé pour apprécier la consistance des bétons fluides (surtout en Allemagne). Il n'est pas adapté pour les bétons fermes et la dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm.

La consistance du béton est estimée par l'étalement d'un cône (moule tronconique de 200 mm de haut, de diamètre 200 mm à sa base et 130 mm à sa partie supérieure) de béton démoulé sur une table à chocs. Ce cône de béton est soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé fluide. Le moule tronconique placé au centre du plateau carré est rempli par 2 couches de béton, compacté par 10 coups de pilon. Après arasement le moule est retiré verticalement. Puis le plateau est soulevé de 40 mm jusqu'à la butée et relâché immédiatement 15 fois de suite en 15 secondes.

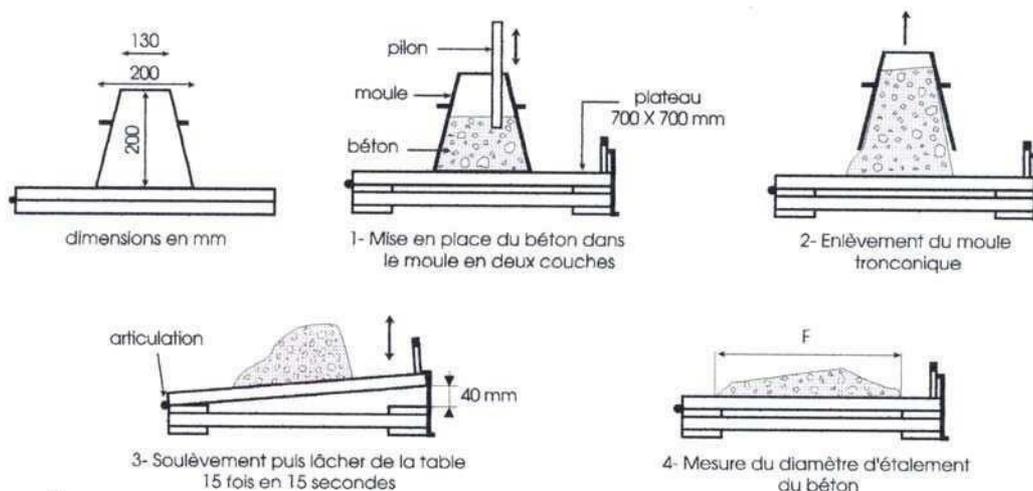


Figure 15: Essai d'étalement

Tableau 11. Classe de l'étalement

Classe de l'étalement	Diamètre d'étalement
F1	≤ 340
F2	350 à 410
F3	420 à 480
F4	490 à 550
F5	560 à 620
F6	≥ 630

5.1.4. Temps Vébé (Béton compacté au Rouleau (BCR))

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité. La dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm. Le cône d'Abrams est fixé à l'intérieur du récipient cylindrique (cf. figure). Le béton est mis en place dans ce cône. Le cône d'Abrams est alors soulevé et, à ce stade de l'essai, il est donc possible de mesurer l'affaissement au cône comme indiqué précédemment. L'essai se poursuit ensuite par la mise en vibration de la table durant un temps t tel que la face supérieure du béton soit entièrement aplanie et au contact du disque transparent qui accompagne la descente du béton pendant le compactage. Le temps t exprimé en secondes définit la consistance Vébé.

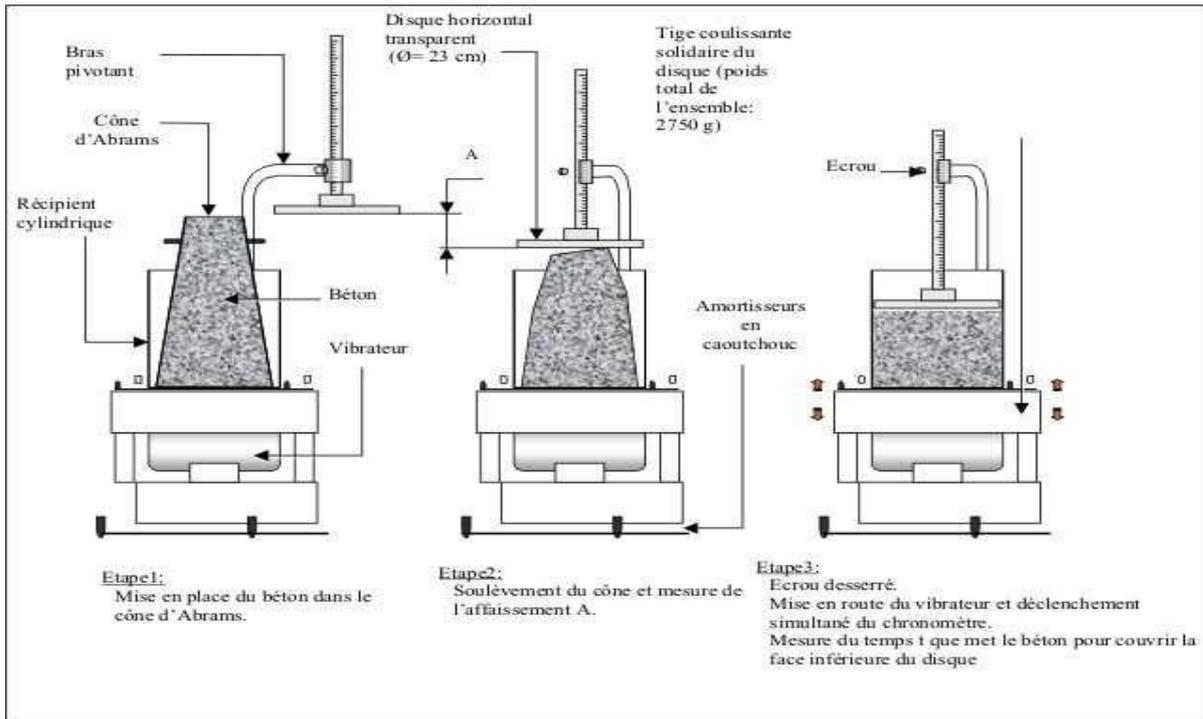


Figure 16: Teste Vébé

5.1.5. Masse Volumique et teneur en air

La masse volumique est la masse par unité de volume d'un béton. L'appareillage utilisé est un aéromètre (figure). Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide d'une règle.

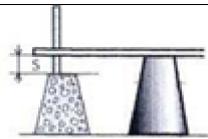
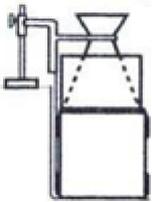
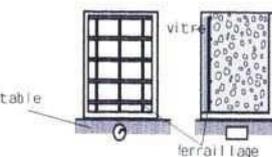
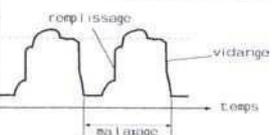
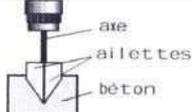
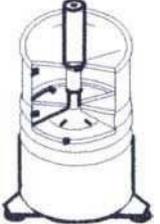
La masse du contenant rempli de béton – la tare divisée par le volume du contenant donne la masse volumique du béton.

À l'aide de l'air mètre on mesure le volume d'air occlus ou entraîné du béton.



Figure 17: Mesure de la masse volumique de béton

5.1.6. Autres essais sur le béton frais

Essais	Principe	Paramètre mesuré	Schéma	Plages recommandées de mesures	Commentaires
Essai d'affaissement NFP 18-451 EN 12350-2	Moulage d'un tronc de cône de dimensions normalisés et mesure après démoulage de son affaissement.	Affaissement (S)		$20 \leq S \leq 160$ mm	Mal adapté aux bétons fermes ou fluides ; Dmax < 40 mm ; Répétabilité juste suffisante
Essai d'étalement EN 12350-5	Démoulage d'un cône sur une table à chocs manuels et mesure de l'étalement.	Diamètre d'étalement (F)		$340 \leq F \leq 360$ mm	Mal adapté aux bétons fermes ou très fluides ; Dmax < 40 mm ; Répétabilité juste suffisante
Degré de compactibilité EN 12350-4	Evaluation du degré de compactibilité exprimé par le rapport entre un volume de béton avant et après compactage. ($h_1 = 400$ cm)	Taux (C) = $h_1 / h_1 - S$		$C \geq 1,11$	Mal adapté aux bétons fluides ; Dmax < 40 mm
Essai Vébé EN 12350-5	Mesure du temps mis par un cône de béton frais pour se remouler dans un moule cylindrique sous l'action d'une vibration	Durée (t)		$5 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$	Mal adapté aux bétons fluides ; Dmax < 40 mm
Essai d'écoulement (Maniabilimètre) NFP 18-452	Mesure du temps d'écoulement sous vibration	Durée (t)		$4 \text{ s} \leq t \leq 100 \text{ s}$	Non adapté aux bétons fluides ; Dmax < 40 mm ; Bonne répétabilité
Test C.E.S G. Dreux	Remplissage de béton dans un moule muni d'un quadrillage d'armatures distant d'une plaque transparente. Mesure du nombre de chocs nécessaires à recouvrir la vitre.	Choc (N)			Peu utilisé sauf au Centre d'Essais des structures (CSTB)
Wattmètre	Appréciation de la consistance par enregistrement de la puissance absorbée du malaxeur.	Puissance (Watt)			Sur certaines installations industrielles
Plasticimètre à rotations	Evaluation de la résistance au cisaillement d'un béton par la mesure d'un	Viscosité			Peu utilisé car très mauvaise répétabilité
BT Rhéom LCPC (F. de Larrard)	Cisaillement d'un échantillon de béton pour diverses vitesses de rotation, sous l'action d'une vibration ou non. Contrôle de l'essai et exploitation des mesures via une centrale D'acquisition	Seuil de cisaillement et viscosité			Bien adapté aux bétons fluides ; ✓ Dmax < 25 mm ; ✓ essai d'avenir ...

5.2. Caractéristiques du béton durci

Beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat.

5.1. Le retrait

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. Pendant les périodes de prise et de durcissement le béton peut subir des déformations résultantes de plusieurs types du retrait (tableau04).

Le retrait dû à plusieurs paramètres tels que : le type et le dosage du ciment, la cure, le rapport E/C, l'utilisation, dosage et type des ajouts cimentaires...etc.

Tableau 12. Différents types de retraits.

Causes et constatation	Remèdes
-Le retrait avant prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise, il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdorer en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
- Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

6.1. Fabrication du béton

Avant d'aborder la fabrication du béton, il n'est pas inutile de rappeler qu'il s'agit d'un matériau obtenu en mélangeant un ensemble de constituants présentant des états et des caractéristiques très différents : – un liant : le ciment, poudre d'une très grande finesse ;

- Des granulats de forme et de densité variées ;
- Un liquide : l'eau de gâchage ;
- Éventuellement des adjuvants soit liquides, soit en poudre.

L'air qui se trouve enfermé dans le béton frais lors de sa fabrication, joue un rôle non seulement sur sa plasticité, mais également sur ses déformations et ses propriétés finales.

Pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohésion.

Parmi les facteurs influant sur l'homogénéité du mélange béton, on peut notamment souligner :

- ✓ La régularité de chaque constituant : les données retenues pour fixer les paramètres de dosage ou de mélange ne doivent pas être remises en cause par d'éventuelles variations de ceux-ci ;
- ✓ La détermination d'une composition de béton tenant compte de sa destination et des constituants utilisés : type et classe de ciment, nature et granularité des granulats, adjuvants ;
- ✓ La teneur en eau ;
- ✓ Le type de matériel utilisé pour le malaxage ;
- ✓ Le temps de malaxage ;
- ✓ Les conditions et temps de transport du béton entre sa fabrication et sa mise en œuvre. Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE, dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.

6.1.1. Approvisionnement et le stockage des constituants

Le choix des constituants qui vont être utilisés pour réaliser un béton déterminé repose sur deux exigences principales : l'une, d'ordre technique, dépend des caractéristiques visées

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

(résistance, granulométrie, coloration, etc.); l'autre, d'ordre économique, tient compte en particulier de la proximité des fournisseurs par rapport au chantier, des coûts compétitifs...

Approvisionnés par route, rail ou voie d'eau, les constituants du béton doivent faire l'objet d'un stockage compatible avec les besoins du chantier, en évitant aussi bien les ruptures de stock que les surstockages. Les constituants utilisés doivent toujours être de qualité et conformes aux normes en vigueur.

6.1.2. Stockage du ciment

Une fois qu'ont été choisis le ciment adapté à l'ouvrage à réaliser (CEM I, CEM II...), sa classe de résistance (32,5, 42,5, 52,5) et éventuellement sa résistance à certains milieux – travaux à la mer, en eaux à haute teneur en sulfates (voir G10 et G11), on veillera à son stockage soigné sur le chantier.

Pour les petits chantiers, le ciment conditionné en sacs doit être stocké sur des palettes disposées sur un sol plat et sec. Les sacs seront protégés de la pluie, mais également des remontées d'humidité du sol, des projections de boue et de tout choc mécanique susceptible de les déchirer. Si plusieurs types de ciment sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter erreurs et mélange. Pour les grands chantiers, le ciment livré en vrac par camion-citerne est déchargé pneumatiquement et stocké dans des silos verticaux de forme cylindrique d'une capacité supérieure à 30 tonnes.

6.1.3. Stockage des granulats

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures, d'origines ou de classes granulaires différentes. Pour éviter la pollution des granulats par de la terre ou des déchets, le stockage se fait sur une aire aménagée. La propreté des sables, notamment, est un facteur de qualité indispensable du béton.

L'aire de réception des granulats doit permettre un écoulement correct des eaux. Celui-ci est souvent obtenu grâce à la réalisation d'une aire bétonnée, légèrement inclinée. Cette aire comprend parfois, surtout pour les périodes froides, des canalisations de distribution de vapeur, pour assurer le réchauffage des granulats.

Le stockage en silos ou trémies est plus rarement utilisé. Ce mode de stockage permet de grandes réserves de matériaux et de gros débits. Les silos peuvent comporter plusieurs compartiments permettant le stockage de différents granulats. Leur capacité peut être

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

supérieure à 150 m³. Les trémies sont à ciel ouvert, généralement de faible hauteur et aussi hautes que larges.

Le stockage en silo ou en trémie présente les garanties de qualité et de régularité indispensables pour l'obtention de bétons à caractéristiques très régulières (résistances mécaniques, teinte). C'est également le seul moyen susceptible de garantir une teneur en eau constante des granulats, qui fait l'objet de mesures par sonde.

6.1.4. Stockage de l'eau

Si l'on est stocké de l'eau sur le chantier, on veillera à ce qu'elle ne puisse être polluée par des matières organiques ou des sels tels que les chlorures ou les sulfates.

6.1.5. Stockage des adjuvants

Les adjuvants sont stockés en bidons ou en containers fermés, bien identifiés. Les précautions concernant le stockage par temps froid, ainsi que les dates limites d'emploi doivent être scrupuleusement respectées.

6.1.6. Dosage des constituants

Le ciment est acheminé du silo à la trémie de dosage par des vis sans fin (vis d'Archimède) qui assurent un débit régulier et à l'abri de l'humidité ambiante, ou par transport pneumatique.

Le dosage pondéral (nettement préférable au dosage en volume) est soit mécanique – la trémie emplie de ciment, portée par un fléau analogue à une balance romaine déclenche l'arrêt de l'arrivée de ciment lorsque le poids requis est atteint –, soit électronique – le fléau classique est remplacé par un barreau dont la déformation est mesurée par une jauge de contrainte.

En ce qui concerne les granulats, ils sont repris par skip ou dragline et acheminés jusqu'à la doseuse par bande ou tapis. Pour obtenir une composition de béton définie et constante, la teneur en eau des granulats doit être mesurée régulièrement. Le dosage en eau de gâchage sera effectué, déduction faite de l'apport d'eau contenue dans les granulats. L'eau est dosée par compteur volumétrique ou pompe doseuse.

6.1.7. Malaxage des constituants

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant. Le choix d'un appareil

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

(bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, plastiques, etc.) pour donner des bétons réguliers.

a. Bétonnières

Ce sont des appareils qui assurent le mélange des constituants par simple rotation de la cuve suivant un axe qui peut être horizontal ou légèrement incliné. Des palettes solidaires de la cuve assurent l'entraînement des matériaux qui retombent par gravité. Ce mouvement de brassage assure le mélange des constituants.

Les bétonnières sont simples, robustes et plus particulièrement adaptées aux petits débits de production. La capacité de la cuve varie de 50 à 100 litres pour les plus petites, pour atteindre 1 m³ et plus pour les grosses bétonnières à axe horizontal. La vidange de la cuve se fait par basculement, ou par inversion du sens de rotation. Les bétons fabriqués à la bétonnière sont au maximum de la classe de résistance C16/20, pouvant être portée à C20/25 en cas de contrôle de la production.

b. Malaxeurs

Ces appareils assurent une homogénéité du mélange supérieure à celle obtenue avec les bétonnières, grâce au déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange. Ce déplacement est provoqué par des trains de palettes ou de planétaires dont l'axe est excentré par rapport à celui de la cuve, qui est elle-même fixe ou tournante.

La plupart des malaxeurs sont à axes verticaux. Le béton subit un puissant effet de brassage à la fois dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Ce type de matériel est le mieux adapté à l'obtention de bétons homogènes.

Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage, pour être efficace, doit prendre en compte certains paramètres tel que :

- ✓ L'ordre d'introduction des composants ;
- ✓ La vitesse de rotation de la cuve ;
- ✓ Le temps de malaxage.

L'ordre d'introduction idéal est parfois difficile à réaliser du fait du remplissage discontinu de la cuve par skip ou chargeur, qui ne facilite pas une introduction simultanée et progressive des constituants. Avec un malaxeur, on considère comme préférable, lorsque c'est possible, d'introduire le ciment et l'eau qui assure son mouillage, puis le sable, pour constituer le mortier, et enfin les gravillons. Les adjuvants ont été préalablement

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

dilués dans une partie de l'eau de gâchage. Avec une bétonnière, l'introduction d'une partie des gravillons avec une partie d'eau assure le lavage de la cuve. Le ciment, le reste de l'eau et le sable sont introduits ensuite. Les gravillons restants sont introduits en dernier.

La vitesse de rotation des appareils est de l'ordre de 20 à 30 tours/mn, et diminue avec le diamètre de la cuve. Elle ne dépasse pas 20 tours/mn pour les bétonnières.

Le temps de malaxage est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons très fermes ou riches en éléments fins peuvent nécessiter des durées de malaxage plus longues : 1 à 2 minutes.

6.2. Transport du béton

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication, parfois éloignée de plusieurs kilomètres, ce deuxième cas concerne plus particulièrement l'industrie du béton prêt à l'emploi.

Mentionnons simplement l'emploi de camions à bennes fixes ou des classiques bétonnières portées (toupies) qui assurent le maintien de l'homogénéité pendant le transport. La capacité de ces bétonnières portées varie de 4 à 10 m³. Le temps cumulé de transport et de déchargement doit être limité à 1h 30min environ dans des conditions normales de température (voisines de 20 °C). Le risque rencontré est une chute de la maniabilité du béton. L'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants permet de résoudre ce type de difficultés.

6.2.1. Transport du béton par benne, goulotte, tapis

Sur le chantier même, le matériel le plus utilisé pour le transport du béton est la benne à béton, dont la forme et les dimensions sont très variables. Elle est remplie par le haut, et vidée en partie basse par ouverture mécanique ou pneumatique d'une trappe. La commande d'ouverture peut être faite à distance. La partie inférieure de la benne est souvent munie d'un manchon qui permet de diriger la coulée de béton et de limiter la hauteur de chute, génératrice de phénomènes de ségrégation. La benne est acheminée au droit des coffrages par chargeur, grue et même hélicoptère dans les cas difficiles. Le béton peut être également transporté par goulotte ou par tapis.

6.2.2. Transport du béton par pompage

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

Le pompage du béton est une technique qui se développe rapidement car il permet une importante productivité, la limitation du temps d'attente avant la mise en place du béton, la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites difficiles d'accès, la mise en place de quantités importantes en une seule coulée.

La technique se développe parallèlement à la croissance du BPE. Le camion-pompe équipé de flèches allant jusqu'à 60 m, peut envoyer le béton directement de la toupie au lieu de coulage. L'évolution rapide des bétons pompés permet ainsi d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400 m, jusqu'à 100 m et plus en hauteur avec des bétons particulièrement adaptés.

6.2.2.1. Procédé de pompage

Le béton est préalablement « agité » dans la trémie de réception de la pompe dès sa sortie du camion malaxeur. Le cheminement du béton dans la tuyauterie, se fait grâce à un cycle aspiration/ poussée, à l'aide de deux pistons reliés à deux vérins hydrauliques évoluant à l'intérieur de deux cylindres appelés « chemises » (le premier vérin remonte dans sa chemise : aspiration du béton, simultanément, le second vérin descend : poussée du béton). Le nombre de cycles par minute « Aspiration / poussée », permet de définir la cadence de pompage en mètres cubes par heure.

6.2.2.2. Types de pompes à béton

Le débit courant des pompes varie entre 20 et 150m³par heure, on distingue deux types :

- ❖ Pompe automotrice à flèche : elle peut être installée à l'intérieur ou à l'extérieur du chantier ; par définition dépendante des conditions du chantier, elle doit être en permanence en bon état de fonctionnement et disposer de tous les équipements de sécurités. À côté de la pompe automotrice « traditionnelle », les techniques de pompage conduisent actuellement en France au développement :
 - Des malaxeurs pompent pour les petits chantiers ou les interventions de faible volume ;
 - Des tapis pour le même type d'intervention suivant les habitudes de mises en œuvre des entreprises.
- ❖ Pompe stationnaire plus tuyauterie et mât de bétonnage : elle reste à demeure sur le chantier.

6.2.3. Règles à respecter lors du transport

Le matériel utilisé pour le transport du béton devra être fréquemment nettoyé à l'eau pour ne pas introduire des corps étrangers ou des déchets dans le béton. Par ailleurs, le matériel sera tel que la hauteur de chute du béton lors du coulage, ou les chocs mécaniques durant la manutention, ne soient pas de nature à créer des problèmes de ségrégation dans le béton.

La durée de transport du béton doit être limitée en fonction des conditions ambiantes de température, d'hygrométrie ou de vent. Elle ne peut dépasser 1h30.

Le béton fabriqué sur le chantier doit être mis en œuvre moins de 30 minutes après sa fabrication.

6.4. Mise en œuvre du béton sur chantier

6.4.1. Différentes phases de la mise en œuvre

De la sortie de la bétonnière ou du malaxeur à l'ouvrage fini, le béton passe par différentes phases : transport, coulage dans un coffrage ou un moule, serrage, maturation, démoulage, cure. Ces différentes phases impliquent le recours à des techniques qui ont beaucoup évolué et qui doivent respecter des règles d'exécution, décrites dans les documents techniques tels que des normes.

Les règles de bonne exécution, objet de cette notice, concernent la mise en œuvre sur le chantier et ne s'appliquent pas nécessairement à la fabrication en usine. Des critères spécifiques peuvent dans ce cas être imposés par la nature des pièces, le processus de préfabrication ou les conditions de travail en usine.

6.4.2. Approvisionnement du béton

Les conditions à respecter pour ne pas modifier les caractéristiques du béton entre son lieu de fabrication et son lieu d'utilisation.

- Éviter les chocs ou manœuvres brutales qui peuvent provoquer la séparation des constituants du béton : phénomène de ségrégation dû aux densités différentes des constituants.
- Veiller à ce que le temps de transport ou d'attente ne soit pas susceptible d'entraîner une perte d'ouvrabilité, voire un début de prise du béton, surtout par temps chaud (l'emploi d'un retardateur de prise permet de compenser ce phénomène).

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

- À l'inverse, par temps froid, il convient de prendre des précautions pour protéger le béton contre le gel.
- Le matériel utilisé pour le transport doit être fréquemment nettoyé pour éviter tout risque de pollution (déchets végétaux ou organiques, restes de béton...).

Les essais de contrôle des caractéristiques du béton sont effectués au point de livraison doivent avoir lieu juste avant son coulage ; les essais in situ, permettent d'approcher au maximum les caractéristiques du béton fabriqué, avec celles de l'ouvrage.

6.5. Mise en place

Etape 1 : préparation de coffrage

En commence toujours par la préparation des différents éléments La préparation des coffrages qui doivent être :

- Suffisamment rigides pour supporter la poussée du béton tout particulièrement dans le cas des bétons fluides, sans se déformer y compris pendant la phase de vibration, et stables ;
- ❖ Étanches pour éviter les fuites de laitance aux joints ;
- Avoir un parement nettoyé et traité avec un agent de démoulage approprié et appliqué en couche régulière ; cette préparation est indispensable pour l'obtention d'un béton apparent régulier, et pour éviter des phénomènes d'adhérence entraînant des arrachements lors du décoffrage ;
- ❖ Exempts de corps étrangers (clous, ligatures, boulons, etc.) et d'eau stagnante.

Etape 2 : préparation des armatures

Pour éviter leur déplacement pendant la mise en place du béton et sa vibration, les armatures doivent être correctement calées et positionnées (il existe de nombreux modèles de cales s'adaptant aux différents diamètres d'armatures et aux formes de la pièce à réaliser). L'enrobage des armatures doit aussi être contrôlé.

Etape 3 : Surfaces de reprise de bétonnage

Leur emplacement sera prévu lors du calepinage pour correspondre à la jonction des éléments constitutifs, de façon à ne pas créer un joint gênant pour l'aspect du parement de béton.

Les surfaces de reprise doivent être rugueuses (un repiquage peut parfois s'avérer nécessaire) pour faciliter l'adhérence et humidifiées lorsqu'il s'agit d'un béton déjà durci.

Etape 4. Déversement du béton Cas des dalles, planchers, chaussées

Le béton doit être déversé d'une hauteur inférieure à 0,8 mètre et être réparti régulièrement. Les accumulations locales entraînent une surcharge sur les étalements, ainsi que des risques de ségrégation.

Cas des éléments coffrés

En plus des précautions précédentes, il peut être nécessaire d'utiliser des manchons ou des tubes, pour limiter la hauteur de chute libre du béton (à l'origine de phénomènes de ségrégation), surtout dans des coffrages hauts et profonds. Il faut éviter le ruissellement du béton sur les parois du coffrage ou le phénomène de cascade sur les armatures.

Le tube plongeur, le manchon ou la goulotte doivent permettre de déverser le béton au fond du coffrage. Ils sont remontés progressivement au fur et à mesure du bétonnage.

Les précautions à prendre lors du coulage sont les suivantes :

- Limiter la hauteur de chute ;
- Prévoir des couches horizontales successives n'excédant pas 60 à 80 cm de hauteur ;
- Maintenir une vitesse de bétonnage aussi constante que possible ;
- Éviter la mise en place lors de trop fortes pluies pouvant entraîner un lavage des gros granulats et un excès d'eau dans le béton, surtout à sa surface.

6.6. Serrage du béton

Le serrage est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques, durables, avec des parements réussis. Sauf dans le cas de béton autoplaçant, il est indispensable de faciliter la mise en place du béton grâce à des moyens de serrage.

Le serrage a pour objet de faciliter l'arrangement optimal des grains, permettant ainsi l'écoulement du béton, un bon remplissage des cavités et l'enrobage correct des armatures. Le serrage permet aussi d'évacuer une grande partie de l'air contenu dans le béton et d'améliorer ainsi sa compacité. Les différents modes de serrage s'appliquent aux ouvrages verticaux (murs, voiles, poteaux, etc.) aussi bien qu'aux horizontaux (dalles, chaussées, etc.).

a. Vibration interne

On utilise des aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques ou thermiques, de 25 à 150 mm de diamètre, en fonction du volume du béton à vibrer. Pour les bétons courants de granulométrie inférieure à 25 mm, les aiguilles employées ont un diamètre de 40 à 100 mm.

Les règles suivantes doivent être respectées :

- Immerger l'aiguille verticalement ou sous un angle faible ;
- La remonter lentement (10 à 15 secondes) sur une hauteur n'excédant pas 60 cm.
- Choisir des points de vibration successifs compris entre 30 et 60 cm selon le diamètre de l'aiguille (distance entre points successifs 8 à 10 fois le diamètre de l'aiguille);
- Ne pas vibrer trop près du coffrage et ne pas toucher les armatures avec l'aiguille.

b. Vibration externe par vibrateurs de coffrage

Pour les ouvrages de faible épaisseur ou, à l'inverse, de hauteur importante avec une forte densité d'armatures, la vibration interne est pratiquement impossible, on utilise des vibrateurs fixés sur les coffrages. Il s'agit de moteurs à balourds, plus délicats à manipuler que les aiguilles et dont l'emplacement n'est pas toujours facile à déterminer. L'épaisseur intéressée par les vibrateurs n'excède pas 20 à 30 cm. Pour des pièces importantes, les vibrateurs doivent être déplacés sur les coffrages au fur et à mesure de l'avancement du bétonnage.

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

La vibration externe sur chantier est une opération qui nécessite une certaine expérience. Elle est par contre couramment utilisée en préfabrication, car les moules, plus robustes, permettent une transmission homogène et efficace des vibrations. Le caractère répétitif des éléments à réaliser permet la détermination optimale de l'emplacement des vibrateurs.

c. Vibration externe par règle vibrante

Cette technique est utilisée pour les dalles ou chaussées en béton de 20 à 25 cm d'épaisseur ; elle consiste à déplacer à la surface du béton une règle (ou une poutre) équipée de vibrateurs, qui assure son serrage à partir de sa surface.

6.7. Cure du béton

La cure du béton est la protection apportée pour éviter sa dessiccation et lui assurer une maturation satisfaisante. Elle est particulièrement indispensable pour les dalles et les chaussées, surtout lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables : vent, soleil, hygrométrie faible, etc.

Les procédés de cure ce sont des moyens simples tels que l'humidification renouvelée de la surface ou la mise en place d'une bâche plastique (polyane), ou la pulvérisation de produits de cure qui constituent un film imperméable à la surface du béton. Pour les dallages, à la fin du surfacage, soit par la pulvérisation d'un produit de cure, soit par la mise en place d'un film de polyéthylène translucide ou d'un géotextile régulièrement humidifié ; pour les murs en élévation, après le décoffrage, par pulvérisation d'un produit de cure, ou par la mise en place d'un géotextile régulièrement humidifié.

6.8. Bétonnage par temps chaud

Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

En règle générale, dès que la température mesurée sur chantier est durablement supérieure à 25 °C, des dispositions sont à prendre dans le programme de bétonnage, elles sont plus contraignantes encore, au-dessus de 35 °C. Ce premier sous-chapitre traite essentiellement des conséquences et préconisations du bétonnage par temps chaud.

6.8.1. Conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons

Le béton est sensible aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur :

- La rhéologie du béton et son évolution ;
- La vitesse de prise ;
- La cinétique de durcissement ;
- L'évaporation et la dessiccation du béton.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en fonction de son dosage et de sa chaleur massique. Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que, dans le domaine courant :

- Une augmentation de 10 °C du ciment élève de 1 °C la température du béton ;
- Une augmentation de 10 °C de l'eau élève de 2 °C la température du béton ;
- Une augmentation de 10 °C des granulats élève de 7 °C la température du béton (figure)

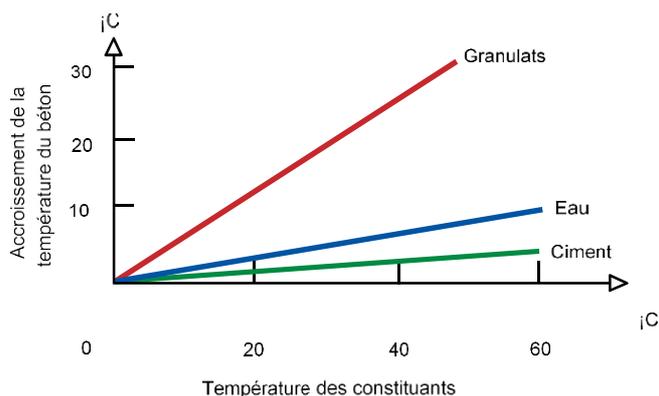


Figure 18. Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants.

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées.

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

a. Rhéologie

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams évolue (figure).

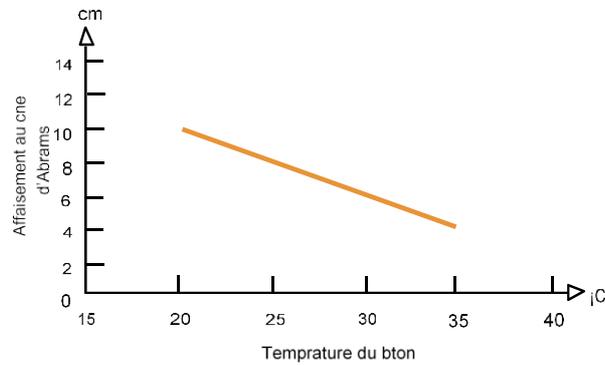


Figure 19. Évolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.

Pour une élévation de la température du béton, il y a une importante perte de l'ouvrabilité qui, en outre, peut se manifester très rapidement après la préparation du béton. La solution de rajouter de l'eau pour pallier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances (figure).

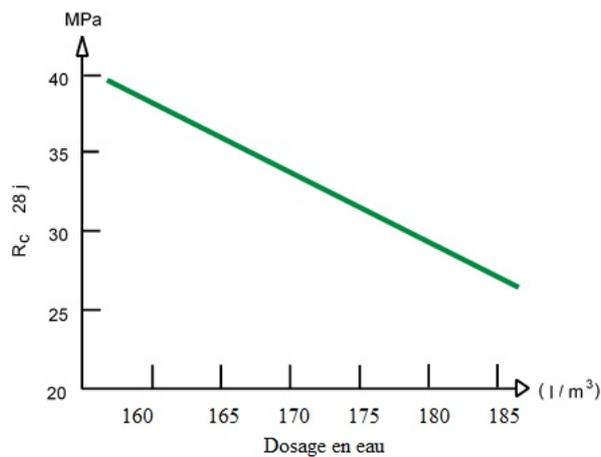


Figure 20. Évolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.

b. Temps de prise

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques : la prise du béton est plus rapide (figure).

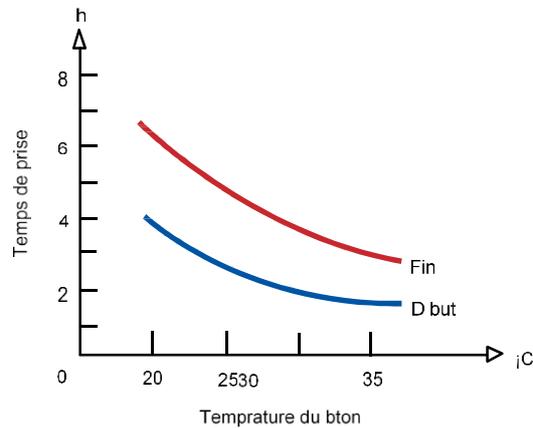


Figure 21. Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température

c. Résistance mécanique

Une forte élévation de la température provoque aux échéances précoces (1 ou 2 jours) une augmentation de la résistance du béton. Cela se traduit généralement par une résistance du béton à 28 jours moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse. Il est important de tenir compte de ce phénomène (v. fig.) et il faut se souvenir que les réactions d'hydratation sont plus ou moins exothermiques selon les types de ciment et que cet effet se cumule avec celui de la température extérieure.

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

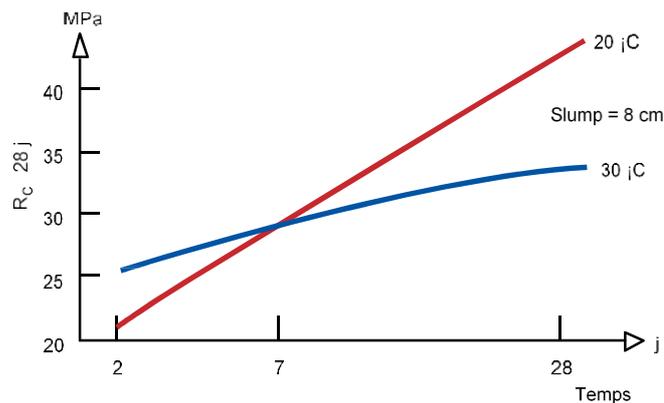


Figure 22. Evolution des résistances en compression en fonction de la température.

d. Fissuration

Une évaporation trop rapide de l'eau du béton peut entraîner quelques heures après le décoffrage des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à 1 kg/m²/h. Elle est d'autant plus importante que :

- La température ambiante est élevée,
- La température du béton augmente,
- L'air est sec.

L'abaque de l'American Concrete Institute (ACI) permet d'estimer la quantité d'eau évaporée du béton en fonction de ces trois paramètres (figure ci-après).

6.8.2. Préconisations pour le bétonnage par temps chaud

Les services météorologiques donnent des informations sur les conditions climatiques d'un site donné. Pour des chantiers importants, il peut être nécessaire de compléter l'information des services spécialisés par un suivi précis de l'évolution locale.

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

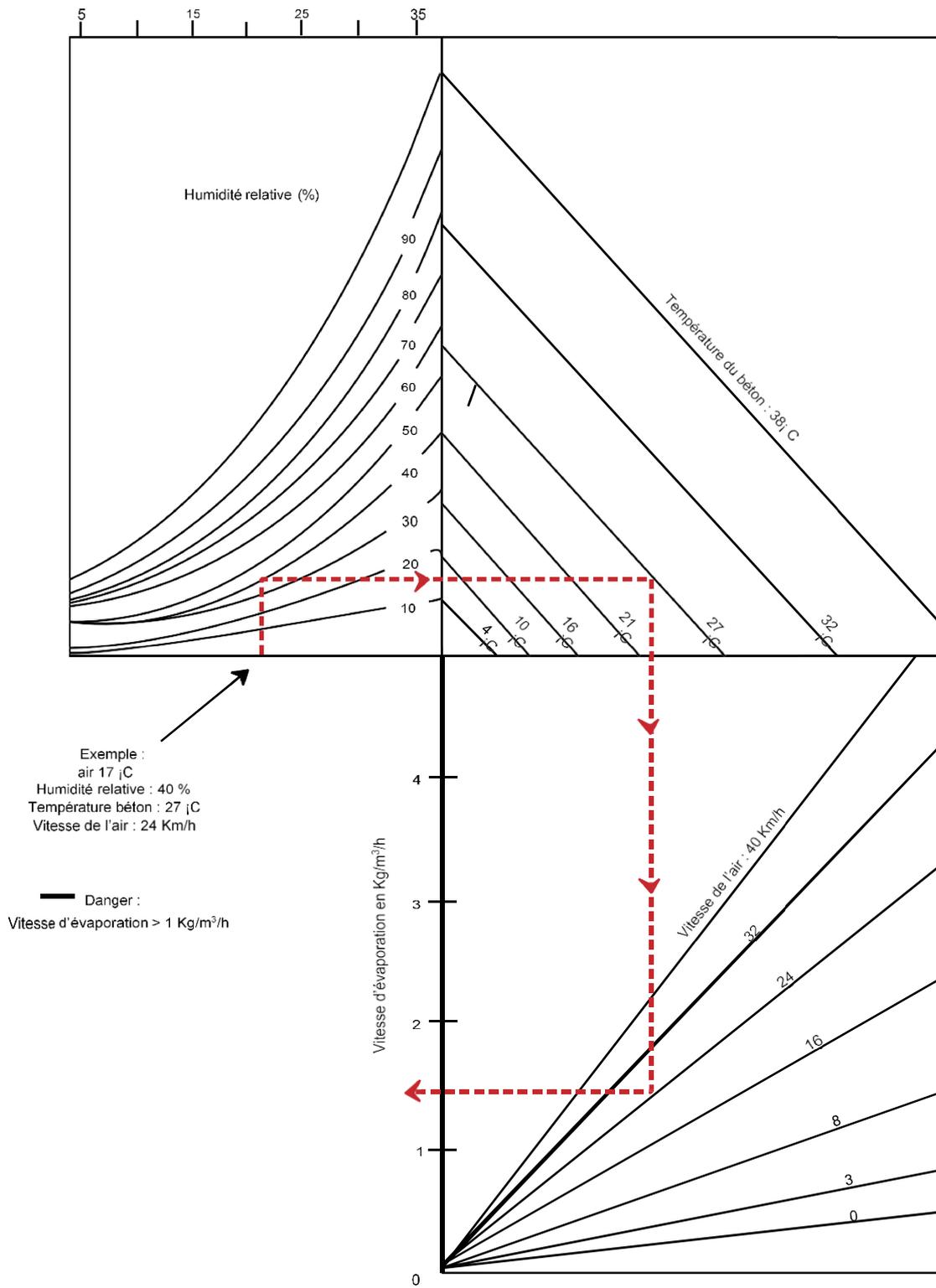


Figure 23. Abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) [1].

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

Par temps chaud, il conviendra de respecter quelques règles simples afin d'obtenir en œuvre un béton dont les caractéristiques correspondent aux attentes des maîtres d'ouvrage. Des modifications de la formulation du béton peuvent dans les cas extrêmes s'avérer nécessaires. À l'égard des granulats (sable, gravillon) qui constituent l'essentiel de la masse du béton, c'est au niveau des conditions de stockage que des protections sont à mettre en place, elles peuvent être complétées par un arrosage plus ou moins intensif, apport d'eau dont il convient de tenir compte dans la composition du béton. Bien que le choix du type de ciment soit dicté par des considérations liées à l'ouvrage réalisé et aux conditions d'environnement, il peut être utile de rechercher un ciment faiblement exothermique. L'eau utilisée pourra être refroidie.

Au niveau de la formulation du béton, il est possible d'associer un ou plusieurs adjuvants, un retardateur de prise qui prolongera le temps d'utilisation, un plastifiant réducteur d'eau qui permet de maintenir le rapport E/C. Il est important dans cette hypothèse de réaliser des études préalables de compatibilité ciment-adjuvant en les menant dans les conditions climatiques proches de celles du chantier afin de vérifier que la maniabilité reste satisfaisante pendant une durée compatible avec les conditions de transport et de mise en œuvre.

Lorsque le chantier est approvisionné par des centrales de béton prêt à l'emploi, il faut s'efforcer de réduire les temps de transport et d'attente et limiter le stationnement en plein soleil des camions malaxeurs.

Au niveau de la mise en œuvre du béton, il peut être utile de refroidir les coffrages et il convient toujours de bétonner en dehors des heures les plus chaudes de la journée. En aucun cas, il ne faudra rajouter d'eau à un béton dont l'ouvrabilité s'avère médiocre.

Après coulage, le béton doit être protégé de la dessiccation, notamment les surfaces exposées au soleil et au vent, par un produit de cure ou par une bâche (paillasons humides, films plastiques, etc.). Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques [1].

La qualité et la durée de vie du béton se jouent aux tous premiers âges, période où il est particulièrement sensible. Les précautions prises pour bétonner par temps chaud peuvent

CHAPITRE 6 : Mise en œuvre du béton

générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.

6.9. Bétonnage par temps froid

Les conditions climatiques ont une influence très importante sur la qualité finale du béton. On doit s'en préoccuper dès sa fabrication et jusqu'à sa maturité en passant par son transport, sa mise en œuvre et sa cure.

En règle générale, lorsque la température mesurée sur chantier est inférieure à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la mise en place du béton est déconseillée. Entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle ne peut se faire qu'avec des moyens efficaces pour prévenir les effets dommageables du froid. Le présent document ne traite que de l'effet des basses températures sur le béton frais. L'effet du gel sur béton durci faisant partie d'un chapitre spécifique : « La tenue au gel des bétons durcis » [14].

6.9.1. Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais

Sur béton frais, la baisse de température dans une plage n'atteignant pas le gel, ralentit les réactions exothermiques d'hydratation du ciment. On constate : – un retard du début de prise, un allongement du temps de durcissement, on observe aussi une augmentation du ressuage.

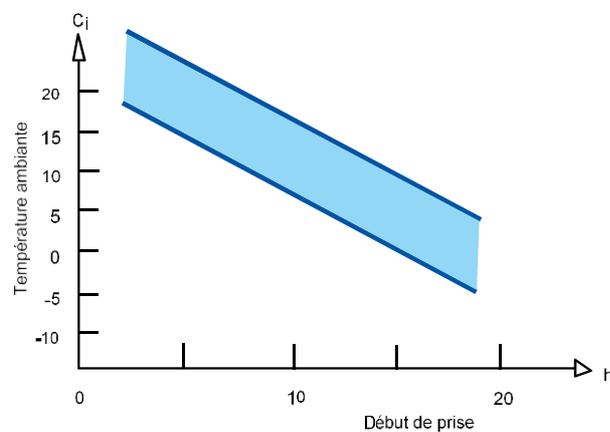


Figure 24. Début de prise du béton en fonction de la température[14]

a. Conséquences du gel sur le béton frais

Lorsque le béton frais gèle, les réactions d'hydratation cessent et le durcissement est complètement arrêté. Si le gel intervient avant le début de prise, il provoque uniquement un gonflement, le durcissement reprenant normalement dès que la température redevient positive (vers 5 °C). L'effet du gonflement conduit néanmoins à une baisse de résistance.

Si le gel intervient au début du durcissement, la porosité est augmentée, l'adhérence pâte-granat diminue et les résistances mécaniques sont fortement altérées. Dans ce cas, les dommages sont irréversibles, il est donc extrêmement important d'anticiper l'évolution climatique avant la mise en œuvre et de prendre les dispositions nécessaires. La résistance finale du béton est d'autant plus affectée que le gel du béton est précoce.

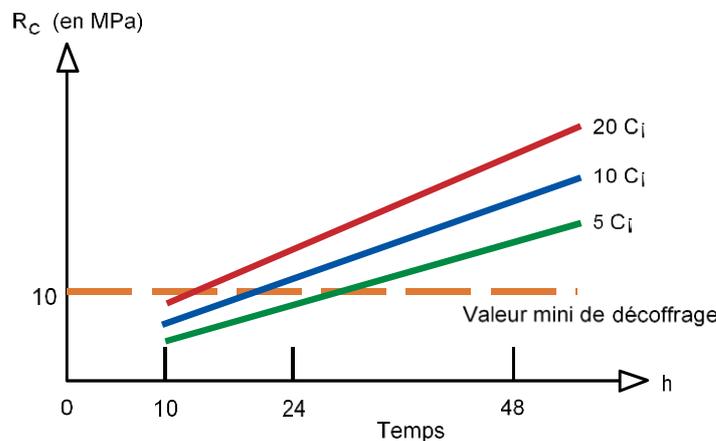


Figure 25. Délai de décoffrage en fonction de la température.

6.9.2. Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid

Pour mettre en œuvre correctement par temps froid, il est indispensable d'adapter la composition du béton, d'apporter et de maintenir une quantité de chaleur au béton frais et de maintenir ces dispositions de protection en place au-delà des délais habituels.

a. Composition du béton

La composition du béton devra être soigneusement étudiée notamment sur :

- Le choix du ciment : un ciment de type CEM I de classe 52,5 ou 42,5 (ou de sous classe R) est recommandé ;
- Le dosage du ciment : il est recommandé de se tenir à des dosages élevés supérieurs à 330 kg/m³,
- Le choix des granulats : les granulats seront non poreux, non gélifs, propres et non gelés,
- Le dosage en eau : le dosage en eau devra être le plus faible possible,
- L'adjuvantation : l'emploi d'adjuvants tels que réducteurs d'eau, accélérateurs de prise et accélérateurs de durcissement est conseillé. Il est indispensable de réaliser des études préalables de compatibilité ciment-adjuvant et de les mener dans les conditions voisines du chantier.

b. Apport et maintien de chaleur

Chauffage : le béton peut être chauffé lors de sa fabrication par l'eau ou les granulats.

Il peut être ensuite maintenu à température par chauffage de l'atmosphère ambiante ou du coffrage.

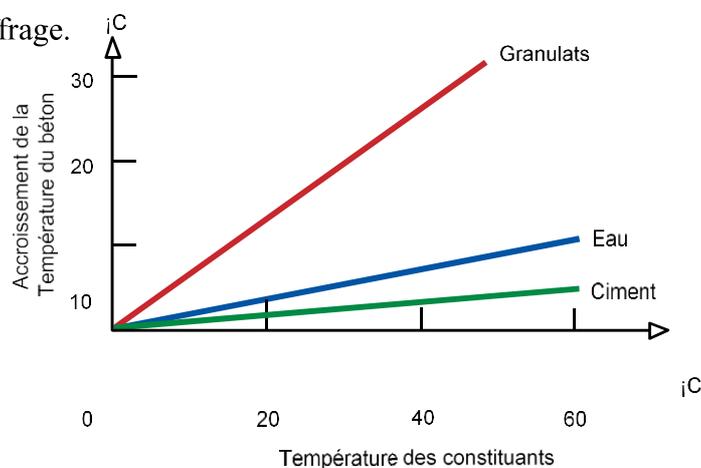


Figure 26. Accroissement de la température du béton en fonction de la température des constituants.

Calorifugeage : les coffrages pourront comporter une isolation qui limitera les échanges thermiques avec l'extérieur.

Transport : le transport du béton frais ainsi que l'attente des toupies seront le plus court possible.

Étuvage : l'étuvage du béton au cours de son durcissement accélérera l'hydratation du ciment. **Protection de surface** : la surface du béton en contact avec l'air devra être protégée du froid, par exemple avec une bâche isolante.

c. Maintien des dispositions de protection

- Les protections de surface doivent être maintenues au moins pendant 72 heures ;
- Le décoffrage ne doit être effectué que si le béton a atteint une résistance mécanique suffisante de l'ordre de 10 MPa, – les dispositifs d'étalement doivent être maintenus en place pendant la période froide en particulier en présence de gel.

Toutes ces mesures peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.

d. Cas des ciments à durcissement rapide

Les ciments à durcissement rapide comme le ciment d'aluminates de calcium fondu et le prompt, dégagent leur chaleur d'hydratation sur un temps très court. L'échauffement obtenu permet le bétonnage par des temps très froids ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou dans des chambres froides. Les précautions à prendre sont identiques à celles des bétons de ciments courants. On se référera aux préconisations d'utilisation des fabricants.

7.1. Introduction

Beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat.

7.2. Résistances caractéristiques à la compression NF P18-406

La résistance d'une éprouvette cylindrique de béton, de dimensions 16x32 (ou 11x22), est définie à (j) jours, à partir de la charge (F_r) conduisant à sa rupture :

$$\sigma = F_r/S$$

En raison de la dispersion des résultats et de l'hétérogénéité du matériau béton, il est nécessaire lors du contrôle d'une fabrication de réaliser (n) essais.

Une résistance caractéristique à (j) jours (f_{cj}) est définie comme la valeur de la résistance en dessous de laquelle on peut s'attendre à rencontrer au plus 5% (ou 10% en fonction des textes normatifs pris en référence) de résultats d'essais. On appelle p le fractile de valeurs d'essais pouvant être inférieures à la résistance caractéristique, la norme EN 206, adopté $p = 5\%$, alors que la norme française NFP 18-305 admet pour les résistances caractéristiques jusqu'à 30 MPa, un fractile $p = 10\%$; et pour les résistances caractéristiques supérieures à 30 MPa $p = 5\%$. On peut illustrer cette définition à l'aide d'un histogramme : soit (n) éprouvettes d'un béton donné qui ont été rompues en compression ; soit (R_i) la résistance obtenue sur l'éprouvette numérotée (i), les résultats sont représentés sur un diagramme (l'histogramme) où l'on indique en abscisse des classes de résistance et en ordonnée le nombre d'essais dont le résultat correspond à une classe donnée de résistance [4].

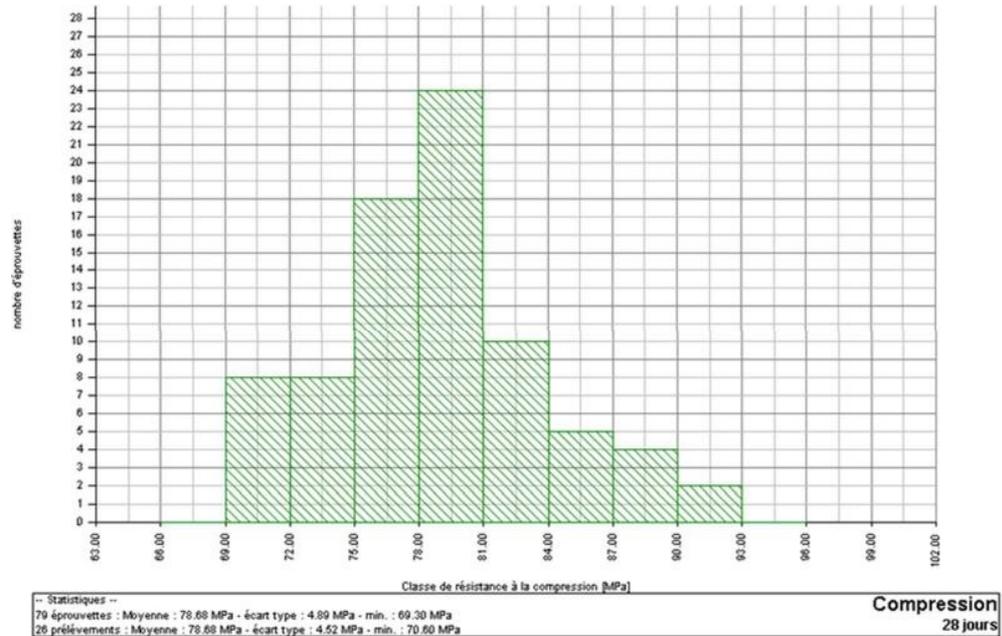


Figure 27: Statistique des résultats de compression

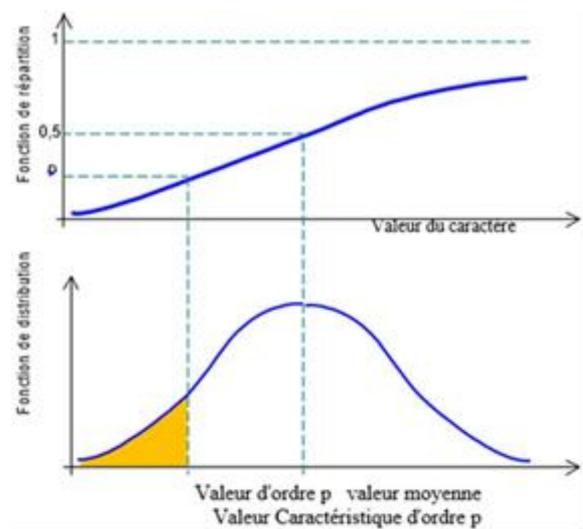
La répartition des essais est modélisée par une loi de Laplace-Gauss, pour laquelle on définit une moyenne (f_m) et un écart type (sf) à partir des résistances à la rupture (R_i) des éprouvettes de différents prélèvements :

$$f_m = \frac{\sum R_i}{n} \quad sf = \frac{\sqrt{\sum (f_m - R_i)^2}}{(n-1)}$$

Dans ce cas, l'inégalité $R_i \geq f_{ck} = f_m - k \cdot sf$, possède $(1 - p)$ chances sur 100 d'être satisfaite.

La détermination (ou la vérification de la conformité) de la résistance caractéristique (f_{cj}) s'effectue par des mesures de résistances à partir d'un minimum de 3 prélèvements de 3 éprouvettes.

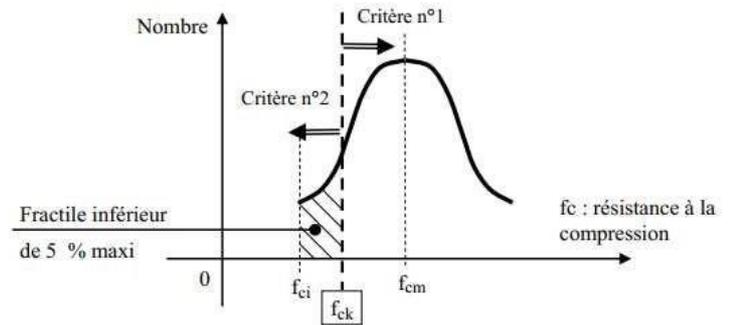
N.B. : en fonction des textes normatifs pris en référence 'EN 206, NFP 18-305, la détermination de la résistance caractéristique peut être légèrement différente ; cependant les principes de calculs sont similaires[9].



En première approche, on peut définir f_{cj} à l'aide des 2 inéquations ci-dessous :

$$f_{cj} \leq f_m - 1, 2sf$$

$$f_{cj} \leq R_{imini} + 4 \text{ MPa}$$



Dans le cas courant, pour l'établissement des projets, la résistance de référence est prise à 28 j. (f_{c28}). Cette valeur f_{c28} est souvent définie par défaut, en fonction des exigences du CCTP et des conditions de fabrication (cf. Tableau ci-dessous). Dans le cas où les documents d'un marché le permettent, une entreprise peut élaborer une composition de béton particulière. Dans ce cas, une étude en laboratoire poursuivie par des essais de convenue peut être nécessaire selon les conditions du marché [3].

Tableau 13. Dosage en ciment en fonction de la résistance caractéristique

Dosage en ciment en kg par m ³ de béton				Résistances caractéristiques	
Classe 32.5 et 32.5 R		Classe 42.5 et 42.5R		F _{c28} MPa	f _{i28} MPa
CC	AS	CC	AS		
300	--	--	--	16	1.56
350	325	325	300	20	1.80
--	400	375	350	25	2.10

CC : conditions courantes de fabrication AS : auto contrôle surveiller

N.B. La résistance caractéristique (f_{cj}) étant toujours inférieure à la valeur moyenne, il en résulte que lors de la fabrication, la résistance moyenne visée doit être supérieure d'au moins 15% à f_{cj}

7.2.1. Evolution de la résistance dans le temps

Dans le cas courant (voir paragraphe traitant de la maturométrie : loi d'Arrhenius), on considère que la résistance du béton évolue dans le temps très rapidement à court terme (entre 0 et 7 j), puis ralentie (de 7 à 28 j) pour tendre vers une asymptote horizontale à partir de 60 jours. Pour la référence en temps de 28 jours prise dans les calculs, on considère que le béton a atteint, à cet âge, 90% de sa résistance à long terme.

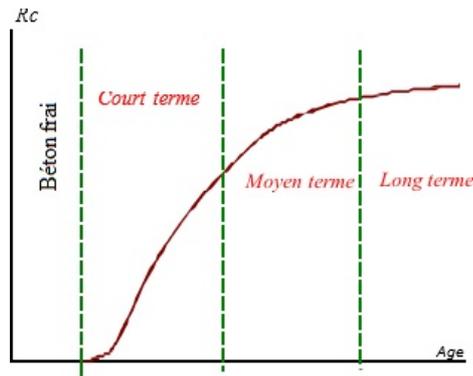


Figure 28: Evolution schématique de l'évolution des résistances à la compression dans le temps

7.2.2. Particularités de l'essai de compression et analyses de la rupture

Pour des résistances supérieures à 60 MPa, la rupture peut être assez brutale, dans les autres cas l'éprouvette rompt par l'affaissement' sur elle-même. Dans ce type de rupture, 2 cônes apparaissent aux extrémités (diabolos) de l'éprouvette rompue. La pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la déformation transversale est libre ; elle résulte des contraintes de traction perpendiculaires à la compression (et à la fissuration). Ce sont ces contraintes de traction qui provoquent la fissuration longitudinale de l'éprouvette ainsi que sa ruine en partie centrale, alors que les extrémités protégées par le frettage créé par les plateaux de la presse ne sont pas détruites.

- **Quelques ruptures singulières**

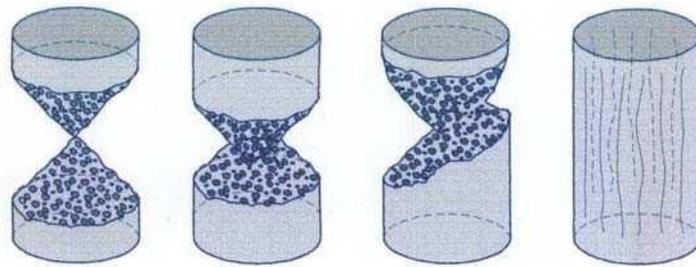


Figure 29. Types ruptures correctes

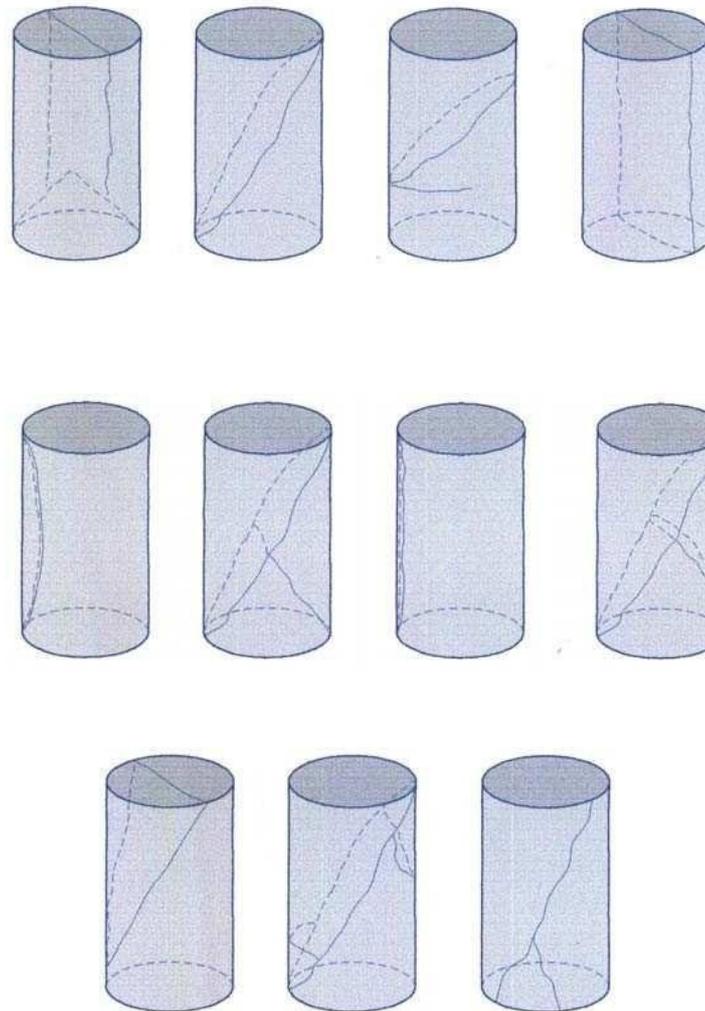


Figure 30: Types ruptures incorrectes

7.3. Traction par fendage (essai Brésilien) NFP 18-408

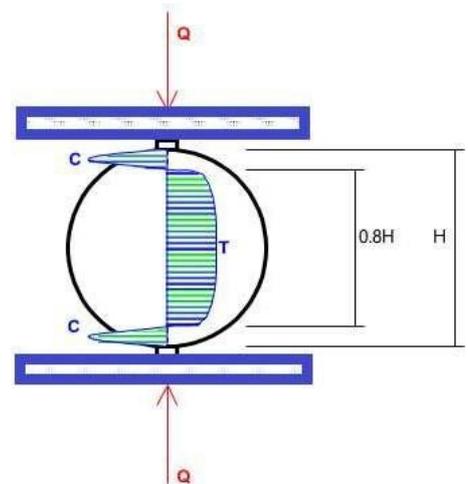
L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant 2 génératrices opposées, entre les plateaux d'une presse. C'est l'essai de référence au sens du BAEL et du fascicule 65A du CCTG.

$$R_t = \frac{2Q}{\pi\Phi L}$$

Q : charge de rupture

Φ : diamètre de l'éprouvette

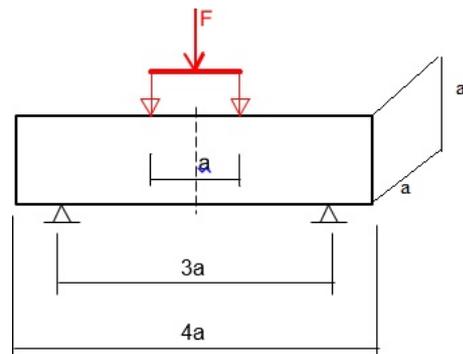
L : longueur de l'éprouvette



5.4. Traction par flexion NFP 18-407

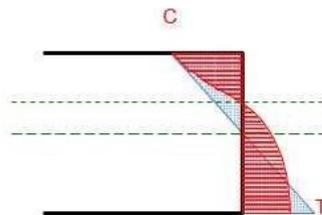
Les éprouvettes sont de dimensions : 7x7x28 ou 10x10x40

$$R_t = 3F / a^2$$



La formule ci-dessus suppose que le matériau a un comportement élastique linéaire. Aussi, certains auteurs proposent un coefficient correcteur de 0.6 pour obtenir la contrainte de traction pure :

Le coefficient correcteur de 0.6 provient du fait que la loi de Hooke lorsque l'on approche de la charge de rupture n'est plus applicable. Voir le diagramme de répartition de contraintes ci-dessous.



7.5. Essais non destructifs

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes [17].

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons, la capacité à résister à l'arrachement,

7.5.1. ESSAI SCLEROMETRIQUE NFP 18-417

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique. Des études réalisées au LCPC ont montré que la corrélation peut prendre la forme :

$$R_c = aI^2 + bI + c$$

Le scléromètre convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier. Une masse commandée par un ressort se déplace sur un plongeur dans un tube de protection. La masse est projetée contre la surface de béton par le ressort, et l'indice sclérométrique est mesuré sur une échelle. La surface sur laquelle l'essai est effectué peut-être horizontale, verticale ou à tout autre angle, mais la corrélation devra prendre en compte l'inclinaison de l'appareil par rapport à cette surface.

L'appareil doit être correctement étalonné et il est souhaitable afin que les résultats soient représentatifs qu'une corrélation à partir d'essais destructifs sur éprouvettes soit préalablement réalisée (détermination de fuseaux de corrélation).

a. Limites et avantages

Le scléromètre est une méthode peu coûteuse, simple et rapide pour connaître la résistance du béton, mais une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies.

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que la régularité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et le plus gros granulats et le degré de carbonatation de la surface.

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

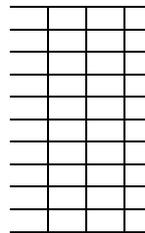
$$R_c = \frac{I_s^2}{37} - 0,3 * I_s$$

I_s : indice sclérométrique

R_c : résistance à la compression

b. Mesures sur éprouvette 16x32

Les éprouvettes préalablement rectifiées conformément aux prescriptions de la norme NFP 18- 416, sont maintenues entre les plateaux d'une presse sous une contrainte de 0.5 MPa. Le scléromètre étant placé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, on relève 27 mesures réparties sur 3 génératrices en 27 points distincts et distants entre eux de 30 mm. Aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces planes de l'éprouvette.



La norme précise que l'indice sclérométrique (I_s) est la médiane des valeurs. Cependant de nombreux laboratoires préfèrent déterminer l'indice sclérométrique comme étant la moyenne quadratique des mesures, après écrêtement des 2 valeurs extrêmes.

c. Mesure sur ouvrage

La surface testée est divisée en zones d'au moins 400 cm² (25x25 cm). La tige de percussion du scléromètre étant perpendiculaire à la surface essayée, on prend 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre 2 points de mesure est d'au moins 30 mm et aucun point ne doit se situer à moins de 30 mm de l'un des bords de la surface testée.

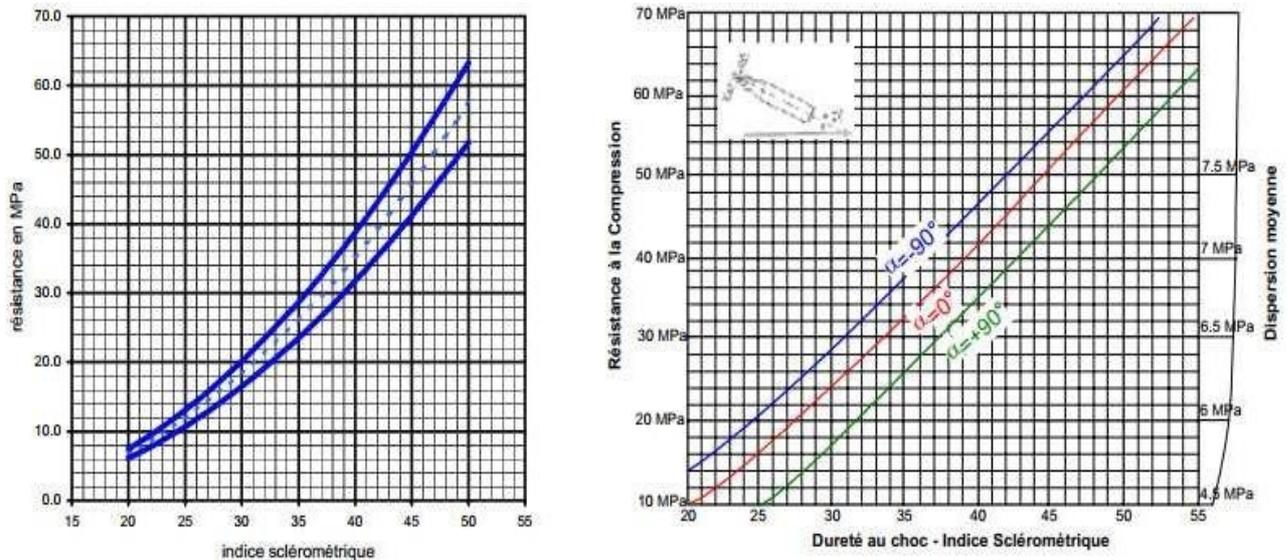


Figure 31. Abaque de teste sclérométrique

7.5.2. Essai d'auscultation sonore 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.

7.5.2.1. 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

souçonner 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

$$R_c = a * e^{(b*v)}$$

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

Tableau 14. Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation

Qualité	Vitesse de propagation m/s
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200 – 4000
Douteuse	2500 – 3200
Mauvaise	1700 – 2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

En première approximation, pour des granulats siliceux de qualité courante (Dmax = 16 mm), et pour un béton de résistance inférieure à 30 MPa, on peut considérer que :

$$R_c = 0,0877 * e^{(0,00147*v)}$$

V : vitesse de propagation (m/s)

Rc : résistance à la compression en MPa

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

$$E_b = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho V_m^2 \quad \text{Ou} \quad E_b = 4HZ^2 L^2 \rho$$

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 Eb : module d'élasticité

ν: Coefficient de Poisson du béton (≈ 0,20)

ρ: masse volumique du béton

V_m : vitesse moyenne de propagation

CHAPITRE 8 : Progrès récents dans la technologie du béton

Le béton est un matériau relativement fragile pour lequel il est très difficile d'éviter l'apparition de fissures.

Sa résistance à la traction est en effet très faible en comparaison de celle à la compression. Par prudence, les normes imposent dans la plupart des cas aux ingénieurs de ne pas en tenir compte pour le dimensionnement des ouvrages en béton. L'apparition de fissures est ainsi inéluctable dès que les sollicitations de traction dans le béton atteignent ou dépassent la valeur de sa résistance à la traction, qui est de l'ordre de 2 à 3 N/mm² pour les bétons courants. Ces sollicitations et le risque de fissuration qui en découle peuvent avoir pour origine l'un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Le retrait du béton
- Le tassement des fondations
- Les variations de température
- Les charges (poids propre, trafic, etc.)
- Le gel
- Des réactions chimiques (corrosion de l'armature, réactions alcalis-silice, attaque sulfatique,)

8.1. Introduction

Les progrès accomplis depuis quelques décennies permettent une très bonne adaptation du béton aux diverses exigences des utilisateurs : les ciments offrent une gamme étendue de caractéristiques : résistance, cinétique de prise ; les adjuvants permettent d'améliorer la mise en place du béton, sa compacité ou son durcissement ; les granulats permettent par leur variété de moduler les propriétés du béton : aspect, poids, dureté de surface, teinte et texture.

Ces nombreuses innovations ont engendré un véritable bouleversement dans la production architecturale. Cette mutation se manifeste par une disparition progressive de la tectonique classique, par des formes libres et souples, les bétons et leurs performances croissantes offrent en effet aux architectes les moyens de concevoir des espaces, des formes et des textures jamais produits auparavant. En plus, Ces innovations sont une réponse :

- ✓ Aux préoccupations environnementales ;
- ✓ Aux nouvelles exigences des normes qui mettent en valeur l'importance de la durabilité des ouvrages ;
- ✓ Aux soucis d'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines ;
- ✓ Aux besoins des maîtres d'ouvrage vis-à-vis de la gestion durable du patrimoine ;
- ✓ Aux exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
- ✓ Aux nécessités des gestionnaires d'ouvrages de limiter les coûts de maintenance et de réparations et de réduire les gênes aux usagers ;
- ✓ Aux contraintes économiques des entreprises ;
- ✓ Aux demandes croissantes de nos concitoyens pour l'amélioration de leur cadre de vie et de leur confort.

Les solutions constructives répondent à toutes les exigences en matière de sécurité, d'esthétisme et de durabilité et offrent de nouvelles potentialités d'expression et de créativité aux ingénieurs comme aux architectes

Tous les ouvrages réalisés aujourd'hui en béton, armé ou non, bénéficient de bétons formulés pour répondre aux contraintes du chantier, et mis en œuvre grâce à des techniques en évolution constante : vibration, traitements thermiques, traitements de surface. Parmi la diversité de l'offre des bétons utilisés, on peut citer les Bétons à hautes performances, (BHP),

CHAPITRE 8 : Progrès récents dans la technologie du béton

bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés et bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) démultiplient les possibilités constructives offertes aux architectes. Ils facilitent le coulage du béton et l'obtention de formes les plus variées, ils permettent d'atteindre des portées toujours plus grandes, ils résistent aux contraintes climatiques les plus extrêmes, etc. En outre, ils réduisent la pénibilité de la mise en œuvre et les nuisances du chantier.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADAM M. Neville, « propriétés de béton » Eyrolles Paris, 2000.
- [2] GRONDIN Aurélie « valorisation des granulats recyclés de béton : études de caractérisation physique et mécanique des bétons de granulats recyclés de béton »
- [3] Baron, Jaques et Ramond Sauterey « le béton hydraulique : Connaissances et pratique », Paris ,1995.
- [4] Jean- Marie Reynouard, Gilles Pijaudier-Cabot « comportement mécanique du béton », Paris. 2005
- [5] Les adjuvants : DEFINITIONS ET OPPORTUNITES D'UTILISATION, Organisée par : ERCE – CTC-Est – GRANITEX ,2004.
- [6] AMOURI Chahinez : « contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performances, durabilité), thèse doctorat de l'université mentouri, Constantine, 2009.
- [7] François PERCHE, « adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments », thèse doctorat de l'université de Rouen, France, THÈSE NO 3041, 2004.
- [8] NF EN 197-1, in Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, edited, AFNOR.
- [9] Jaques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER : Les bétons Bases et données pour leur formulation 2ème tirage 1997. Editions Eyrolles.
- [10] Véronique Baroghel-Bouny. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Mécanique [physics. med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994. Français. fftel-00523299f
- [11] F. PERCHE, Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments. Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [12] Edwige Nicolas. Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/ superplastifiants, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français. (NNT : 2010NAN10052). (tel-01748559)
- [13] Martin, L. H. J., Winnefeld, F., Müller, C. J. et al. 2015: Contribution of limestone

BIBLIOGRAPHIE

to the hydration of calcium sulfoaluminate cement, *Cement and Concrete Composites*
– 62

- [14] ARTHUR BORDY, Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée. *Matériaux*. Université de Cergy Pontoise, 2016. Français.
- [15] Williams PAUCHET, les adjuvants des bétons, 2019, technique de l'ingénieur, Réf : TBA1036 v2
- [16] NF EN 934-1, Adjuvants pour béton, mortier et coulis Partie 1 : Exigences communes, avril 2008, édité AFNOR.
- [17] Georges Dreux Jean Festa. : Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition Eyrolles, ISBN 2-212-10231-3.2002., Nuremberg, Allemagne, 2005.
- [18] YAMADA K., TAKAHASHI T., HANEHARA S., MATSUHISA M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, pp.197-207, 2000.
- [19] FLATT R.J., HOUST Y.F.A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1169-1176, 2001.
- [20] KREIJGER P.C.: Plasticizers and dispersing admixtures. International congress on admixtures, Londres, Royaume-Uni, 1980.
- [21] SPIRATOS N., PAGÉ M., MAILVAGANAM N.P., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR C.: Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology, and Practice, Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 2003.

