

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en Génie Civil
Option : Matériaux en génie civil

THEME

Effet de la température des constituants sur le
comportement mécanique du béton

Présenté par :

Membres de jury :

BEN ABDELKARIM .Sabah

Mr : Moulay Ali .Abderrahmane.

KRIM .Khadem

Président :

Encadré par :

Examineurs

Pr : KHELAFI Hamid

Mr : Abdeljalil. Mohamed

Mr: ABOU Mohamed

2019/2020

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné le savoir, la volonté et surtout la patience pour réaliser ce modeste travail. Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude au Pr. KHELAFI H. et à Mr. MOULAY ALI A. et à Mr. Souilem H. d'avoir accepté de nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement tout le personnel du Laboratoire des travaux publics du sud LTPS (Adrar) pour tous les moyens qu'il a mis à notre disposition pour que nous puissions effectuer notre stage pratique dans les meilleures conditions. Nous n'oublions pas l'aide qui nous a été fournie par le laboratoire de cette entreprise. Enfin, que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation trouveront ici notre profonde reconnaissance.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACES

Tout d'abord nous remercions ALLAH

A mes très chers parents

A mes chers frères,

À mes sœurs,

Et toute la famille

BENABDELKARIM-KRIM

A tous les enseignants de la faculté

des sciences et de la technologie

A tous les étudiants de la promotion 2020



Khadem et Sabah



Sommaire

المحتويات

Introduction générale	1
Chapitre I : Composition du béton	
1.Introduction.....	4
2. Généralités sur les bétons	4
2.1. Historique du béton	4
2.2. Principaux avantages et inconvénients du béton	5
2.3. Classification des bétons :.....	6
2.4. Les domaines d'emploi du béton :	7
3. Composition du béton.....	8
3.1Les granulats	8
3.1.1. Différents types de granulats	9
3.1.2 Le gravier	9
3.1.3 Le sable	10
3.2. Les ciments	11
3.2.1 Définition	11
3.2.2. Fabrication	11
3.2.3Normalisation et classification	12
3.2.4. Les cinq types de ciments courants	15
3.2.5. Propriétés des ciments	16
2.5.1 Temps de prise	16
2.5.2. Le durcissement	17
2.5.3. Fausse prise	17
2.5.4. Chaleur d'hydratation.....	17
3.2.6 Utilisations	18
3.3 Les additions	19
3.4Les adjuvants 3.4.1. Définition	19
3.4.2. Classification des adjuvants	19
3.4.3. Fonctions des adjuvants	20
3.4.4 Les différents types d'adjuvants	20
3.4.6 Utilisations des adjuvants	23
3.5 Eau de gâchage :	23

5-1-1Eau libre	24
5.4 Le rôle de l'eau de gâchage :	24
3.6 Propriétés des bétons	24
3.6.1Le béton frais.....	25
3.6.2Le béton durci.....	26
Conclusion.....	30

Chapitre II : Méthode de formulation du béton

1. Introduction.....	32
2. Méthodes de composition des bétons	32
3. Méthodes des courbes de référence :	32
3.1. Méthode de Bolomey :	33
3.1.1. Le principe de la méthode de Bolomey :	33
3.1.2. Courbe optimale :	34
3.1.3. Calcul du pourcentage des constituants :	35
3.1.4. Détermination de la courbe du mélange :	37
3.2 .Méthode de FAURY [7] :	41
3.2.1. Calcul de $D2$:	43
3.2.2. Détermination des éléments secs :	43
3..2.3.Courbe de référence de Faury :	44
3.3. Méthode de Joisel:.....	44
3.4. Méthodes de DREUX GORISSE :	45
3.4.1. Résistance souhaitée :	45
3.4.4.Dosage en pourcentage des granulats :	47
3.4.5. La ligne de partage :	49
3.4.6. Dosage en masse des granulats :.....	50
Conclusion.....	52

Chapitre III : Influence des effets climatiques sur les propriétés du béton

1.Introduction.....	54
2.Le bétonnage par temps chaud:.....	54
2.1.Évolution de la porosité avec la température :	55
2.2.La rhéologie :	58
2.3.Évolution des propriétés thermiques avec la température :.....	58
2.4. Les temps de prise :	61

2.5. Les résistances mécaniques :.....	61
2.6. La fissuration :	62
2.7.Éclatement des bétons sous sollicitations thermiques.....	62
2.7.1 Les différents types d'instabilités thermiques :	62
2.7.2 Les hypothèses d'instabilités thermiques :	63
2.7.2.1 L'aspect thermo-hydrique :	63
2.7.2.2 L'aspect thermomécanique :	64
2.7.2.3 Le couplage thermo-hydro-mécanique :	64
2.8. Préconisations pour le bétonnage par temps chaud :	65
2.9.Conséquences des effets climatiques :.....	66
2.9.1. Fissuration plastique :.....	66
2.9.2. Fissuration thermique :.....	67
2.9.3. Problématiques liées aux variations de température.....	67
2.9.3.1. Le séchage des bétons à température ambiante :.....	67
2.9.3.2. Mouvements hydriques dus à la variation de température :.....	68
2.9.3.3. Modifications physiques et chimiques du béton sous hautes températures :	69
2.9.3.4. Variations dimensionnelles due au chauffage :.....	70
2.10. Mesures préventives :	71
2.10.1.Respecter la température maximale du béton :	71
2.10.2.Résistance à la compression insuffisante :	71
2.11.Principe de l'écrasement :.....	72
2.11.1.La résistance mécanique en fonction d'âge dans les deux modes (int, ext (C1)) :.....	74
2.11.2. La résistance mécanique en fonction de température :.....	76
3.Le bétonnage par temps froid :.....	77
3.1Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais :	77
3.2 Conséquences du gel sur le béton frais :.....	78
3.3Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid :.....	79
3.4Composition du béton :.....	79
3.5Apport et maintien de chaleur	79
3.6. Cas des ciments à durcissement rapide :	80
Conclusion :	81
Conclusion générale	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85

Liste des figures

Chapitre I

01	Les constituants de béton	08
02	Les étapes de fabrication de ciment	12
03	Test du cône d'Abrams	26

Chapitre II

04	Les pourcentages de ces constituants	33
05	Courbe optimale	34
06	la courbe du plus gros granulats	34
07	Juxtaposition des deux courbes	35
08	Superposition partielle des deux courbes	36
09	Discontinuité entre les 2 courbes	37
10	Les pourcentages de tamisât de chaque granulats et du pourcentage du granulats dans le mélange	39
11	Courbe de référence de Faury	44
12	Dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée	47
12	Courbe théorique des mélanges granulaires en fonction des proportions	48

Chapitre III

13	accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants	55
14	Evolution de la porosité d'une pâte de ciment CEM/A (CPJ) 32.5 d'un âge compris entre 40 et 60 jours, d'après Alarcon	57
15	Evolution de la distribution des pores pour un béton ordinaire ($R_c=36$ MPa), d'après Tsymbrovska	57
16	Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température	58
17	évolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau	58
19	Evolution des propriétés thermiques obtenues sur des bétons ordinaires, avec et sans fibres, par Míndegui : (a) conductivité thermique, (b) chaleur spécifique, et (c) diffusivité thermique	61
20	Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température	61
21	évolution des résistances en compression en fonction de la température.	62
22	Modèle de pore sphérique utilisé par Lottman [69] pour le calcul des contraintes de traction.	64
23	Augmentation de la teneur en eau de gâchage avec l'augmentation de température	66
24	Effet des températures élevées sur la résistance à la compression du béton à différents âges	72
25	Mesure la température à l'extérieur et mesure la température à l'intérieur	72
26	Variation de la résistance en fonction d'âge(C1)	74
27	Variation de la résistance en fonction d'âge(C2)	76
28	Résistance à la compression en fonction de la température (C1)	76
29	Résistance à la compression en fonction de température (C2)	77
30	Début de prise du béton en fonction de la température	78
31	Délai de décoffrage en fonction de la température	78

La liste des tableaux

Chapitre I

01	La teneur des constituants du béton ordinaire en poids et en volume	08
02	Les cinq types de ciment de la norme européenne	12
03	Les différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1	13
04	limites tolérables	09
05	Utilisation des bétons.	18
06	Liste des principaux adjuvants	22
07	Utilisations des adjuvants	23
08	Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône	26
09	Les différentes formes de béton selon leur affaissement trouvé	26

Chapitre II

10	Pourcentages de tamisât de chaque granulat et du pourcentage du granulat dans le mélange	37
11	Coefficient k en fonction des types de bétons et de granulats	39
12	Valeur du coefficient A	42
13	Valeurs approximatives du coefficient granulaire G	46
14	correction du dosage en eau selon le diamètre D de mélange granulaire	47
15	les valeurs du coefficient correcteur K	49
16	Coefficient de compacité selon la consistance et le serrage	50

Chapitre III

17	Mentionne les valeurs maximales de température du béton frais selon l'épaisseur de l'ouvrage à réaliser	71
18	Résultats de la résistance mécanique (CEMII/B 42.5N +100% SD (C1))	72
19	Résultats de la résistance mécanique (100%SD+CEMII/B STG)	74

Résumé

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation pratiquement dans tous les domaines du génie civil.

Cette étude vise à identifier l'influence de la température des constituants sur les comportements mécaniques du béton à l'état frais et durci, car les conditions climatiques sévères engendrent des problèmes particuliers sur les propriétés associées au béton, résultant de la température élevée dans de nombreux cas. L'évaporation de l'eau de gâchage augmente dans de nombreux cas. Aussi, l'évaporation des taux d'humidité du mélange du béton (ses constituants) dans ces conditions climatiques a un impact significatif négatif sur la qualité finale du béton.

Les mots clés

Comportement de béton, formulation du béton, température, constituants, méthodes de composition.

ملخص

الخرسانة هي مادة من مواد البناء التي تجد حقل استعمالها التطبيقي في ميدان الهندسة المدنية .

تهدف هذه الدراسة الى معرف كيفية تأثير درجة مكونات الخرسانة على سلوك الخرسانة سواء في حالتها الرطبة أو الجافة، لان الظروف الجوية تظهر جملة من المشاكل الخاصة المرتبطة بالخرسانة، ينتج من درجة الحرارة العالية في كثير من الحالات زيادة معدل تبخر الماء من خلطة الخرسانة الطازجة ، كما أنه ينتج في درجة الحرارة المنخفضة تضخم للخرسانة.

لهذا الظروف المناخية لديها تأثير كبير على الجودة النهائية للخرسانة .

الكلمات المفتاحية

سلوك الخرسانة، تركيب الخرسانة، المكونات، طرق تكيل الخرسانة.



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est un matériau de construction largement utilisé, ce matériau est hétérogène avec ses différents constituants, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après le durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural, la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ». Il est vu comme une matière moderne, grâce à sa grande résistance à la compression. Le principe du béton est pourtant connu depuis l'antiquité. Bien que sa fabrication soit plutôt simple, certaines règles doivent être respectées. En effet, l'eau, le ciment, les adjuvants et les granulats qui constituent le béton sont soumis à des normes strictes.

Malgré les bonnes performances des bétons à la température ambiante, il existe encore de nos jours des phénomènes qui sont mal compris par les chercheurs et les ingénieurs en pratique, ce béton peut présenter un comportement crucial et une instabilité aux hauts degrés de chaleur. Les qualités de la résistance mécanique, de facilité d'utilisation et de durabilité font du béton, un matériau incontournable de choix pour la réalisation de nombreux ouvrages et bâtiments de génie civil.

On sait qu'il y a Influence de la température sur la résistance et la durabilité de béton, ce dernier se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus conduit à la dégradation des propriétés physiques, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et réduit sa résistance.

L'objectif de notre projet de fin d'études consiste à étudier le comportement d'un béton ordinaire composé de constituants locaux. Pour cela, nous dépendons de certaines études précédentes.

Pour viser ces objectifs on divise ce travail à trois chapitres, qui sont comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur le béton et ses composants essentiels, leur méthodes de formulation et ainsi que sa résistance à la compression.

Introduction générale

Nous avons étudié la méthode de formulation du béton dans le deuxième chapitre, les essais effectués sur les matériaux utilisés dans ce travail, et la formulation du béton par les trois méthodes : Méthode de Bolomey, de Faury et de Dreux-Gorisse.

Dans le troisième chapitre nous avons essayé de donner les paramètres d'influence des effets climatiques sur les propriétés du béton.

Finalement, nous avons clôturé ce travail par une conclusion générale et des recommandations.



CAPITRE I:

Composition du béton

1.Introduction

Le béton est un matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages en génie civil. Fabriqué à partir de trois composants de base d'un béton ordinaire sont L'eau et le ciment et les granulats, les adjuvants et les additions peuvent améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci. Dans ce chapitre on va présenter en l'étude bibliographique sur les généralités sur le béton et ses composants et le quelques axes de recherche sur le sujet.

2. Généralités sur les bétons

Le béton est composé de matériaux généralement d'origine minérale. Il met en présence plusieurs matériaux afin de les agglomérer entre eux. Des matières inertes comme les "granulats" (gravier et sable), généralement issus de roches calcaires ou siliceuses, avec du ciment ou de l'argile, appelés "liants" mélangé à l'eau ou du bitume, ainsi que des produits chimiques dits "adjuvants" pour modifier les propriétés physiques et chimiques du composite. Mélangés avec de l'eau, ces matériaux forment une pâte dont l'homogénéité varie d'un mélange à un autre selon leur utilisation. On peut avoir un béton moulé en atelier pour les constructions préfabriquées ou coulées sur chantier pour les constructions dites en béton banché. Le béton durcit avec le temps, on dit qu'il fait prise. Le rapport indique le nombre de litres d'eau de gâchage par kilogrammes de ciment (E/C). Il a une grande importance pratique. Il permet en premier lieu de se faire une idée sur l'état de la pâte de ciment correspondant à chaque mélange de béton ou de mortier. Plus la valeur numérique de ce rapport est petite, plus la pâte du ciment est concentrée et plus sa force de liaison est élevée. Au contraire, plus elle est grande, plus la pâte de ciment est diluée et fluide. C'est l'un des paramètres majeurs conditionnant la porosité et la résistance de la matrice cimentaire du béton durci. Plus la valeur d'E/C est petite, plus les résistances en compression des bétons sont élevées et plus leur porosité diminue [5], [6].

2.1. Historique du béton

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique 1737, étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel. L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 et

l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. [37]

Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français. C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot 1848, le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris 1898. [74]

Au XXe siècle, le béton se développera considérablement et parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, avec une réalisation comme l'Arche de la Défense, ou en génie civil : pont de l'Île de Ré, pont sur l'ÉLORN, pont de Normandie, Viaduc de Millau [74].

2.2. Principaux avantages et inconvénients du béton

➤ 2.1. Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication. [8]

➤ 2.2. Inconvénients du béton:

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à

son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte.

De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation)
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage. [9] ;

2.3. Classification des bétons :

béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. [40]

En général, le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$;
- Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$;
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$;
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$. Le béton courant peut aussi être classé en

fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume). [10]

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

a) Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment que dans les travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2003 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

b) Les bétons lourds dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.

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

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

e) Les bétons de fibrés, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain. [10]

2.4. Les domaines d'emploi du béton :

→4.1. Le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normale lorsqu'on considère son utilisation dans la construction de logements : pour les murs, 80% des techniques en individuelle, plus de 90% en collectif pour les structures ; pour les planchers, le béton est pratiquement le matériau idéal.

Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux, ainsi que dans grands édifices publics et les bâtiments industriels. [40]

→4.2. Les travaux publics

a) Les ponts

Les progrès techniques et, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres. [40]

b) Les tunnels

Pour les grands tunnels dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est, soit coulé sur place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués.

Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer-le tunnelier. [40]

c) Les barrages

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles. [40]

d) Les routes

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse traitement de surface les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien. [40]

e) Autres ouvrages

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshores ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées. [40]

3. Composition du béton

Le béton est un matériau composite, les trois composants de base d'un béton sont : l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimique et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange. (Tableau 1, Figure1)

Tableau 1: La teneur des constituants du béton ordinaire en poids et en volume. [40]

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22	1 - 6	7 – 14	60 – 78
Poids (%)	5 – 9	-	9 – 18	63 – 85

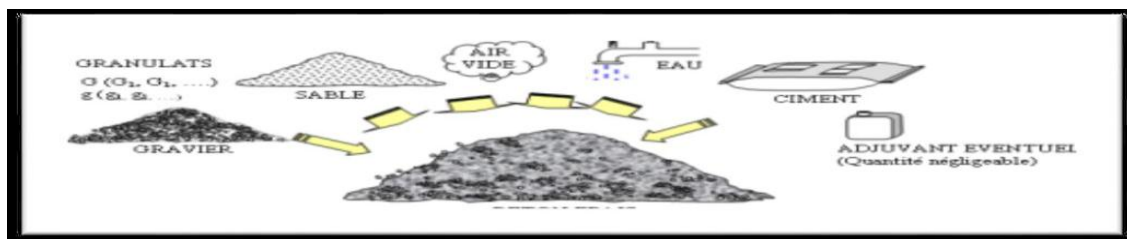


Figure 1 : Les constituants de béton. [40]

Les constituants du béton :

3.1 Les granulats

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les

granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le 1^{er} économique: diminution de la quantité de liant (ciment et addition); et le 2^{ème} technique : limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment). [11]

Selon leurs dimensions, on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2) [11].

On distingue les familles de granulats suivantes :

- Fillers 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm
- Sablons 0/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm
- Sables 0/D où $1 < D < 6,3$ mm - Graves 0/D où $D > 6,3$ mm
- Gravillons d/D où $d > 1$ et $D < 125$ mm
- Ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.

3.1.1. Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

- **Naturel:** d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). [74]

- **Artificiel:** d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres. [74]

- **Recyclé:** obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments. [74]

3.1.2 Le gravier

Les matériaux les plus usuels pour les mortiers et bétons sont d'origine alluvionnaire (dits roulés), semi-concassés ou concassés obtenus à partir de roches massives. Les gravillons 5,6/20 qui sont les plus usuels ont une granulométrie adaptée à la composition des bétons. Les tout-venants de rivière ou de carrière possèdent ou

trop ou pas assez d'éléments fins (sables), ce qui les rend impropres à l'usage pour des bétons en élévation. De même que pour les sables, les gravillons doivent être propres. Ils ne doivent contenir ni argile, ni matières terreuses, ni poussières provenant du concassage. En effet, si la surface des gravillons est sale, l'adhérence avec les cristaux hydratés du ciment est mauvaise. [13]

3.1.3 Le sable

Un sable de bonne granulométrie doit contenir à la fois des grains fins, moyens et gros. Les sables très fins, de dunes ou marins sont à éviter.

Les sables doivent être propres. La propreté est fournie par l'essai d'équivalent de sable (norme NF EN 933-8).

Les sables peuvent être classés, selon leurs provenances comme suit :

- Sable des rivières : il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers. [41]

- Sable de mer : qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences. [41]

- Sable de carrière : extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière. [41]

- Sable de feuilles : est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux. [41]

- Sables artificiels : les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé. [41]

- Sable de dune : les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara. [41]

3.2. Les ciments

3.2.1 Définition

Les ciments sont des liants hydrauliques fabriqués à partir :

- Du clinker qui est obtenu par cuisson, jusqu'à fusion partielle, d'un mélange dosé et homogénéisé comprenant essentiellement de la chaux, de la silice, de l'alumine et l'oxyde de fer;
- Du laitier qui est obtenu par refroidissement brusque de la scorie en fusion provenant des hauts fourneaux;
- De la pouzzolane ou des cendres volantes en provenance des centrales thermiques;
- Des fillers qui sont obtenus par broyage de roches de qualités convenables et qui, par leur granularité, agissent sur certaines qualités des ciments (maniabilité,...). [51]

3.2.2. Fabrication

La fabrication du ciment Portland se fait à partir de la pierre calcaire et de l'argile. Ces matériaux sont extraits des carrières, concassés et stockés, puis l'analyse chimique est faite pour déterminer le dosage des matières premières. Après avoir été dosées, les matières premières sont broyées et mélangées. La poudre ainsi obtenue est introduite dans l'extrémité supérieure d'un four rotatif légèrement incliné. Un appareil est placé à l'extrémité inférieure du four pour que la température soit comprise entre 1450 et 1650 °C. Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme chimiquement les matières premières en clinker de ciment. Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25mm. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) pour contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland [53].

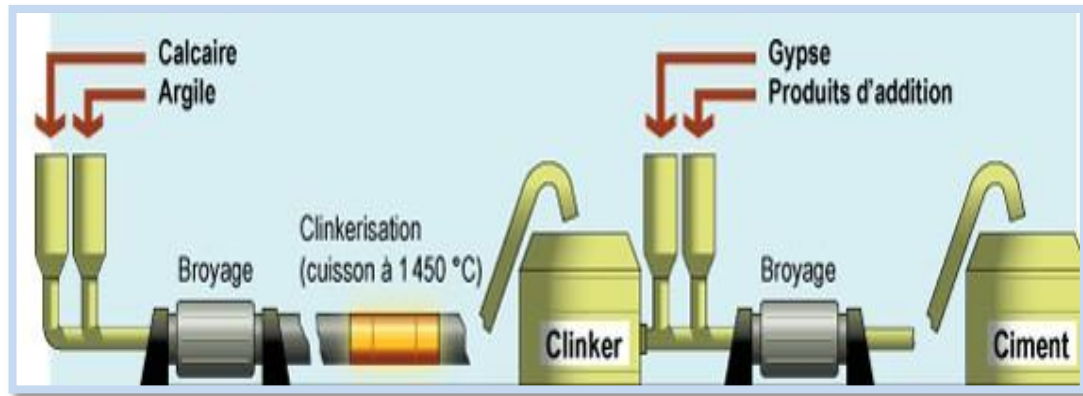


Figure 2: Les étapes de fabrication de ciment. [69]

3.2.3 Normalisation et classification

- **Les ciments et la normalisation :**

Plusieurs normes sont utilisées, pour la normalisation des ciments. Les normes en vigueur et utilisées par les laboratoires de contrôle sont celles publiées par l'AFNOR.

La norme de référence des ciments courants est la norme européenne EN 197-1 publiée par AFNOR sous la référence NF EN 197-1, est subdivisée en trois rubriques:

- une première partie descriptive qui définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments;
- une deuxième partie qui fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques;
- une troisième partie consacrée aux critères de conformité, les procédures de leur vérification et les seuils de garantie.

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants. [51]

Tableau 2 : Les cinq types de ciment de la norme européenne. [51]

Type	Désignation
Ciment Portland	CEM I
Ciments Portland composés	CEM II / A ou B
Ciment de haut fourneau	CEM III / AB ou C
Ciment pouzzolanique	CEM IV / A ou B
Ciments composés	CEM V / A ou B

Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

Les ciments de la norme NF EN 197-1 sont définis comme ciments courants, à l’instar des autres ciments plus spécifiques, dans la composition, la fabrication et/ou l’utilisation. Le tableau suivant donne une description détaillée des différents types de ciments courants. [51]

Tableau 03 : Les différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1. [51]

Type	Notation composition (en % en masse)				
	Dénomination	symbole	clinker	Constituants principaux	Constituants secondaires
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 - 100	0	0 - 5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A - S	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - S	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland à la fumée de silice (3)	CEM II/A - D1	90 - 94	6 - 10	0 - 5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A - P	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - P	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - Q	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - Q	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A - V	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - V	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - W	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - W	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A - T'	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - T'	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A - L	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - L	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - LL	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - LL	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland composé (4) (5)	CEM II/A - M	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - M	65 - 79	21 - 35	0 - 5
CEM III	ciment de haut fourneau (6)	CEMIII/A	35 - 64	36 - 65	0 - 5
		CEMIII/B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
		CEMIII/C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
CEM IV	Ciment pouzzolanique (5) (7)	CEMIV/A	65 - 90	11 - 35	0 - 5
CEM V	Ciment composé (5)	CEMIV/B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
		CEMV/A	40 - 64	36 - 60	0 - 5
		CEM V/B	20 - 39	61 - 80	0 - 5

(1) : Les valeurs données se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

(2) : Signification des lettres :

- Quantité des constituants principaux (autres que le clinker) :
 - A : 6 à 20 %
 - B : 21 à 35 %
 - C : 36 à 65 %
- Nombre : la lettre M pour signaler qu'on a au moins 2 constituants principaux
- Noms :
 - S : laitier de haut fourneau
 - D1 : fumée de silice
 - P : pouzzolane naturelle
 - Q : pouzzolane naturelle calcinée
 - V : cendres volantes siliceuses
 - W : cendres volantes calciques
 - T' : schiste calciné
 - L ou LL : calcaire

(3) : La proportion de fumée de silice est limitée à 10 %

4) : Présence de plusieurs constituants principaux à différentes proportions

(5) : Les constituants principaux doivent figurer dans la désignation du ciment (Symboles entre parenthèses)

(6) : Le laitier de haut fourneau est le seul principal ajout au clinker pour ce type de ciments

(7) : Les principaux ajouts sont de la fumée de silice, de la pouzzolane naturelle et des cendres volantes (D, P ou Q et V ou W)

Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégiera souvent les CPA par rapport aux CPJ. [51]

Tableau 4 : Exigences sur les caractéristiques physiques et chimiques du ciment selon la norme NF P 15 301. [55]

PROPRIETES	TYPE DECIMENT	CLASSE RESISTANCE	DE EXIGENCES (%)			
Perte au feu	CPA	Toutes classes	<5,0			
	CHF					
	CLK					
Oxyde de magnésium	CPA	Toutes classes	<5,0			
	Résidu insoluble			CPA	Toutes classes	<5,0
				CHF		
	CLK					
Sulfates (SO ₃)		35	<3,5			
		CPA		35R		
		CPJ	45			
		CPZ	45R	<4,0		
		CLC	55			
			55R			
		CHF	Toutes classes			
Chlorure	Tous types	Toutes classes sauf	<0,10			
		55R				
		55	<0,05			

3.2.4. Les cinq types de ciments courants

1. Le ciment Portland: CEM I

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires. [14]

2. Le ciment Portland composé: CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants: laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs. [55]

3. Le ciment de haut fourneau: CEM III/A ou B

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker. Le CEM III/C (anciennement ciment de laitier au clinker), contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker. [55]

4. Ciment pouzzolanique CEM IV / A ou B

Il existe deux classes de ciment pouzzolanique:

- La classe CPZ-CEMIV/A: dont le pourcentage en cendres ou pouzzolanes est compris entre 10 et 35%
- La classe CPZ-CEMIV/B: dont le pourcentage en cendres ou pouzzolanes est compris entre 36 et 55%. [55]

5. Le ciment composé: CEM V/A ou B

Anciennement ciment au laitier et aux cendres, il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. [14]

3.2.5. Propriétés des ciments

2.5.1 Temps de prise

La détermination des temps de prise qui sont mesurés à l'aide de différents accessoire montrés sur l'appareil de Vicat, est effectuée à l'aide de 1.13 ± 0.05 mm de diamètre. Cette aiguille, sous l'effet d'un poids prédéterminé est utilisée é pour pénétrer une pâte de consistance normalisée placée dans un moule spécial. Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pate pure de ciment. [17]

Le temps de fin de prise est déterminé à l'aide d'une aiguille semblable, à laquelle est fixé un accessoire circulaire creux de 5 mm de diamètre, placé à 0.5 mm du bout de l'aiguille. La fin de prise a lieu lorsque l'aiguille, lentement déposée sur la surface de la pâte ne pénètre que de 0.5 mm dans la pâte sans que le sarcle ne laisse de trace sur sa surface. Le temps de fin de prise est enregistré à partir du moment où l'eau est ajoutée au ciment. [17]

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

- La nature du ciment,
- La finesse de mouture du ciment : plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court.

➤ La température : alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné, le début de prise sera de 18heures à 2°C, de 5 heures à 10°C, de 3h 30 à 20°C et de 30 min à 35°C. [17]

➤ La présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton ralenti la prise.

➤ L'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres, un inconvénient, a une action retardatrice sur la prise. En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20°C :

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement, tous les ciments ont des temps de prises largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h pour la majorité des ciments [17].

2.5.2. Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter. [17]

2.5.3. Fausse prise

Dans la composition des ciments, on a en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. [17]

2.5.4. Chaleur d'hydratation

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier: [56]

- **La finesse de mouture:** plus le ciment est broyé finement, plus la chaleur d'hydratation est élevée ; [56]
- **La nature des constituants:** les ciments CPA comportent presque exclusivement du clinker et dégagent plus de chaleur que les ciments avec constituants secondaires ; [56]
- **La nature minéralogique du clinker :** plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte ; [56]
- La température extérieure. [56]

3.2.6 Utilisations

Tableau 5 : Utilisation des bétons. [63]

CIMENT	Usages
CEM I	<p>Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué</p> <p>Béton précontraint.</p> <p>Décoffrage rapide, mise en service rapide</p> <p>Bétonnage jusqu'à une température extérieure entre 5 et 10° C.</p> <p>Béton étuvé ou auto-étuvé.</p>
CEM II / A ou B	<p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés</p> <p>CEM II/A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple).</p> <p>Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.</p> <p>Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.</p> <p>Dallages, sols industriels.</p> <p>Maçonneries.</p> <p>Stabilisation des sols.</p>
CEM III / A,B ou C et CEM V / A ou B	<p>Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles...).</p> <p>Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments utilisés sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15-319.</p> <p>Travaux à la mer : les ciments utilisés sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317.</p> <p>Bétons de masse.</p> <p>Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations).</p> <p>Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.</p> <p>Stabilisation des sols.</p>

3.3 Les additions

Les additions sont généralement des additions minérales sous forme de poudre fine ou de fibres qui peuvent améliorer certaines propriétés du béton. A quelques exceptions près, elles peuvent être employées tant dans le ciment que dans le béton.

Parmi les additions, on compte :

- farine de roche (farine de calcaire et de quartz).
- cendre volante.
- fumée de silice.
- schiste calciné.
- laitiers granulés de haut fourneau.
- pouzzolane.
- pigments.
- fibres. [18].

3.4 Les adjuvants

3.4.1. Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques « purs » ou des mélanges de produits organiques ou minéraux qui sont généralement incorporés aux bétons lors du malaxage ou lors de la mise en œuvre. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. L'utilisateur peut être amené à utiliser simultanément plusieurs adjuvants ayant des fonctions différentes, soit pour obtenir des effets conjoints, soit pour corriger des effets secondaires non recherchés ou amplifier l'une des fonctions principales.

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et les divers composants de celui-ci, en particulier du ciment. Pour l'interaction adjuvant-adjuvant, l'employeur doit s'assurer que les adjuvants utilisés sont compatibles entre eux, et qu'ils sont de même marque. [69]

3.4.2. Classification des adjuvants

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants:

- **ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton:** plastifiants-réducteurs d'eau, super plastifiants (anciennement fluidifiants);

- **ceux qui modifient la prise et le durcissement:**

Accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise;

- **ceux qui modifient certaines propriétés particulières:** entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse. [69]

3.4.3. Fonctions des adjuvants

- **Fonction principale**

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons et (ou) mortiers et (ou) coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des matériaux utilisés. [51]

- **Fonction secondaire**

Un adjuvant peut également présenter accessoirement une ou plusieurs fonctions secondaires s'étendant au même domaine. Les fonctions secondaires sont également caractérisées par une efficacité qui est le plus souvent indépendante de celle de la fonction principale. [51]

- **Effets secondaires**

L'emploi d'un adjuvant peut entraîner des conséquences dites effets secondaires qui sans être recherchés n'en sont pas moins inévitables. [51]

3.4.4 Les différents types d'adjuvants

- **Les plastifiants réducteurs d'eau :**

De leur rôle double, ils permettent à la fois d'offrir au béton une consistance humide et la possibilité de réduire la quantité d'eau, la résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. Ils se caractérisent souvent par un effet secondaire « retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage élevé. [[51]

- **Super plastifiants hautement réducteurs d'eau :**

Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants mais il se produit avec une intensité bien importante. [51]

- **Rétenteurs d'eau;**

Ils ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons. Ils sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment. [51]

- **Entraîneurs d'air**

Les entraîneurs d'air permettent une diminution du dosage en eau à maniabilité équivalente mais les résistances mécaniques sont cependant affaiblies et d'autant plus qu'elles sont plus élevées. Ils améliorent aussi la plasticité et l'ouvrabilité du béton. Accélérateurs de prise et de durcissement : Ils augmentent la vitesse d'hydratation du ciment donc permettent sa prise rapide. Ils sont utilisés souvent pour les bétonnages par temps froid ou pour les travaux urgents. Les résistances peuvent être légèrement diminuées [51]

- **Retardateurs de prise:**

Les retardateurs de prise ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise du ciment. Ils augmentent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils permettent aussi de réguler le dégagement de chaleur dû à l'hydratation du ciment.

En général, les retardateurs ralentissent la dissolution du ciment et la précipitation des hydrates et retardent ainsi la prise. Les retardateurs diminuent les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales au-delà de 28 jours. Ils sont à base de Lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb, d'acides carboxyliques, de fluorures, de phosphates ; [19]

- **Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, des mortiers ou des coulis. Bien

souvent ces deux fonctions sont liées et l'on retrouve l'une d'elle comme effet secondaire de l'autre

Les adjuvants correspondant à la norme mentionnée ne contiennent pas de chlore; les constituants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque. Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc. Les accélérateurs chlorés sortent du champ de la marque NF Adjuvants. Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée. [19]

- **Hydrofuges :**

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire. Ils ne sont vraiment efficaces que si le béton est bien compact et homogène et que toutes les précautions sont prises afin d'éviter la formation des fissures. . [51]

3.4.5/ Les principaux adjuvants :

Tableau 6 : Liste des principaux adjuvants. [51]

Adjuvants	Nature
Retardateurs	• Sucres et gluconates
	• Acides citriques et tartriques
	• Oxyde de zinc, les phosphates
Accélérateurs	• De prise : Alcalis, carbonates et sulfate de soude ou de potasse
	• De durcissement : Chlorure et carbonate
Plastifiant réducteur d'eau	• Lignosulfonates
	• Résine vinsol
Entraîneurs	• Aryl alkyl sulfonâtes
	• Résine mélanine sulfones
Super plastifiant	• Naphtalène- sulfonâtes
	• Vinylsulfonate
Rétenteurs d'eau	• Méthyle cellulose (methocel)

3.4.6 Utilisations des adjuvants

Tableau 7 : Utilisations des adjuvants. . [51]

Adjuvants	Utilisation
Super plastifiants	• Nécessité d'une bonne ouvrabilité
	• Préfabrication
Plastifiants	• Bétons à hautes résistances
	• Transport pneumatique du béton
	• Béton coulé sous l'eau
	• Béton maigre : blancs, blocs
	• Béton routier
	• Sable manquant de fines
	• Béton très ferrailé Plastifiants
Accélérateurs	• Injection (coulis et mortiers)
	• Décoffrage rapide
	• Temps froid - préfabrication
	• Travaux d'étanchement, cachetage,
Retardateurs	• Réparation rapide, pistes d'aérodrome, routes, scellement
	• Temps chaud
	• Injection à grande profondeur (élévation de température)
	• Transport de béton sur longue distance
	• Voile d'étanchéité
	• Reprise de bétonnage – confection de béton avec granulats apparents (parements lavés)
	• Parois moulées dans le sol
Entraîneurs d'air	• Coulage en contenu
	• Route, barrage, ponts - travaux
	• Ouvrages exposés à l'action des eaux agressives
	• Bétons extrudés

3.5 Eau de gâchage :

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par la norme NF P 18-303 DE 1941. Une prochaine norme (dont le numéro pourrait être EN1008), en cours de préparation, précisera les critères d'évaluation retenus pour de son aptitude à être utilisée pour la confiance des bétons. [58].

L'Ancienne norme étant très sommaire, les indications qui suivent donnent des précisions sur les critères qui pourraient être retenus, pour définir la qualité d'une

eau et les valeurs limitées à respecter suivant les types du béton à confectionner. Pour convenir à la confection du béton, les eaux ne doivent contenir ni :

Composés qui risquent d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales. La norme P18-303 limite, à cet effet, ces risques. [58]

5-1-1Eau libre

L'eau n'ayant pas participé à la réaction d'hydratation est dite libre ; mais elle ne l'est que relativement à l'eau liée car la grande finesse du ciment anhydre et la dimension très faible des pores du ciment hydraté font que cette eau est soumise à des forces de surface qui limitent ses possibilités de déplacement. L'eau libre est cependant susceptible de migrer à l'intérieur de la pâte de ciment et, dans certaines conditions, de s'évaporer. [20]

5.2Eau liée

L'eau liée peut l'être chimiquement : elle entre dans la composition chimique de l'hydrate. C'est ainsi que le silicate tricalcique (C_3S) s'hydrate en présence d'eau pour donner un hydrate de composition $3CaO$ noté en industrie cimentière C-S-H. Mais l'eau peut aussi liée physiquement à l'hydrate. [20]

5.3 L'eau capillaire

Elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces superficielles. Cette forme d'eau est séparée de la phase gazeuse par des ménisques, elle est la première à s'évacuer ou à s'évaporer lors d'un séchage [57].

5.4 Le rôle de l'eau de gâchage :

C'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable. Donc l'eau a essentiellement deux fonctions une fonction physique, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage), et une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment. [60]

3.6 Propriétés des bétons

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés: d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années. [37]

3.6.1 Le béton frais

La propriété

Essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. [74]

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont:

- la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances;
- une porosité accrue;
- un risque de ségrégation des constituants du béton;
- un retrait augmenté;
- un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique. [74]

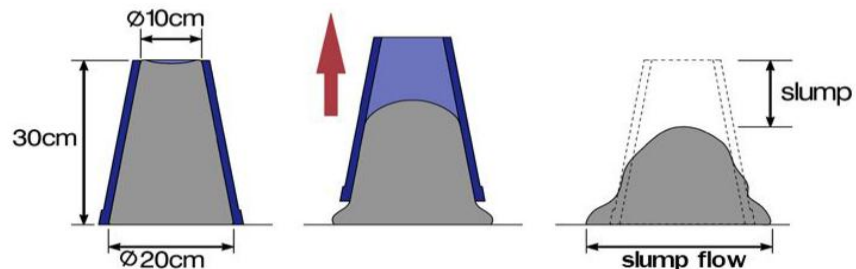


Figure 3: Test du cône d'Abrams. [58]

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

Tableau 8 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très Plastique TP	10 à 15	–
Fluide F	16	3

Tableau 9: Les différentes formes de béton selon leur affaissement trouvé. [55]

Affaissement	Béton	Mise en œuvre
0– 2cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9cm	Plastique	Vibration courante
10 – 13cm	Mou	Piquage
>13cm	Très Mou	Leger piquage

3.6.2Le béton durci

La porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité – rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret (début du xx^e siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de

la durabilité du béton. [74]

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par:

- l'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850: dans 1 m³ de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants, il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires);
- l'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires.

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau.

La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité.

- Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins
- Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion.

L'acier est en effet protégé contre son oxydation tant qu'il est dans un milieu de pH basique; or, l'hydratation du ciment produit suffisamment de chaux pour créer ce milieu basique. En revanche, si cette chaux est mise en contact avec le gaz carbonique de l'air, elle se carbonate pour former du carbonate de calcium CaCO₃ de pH acide. La diffusion de l'air dans les capillaires du béton sera d'autant plus lente que le béton présente une faible porosité retardant ainsi sa carbonatation et la protection des armatures contre la corrosion. [74]

Les résistances mécaniques

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent

recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. On a pu voir précédemment que la résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

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

$$R = k \left(\frac{C}{C + E + V} \right)^2$$

R = résistance du béton

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

œuvre

C = dosage en ciment

E = dosage en eau

V = volume d'air subsistant

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

- Lors des essais destructifs, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques; la plus courante en France est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm; confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.

- Les essais non destructifs peuvent utiliser le scléromètre, appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son au travers du béton (4000 m/s pour un béton courant).

[74]

Résistance à la compression

Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3. [60]

Résistance à la traction :

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désigné par f_{t28} . [61]

Conclusion

Cette synthèse bibliographique nous a montré que nombreux produits peuvent être utilisés dans la formulation du mortier et aussi du béton. Les objectifs sont :

- Améliorer certaines propriétés mécaniques et physiques.
- Différentes additions minérales peuvent être ajoutées à la matrice cimentaire.
- Différents types des adjuvants sont utilisés pour les formulations des bétons.
- Différentes catégories de granulats et diverses origines sont utilisés.
- Meilleure liaison des constituants de béton avec l'eau de gâchage.

La deuxième partie de ce chapitre est basé sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton ordinaire.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving inward. The text is centered on the scroll.

CHAPITRE II

*Méthode de formulation
des bétons*

1. Introduction

La formulation joue un rôle important qui consiste à choisir des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre, elle doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins difficile vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats [49].

2. Méthodes de composition des bétons

La recherche de la granulométrie optimale d'un béton est fondamentale, car c'est elle qui conditionne toutes les qualités du béton : ouvrabilité, résistance, imperméabilité...etc.

Les méthodes de composition sont nombreuses. On distingue celles qui utilisent des courbes de référence et celles basées sur d'autres principes [50].

3. Méthodes des courbes de référence :

Elles sont données par ordre chronologique :

- ❖ Méthode de Fuller-Thompson.
- ❖ Méthode de Bolomey.
- ❖ Etude théorique de Caquot.
- ❖ Méthode de Joisel.
- ❖ Méthode d'Abrams.
- ❖ Méthode de Vallette.
- ❖ Méthode de Faury.
- ❖ Méthode Dreux-Gorisse.
- ❖ Méthode LCPC.

❖ Méthode Bétolab [24].

3.1. Méthode de Bolomey :

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre

2,5 et 2,7 kg/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants. [54]

➤ Considération expérimentale :

On se réfère dans ce cas aux courbes granulométriques des constituants secs. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies a lui aussi une courbe granulométrique. En fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques. Le problème est de trouver qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter ; cette courbe sera dite " courbe optimale ". [54]

3.1.1. Le principe de la méthode de Bolomey :

Elle consiste à :

- déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs,
- calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale,
- déduire la composition d'un mètre cube de béton. [54]

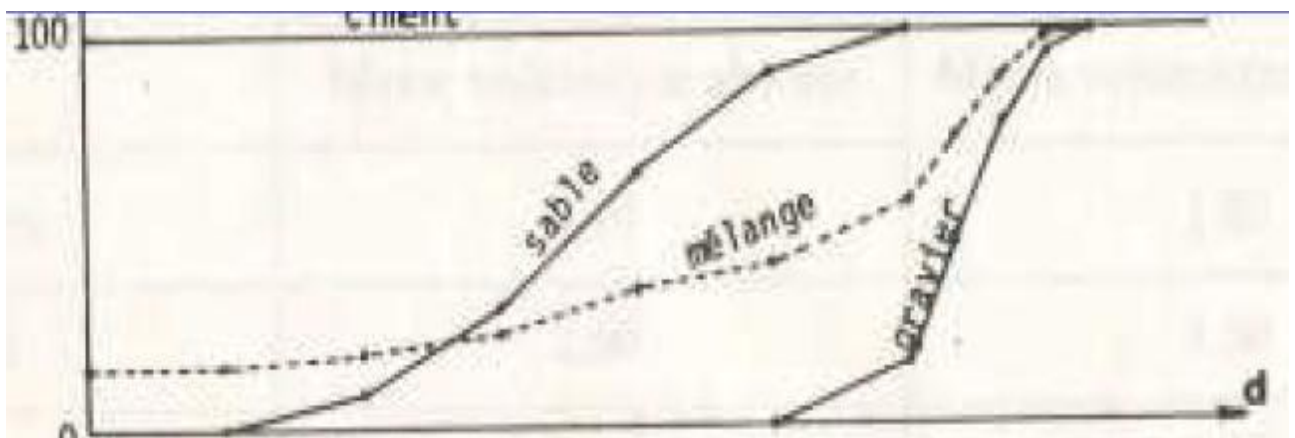


Figure 4 : Les pourcentages de ces constituants. [54]

3.1.2. Courbe optimale :

L'équation qui régit cette courbe est exprimée par la relation :

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D}$$

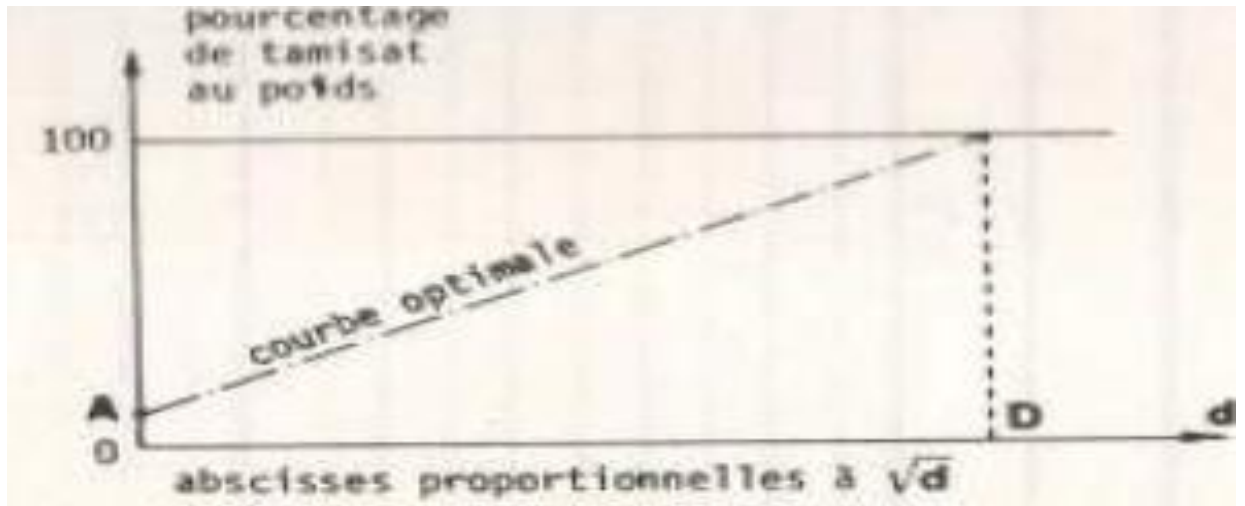


Figure 5 : Courbe optimale. [54]

A et D sont des constantes.

L'équation est sous la forme d'une droite : $y = a + b \cdot x$ qui passe par les points : $d = 0$ et $P = 0$; $d = D$ et $P = 100$.

A : représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats. [54]

D : est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisante pour laisser passer la totalité des granulats.

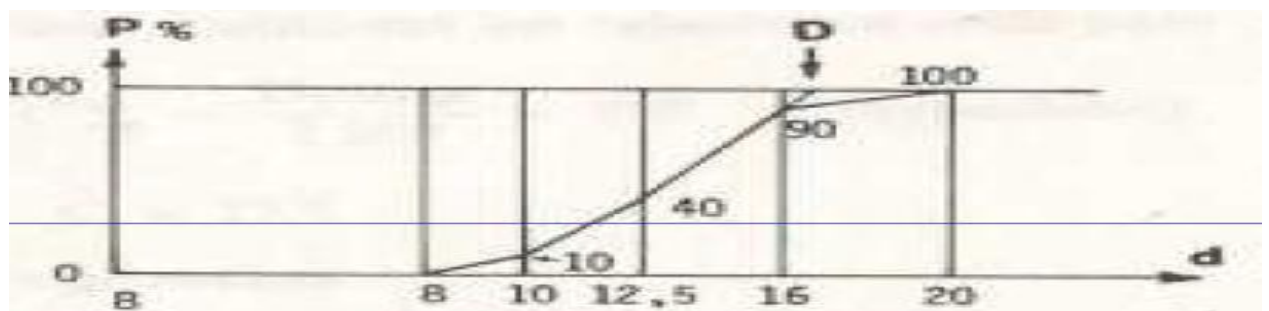


Figure 6 : la courbe du plus gros granulat. [54]

Dans l'exemple suivant, la valeur de D est comprise entre 16 et 20 mm, pour l'obtenir il suffit de prolonger l'avant dernier tronçon de la courbe du plus gros granulat.

On remarque que cette construction n'est possible que lorsque l'on se trouve en présence d'une queue de granulométrie (cas très fréquent) ; si le point était situé au-delà de 2/3 de l'intervalle 16-20 où la droite de 20 ; c'est 20 qui serait la valeur retenue de D. [54]

3.1.3. Calcul du pourcentage des constituants :

a. Cas du ciment :

$$C(\%) = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100$$

b. Cas des granulats :

Une méthode graphique nommée la "Méthode de Joisel" est appliquée. Cette dernière est universelle, applicable à tous granulats ; toutes les courbes optimales et tous les modes de graduation des axes.

Si on considère le cas le plus simple, un mélange de deux granulats (d_1/d_2) ; (d_3/d_4) ; ces courbes tracées : 3 cas seulement sont possibles :

d_3 Coïncide avec d_2 : juxtaposition des deux granulats,

d_3 à gauche de d_2 : superposition partielle,

d_3 à droite de d_2 : discontinuité des deux granulats. [54]

Comment faire ?

La méthode de Joisel repose sur le tracé d'une parallèle à l'axe des ordonnées, prenons successivement les trois cas :

1- Juxtaposition des deux courbes :

la verticale ici est l'ordonnée correspondant à d_2 d_3 . Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M qui reporté en N sur l'échelle des ordonnées détermine deux segments :

ON: % du granulat $d_1 d_2$, ou % des composants de dimension $< d_2$

N100: % du granulat $d_3 d_4$, ou % de tout ce qui est $> d_2$

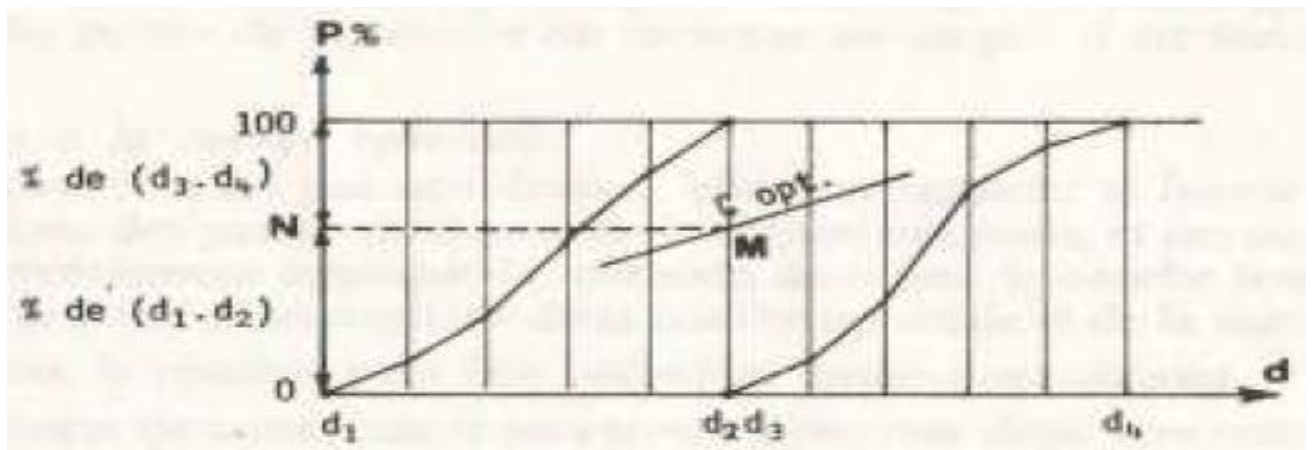


Figure 7: Juxtaposition des deux courbes. [54]

2- Superposition partielle des deux courbes :

La verticale est placée à l'abscisse " d_0 " telle que pour cette dimension de tamis, le % du tamisât du gros élément soit égale au % de refus du plus petit ($ab = cd$). M et N ont la même signification que précédemment.

Il est important de placer avec précision la verticale " d_0 " car l'ordonnée du point d'intersection de la courbe optimale et de cette verticale dépend de son abscisse. Le procédé consiste de déplacer une règle jusqu'à ce que les deux segments apparaissent égaux. Manque de rigueur ; il est préférable de recourir à une construction graphique. Le principe consiste à faire rabattre le demi-plan inférieur sur le demi-plan supérieur autour de l'horizontale XX' (50 %). Les segments se coupent précisément au point recherché surtout si l'angle est grand.

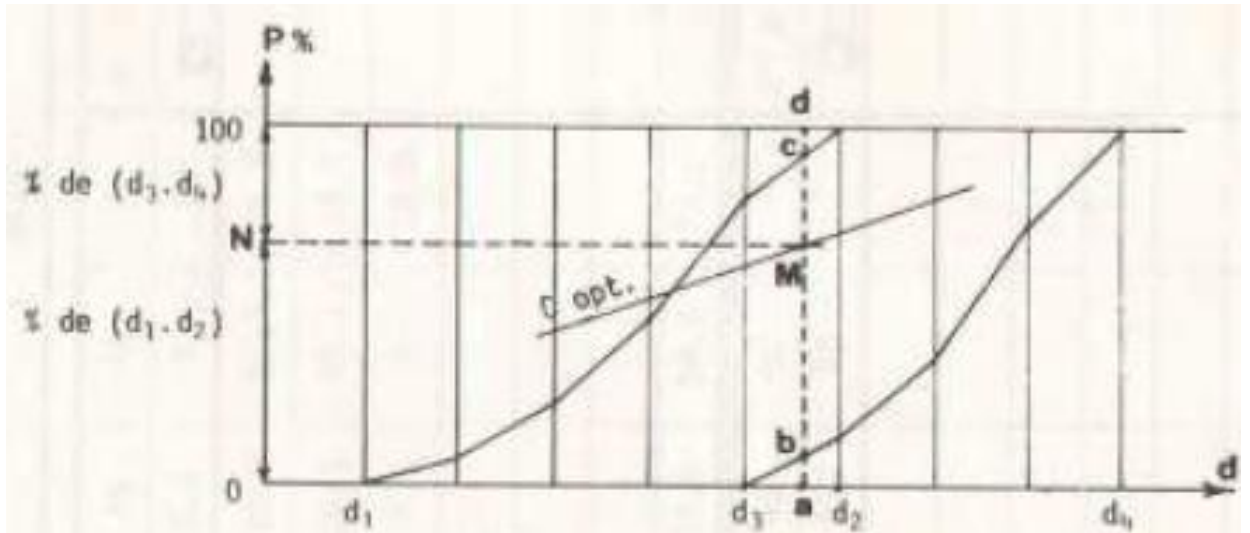


Figure 8 : Superposition partielle des deux courbes. [54]

3-Discontinuité entre les 2 courbes : la verticale est au point d'abscisse :

$$d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2}$$

Et la construction est la même que précédemment.

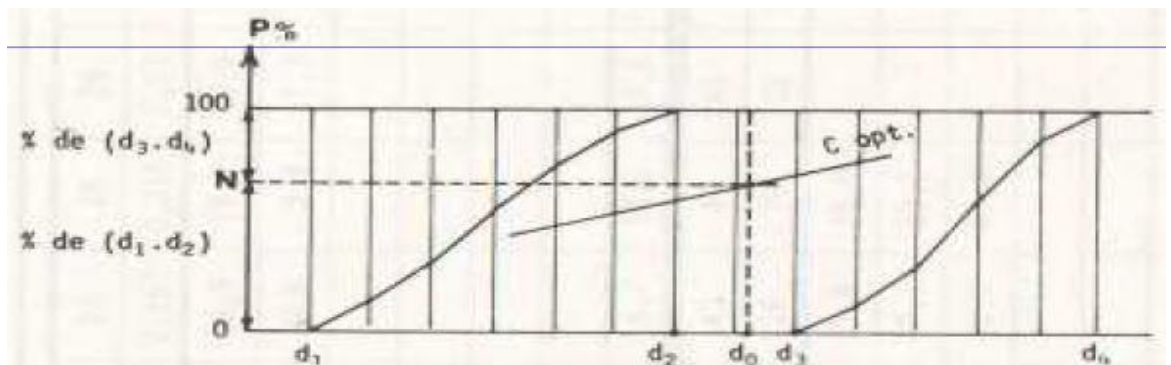


Figure 9 : Discontinuité entre les 2 courbes. [54]

3.1.4. Détermination de la courbe du mélange :

Les pourcentages seront déterminés par le calcul sans qu'une nouvelle analyse granulométrique ne soit nécessaire. Le pourcentage du ciment passe à travers tous les tamis. Le pourcentage des tamisâtes des granulats est calculé pour chaque tamis sur la base des pourcentages de tamisât de chaque granulat et du pourcentage du granulat dans le mélange. Le pourcentage des tamisâtes du mélange est le cumul de tous ces tamisâtes calculés à part pour chaque granulat. [54]

Tableau 10 : Pourcentages de tamisât de chaque granulat et du pourcentage du granulat dans le mélange. [54]

Constituant	%	20	23	26	29	32	35	38	39	40	41
		s									
		0.08	0.16	0.31	0.6	1.2	2.5	5.0	6.3	8	10
		0	0	5	3	5					
Ciment	15.9	15.9	15.9	15.9	15.	15.	15.	15.	15.	15.	15.
					9	9	9	9	9	9	9
Sable	39.1		0.8	3.9	11.	23.	35.	39.	39.	39.	39.
					7	4	2	1	1	1	1
Gravillon	45.0							2.2	4.5	9	18.
											0
totaux	100.	15.9	16.7	19.8	27.	39.	51.	57.	59.	64.	73.
	0				6	3	5	2	5	0	0
Constituant	%	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
		s									
		12.5	16	20	25	31.	40	50	63	80	
						5					
Ciment	15.9	15.9	15.9	15.9	15.	15.	15.	15.	15.	15.	
					9	9	9	9	9	9	
Sable	39.1	39.1	39.1	39.1							
Gravillon	45.0	31.5	42.7	45.0							
totaux	100.	86.5	97.7	100.							
	0			0							

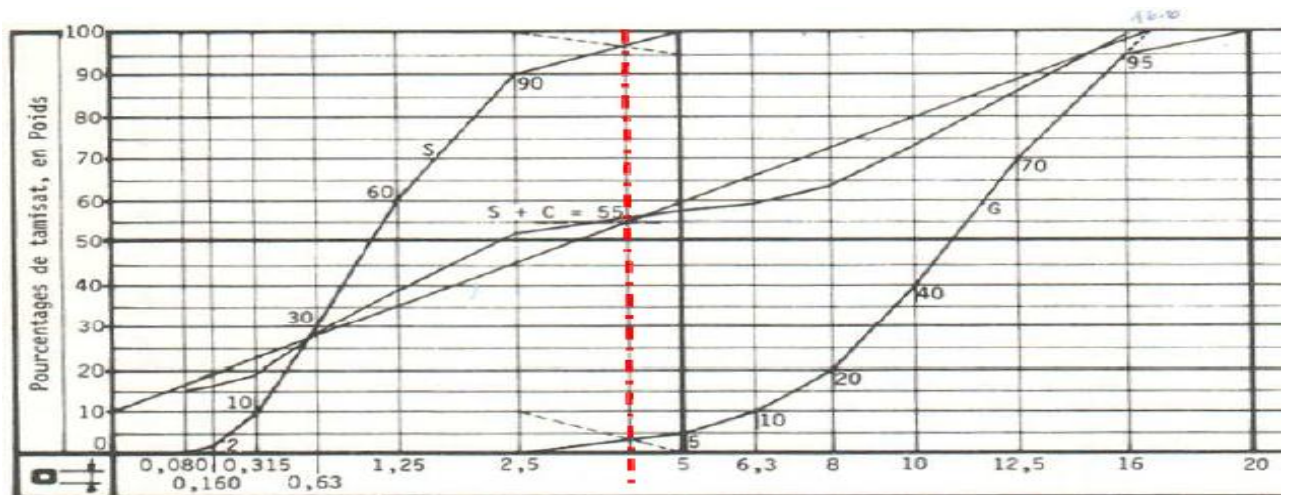


Figure10: Les pourcentages de tamisât de chaque granulat et du pourcentage du granulat dans le mélange. [54]

Si nous avons correctement appliqué la méthode de Joisel, la courbe trouvée doit passer sensiblement par le point d'intersection de la courbe optimale et la verticale de Joisel.

On ne s'est préoccupé jusqu'à présent que des éléments secs ; mais le béton contient aussi de l'eau. Il nous faut alors déterminer cette quantité. [54]

Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour cette détermination ; il est donc nécessaire de faire un calcul en fonction de relation empirique :

- petit constituants ($D < 0,16$ mm) :

$$E = 0,23 \times \text{poids des éléments secs} < 0,16$$

- gros éléments ($D \geq 0,16$ mm) :

$$E_2 = \frac{K \cdot \text{poids des éléments secs} > 0,16}{1,17 \sqrt[3]{0,16 D}}$$

S'il s'agit de passoire au lieu de tamis le coefficient 1,17 serait remplacé par 1.

Le coefficient k est tiré du tableau 10 qui suit :

Tableau 11. Coefficient k en fonction des types de bétons et de granulats. [54]

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	0.08	0.095

Béton vibré	0.09 ÷ 0.095	0.1 ÷ 0.11
Béton coulé	0.1 ÷ 0.11	0.12 ÷ 0.13

La quantité de l'eau doit être exprimée en % comme pour le ciment et les granulats, par rapport au total des éléments secs.

$$E\% = \frac{E_1 + E_2}{\text{masse des élément secs}} \cdot 100$$

Le rapport E/C est important dans la composition du béton ; cette constante doit se rapprocher le plus de 0,5. Cette quantité d'eau calculée n'est qu'une estimation.

La gâchée d'essai, fournie une valeur plus précise.

Il s'agit d'introduire dans une bétonnière des quantités de constituants secs proportionnelles à ceux calculées, après leur mélange à sec, on ajoute l'eau progressivement jusqu'à ce que la consistance voulue soit obtenue. [54]

La quantité d'eau qui y correspond est multipliée par le facteur de réduction pour déterminer la quantité réelle d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton.

L'expérience montre que si la valeur absolue de la différence entre la quantité réelle et la quantité calculée est inférieure ou égale à 5 kg/m³, les résultats trouvés sont conservés sans modification. Dans le cas contraire, on refait les calculs avec la valeur trouvée par l'essai de gâchage. [54]

$$E\% = \frac{\text{quantité réelle d'eau de gâchage}}{\text{masse des élément secs}} \cdot 100$$

Le calcul du poids des éléments secs s'effectue en supposant connue la densité apparente du béton. [54]

La masse des éléments secs = masse totale - masse de l'eau de gâchage,

La masse des granulats = masse des éléments secs - masse du ciment,

La masse de chaque granulat = % calculé × masse des granulats.

La masse des éléments secs = masse totale - masse de l'eau de gâchage,

Le calcul du poids des éléments secs s'effectue en supposant connu la densité apparente du béton.

La masse des granulats = masse des éléments secs - masse du ciment, granulats.

Cette méthode donne des bétons riches en éléments fins, donc maniable, susceptible de rester bruts de décoffrage. On l'emploiera lorsque ces quantités sont recherchées, la résistance mécanique devant simplement être bonne. Son emploi est fréquent pour les travaux routiers et pour les bétons devant être mis en place par pompage. [54]

3.2 .Méthode de FAURY [7] :

En 1942, J. FAURY proposa [24], comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu. Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi **Faury** adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, **Faury** a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas là même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{D}$ [24]. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense) [24].

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y=A+17\sqrt[5]{D}\frac{B}{\frac{R}{D}-0.75}$$

D : grosseur maximum de l'agrégat (en mm).

R : rayon moyen du coffrage (en mm) (parties de l'ouvrage les plus ferrillées).

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton.

B : dépend du serrage. Il varie de 1, pour une vibration puissante, à 1.5 pour un serrage moyen. [24].

Tableau 12: Valeur du coefficient A. [24]

	Sable et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sable et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide. Mise en œuvre sans serrage	≥ 32	≥ 34	≥38
Consistance fluide pour faible serrage	30 à 32	32 à 34	36 à 38
Consistance molle pour serrage moyen	28 à 30	30 à 32	34 à 36
Consistance ferme pour serrage soigné	26 à 28	28 à 30	32 à 34
Consistance très ferme pour serrage puissant	22 à 24	26 à 28	30 à 32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22 à 24	24 à 26	28 à 30
Serrage exceptionnellement puissant	<22 (à déterminer dans chaque cas)	<24 (à déterminer)	<28 à déterminer)

Le calcul est-il fait selon les étapes suivantes :

$$D_{max} = D_{n-1} \left(1 + \frac{x}{2y}\right)$$

D_{n-1} : Le diamètre qui correspond au tamis n-1.

X : le refus sur le tamis n-1.

Y: le refus entre D_{n-1} et $\frac{D_{n-1}}{2y}$

Alors : $D_{max} = D_n(1 + \frac{x}{2y})$

$$Y \frac{D_{max}}{2} = 27 + 17.8 \sqrt[5]{D_{max}} + 3.5$$

3.2.1. Calcul de $\frac{D}{2}$:

D : la fraction max de la classe supérieure.

$D_{100\%} \dots D$: le diamètre du tamis situé avant le premier tamis d'analyse granulométrique.

D'après ce calcul la courbe de référence de Faury est définie par trois points

$$[0.0065 ; 1], [\frac{D}{2}; Y \frac{D_{max}}{2}], [D_{100\%} ; 100\%]$$

Après le traçage la courbe granulaire de FAURY.

La quantité E, d'eau est donnée par la formule suivante :

$$E \frac{0.39}{\sqrt[5]{D}} \times 1000 \dots (2)$$

3.2.2. Détermination des éléments secs :

Eléments secs ES= 1000- E

Pour notre cas on a choisi le dosage de ciment à 350 kg /m³

Donc le volume de ciment dans un mètre cube de béton égal $V_C \frac{350}{M_{vabs}}$

Alors le pourcentage de ciment égal $\frac{V_C}{E_S}$

Les pourcentages

-D'après la courbe on obtient alors :

-Le pourcentage de sable.

-Le pourcentage de gravier (3/8).

-Le pourcentage de gravier (8/15).

-Le pourcentage de gravier (15/28).

-La composition d'un mètre cube de béton en volume égal à :

Sable = le pourcentage de sable × ES.

Gravier (3/8) = le pourcentage de 3/8 × ES.

Gravier (8/15) = le pourcentage de 8/15 × ES.

Gravier (15/25) = le pourcentage de 15/25 × ES.

Ciment = le dosage choisi par un mètre cube.

Eau = calculé par la formule (2).

La composition en masse :

Les quantités massiques des granulats sont déterminées par la formule suivante : [24]

$$la\ volume\ en\ litre \times \frac{ladensité\ absolue}{ladensité\ apparente} = la\ masse\ en\ kg$$

3..2.3.Courbe de référence de Faury :

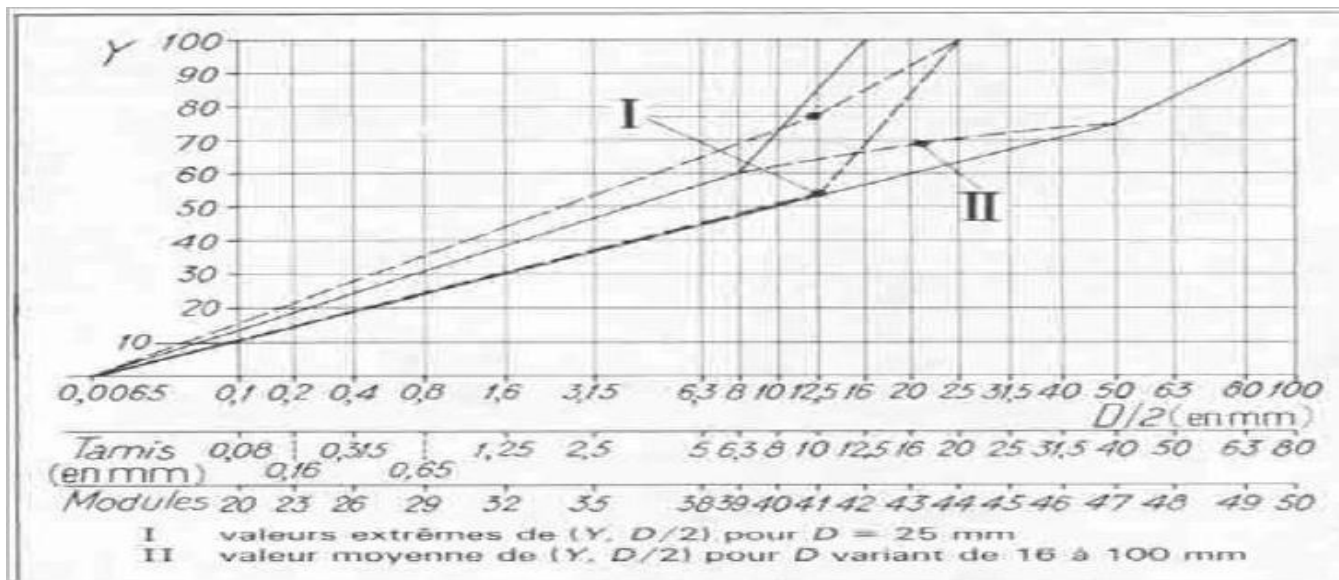


Figure 11: Courbe de référence de Faury [24]

3.3. Méthode de Joisel:

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, A. Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de

m^3/d , m^3 dépendant de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage, m^3 peut alors varier de 3 à 10. Comme dans la théorie de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité.

Comme pour les méthodes de Faury et Valette, le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement sur le plan granulométrique, à la compacité maximale, ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200 Kg/ m^3) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400 Kg/ m^3 dans la plus part des cas). Une correction doit être apportée dans ces sens. [64]

3.4. Méthodes de DREUX GORISSE :

C'est la méthode de fabrication qu'on a utilisée dans notre étude, cette méthode est la plus utilisée actuellement. Nous rappelons que cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié (précontraint), mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés. [4]

3.4.1. Résistance souhaitée :

En général, on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique s , il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours.

f_c supérieure à f_{c28}

$$f_{c28} = f_c - 0.8 s. [4]$$

3.4.2. Résistance visée

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée. Ainsi, la résistance visée.

$$f_c = f_{c28} + 15\% \cdot f_{c28}$$

$$f_c = 1,15 f_{c28}. [4]$$

3.4.3. Dosage en ciment et en eau

Le dosage en eau et en ciment dépend de la résistance visée, et de la qualité du ciment et des granulats, ainsi expérimentalement, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$f_c = ()$$

f_c : résistance visée à 28J. C : dosage en ciment kg/m^3 de béton.

E : dosage en eau kg/m^3 de béton.

C : classe vraie de ciment en MPa.

G : coefficient granulaire.

Expérimentalement, il est établi que cette qualité dépend des granulats, mais également de son diamètre selon les valeurs suivantes :

Tableau 13: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G. [4]

Qualité des granulats	Dimension D_{\max} des granulats		
	Fins $D_{\max} < 12,5 \text{ mm}$	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$	Gros $D_{\max} > 50 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Cette relation permet de déterminer le rapport $C/E = f_c / () + 0,5$

Il est à observer à travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton soit fort.

Inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, on a également moins besoin le ciment lorsque la qualité ou la dimension des granulats augmentent. [4]

Le problème consiste à délier le dosage en ciment du dosage en eau.

Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée, ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque suivant :

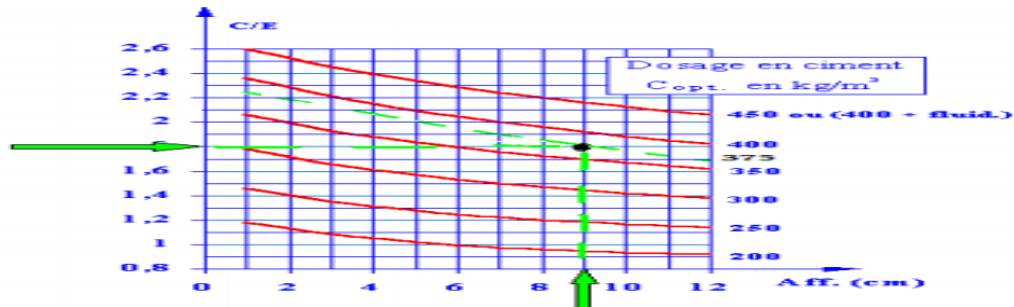


Figure 12: Dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée. [4]

Il est à observer que plus l'ouvrabilité désirée est importante plus il faut d'eau et plus il faut de ciment.

La quantité d'eau dépend également du diamètre des grains à humidifier, le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire représentatif maximal, EX

:(D=25mm).

Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon le diamètre D.

Tableau 14: correction du dosage en eau selon le diamètre D de mélange granulaire. [4]

Dimension maximale des granulats en mm	10	12.	16	20	25	31.5	40	50
		5						
Correction sur le dosage en eau en%	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

3.4.4. Dosage en pourcentage des granulats :

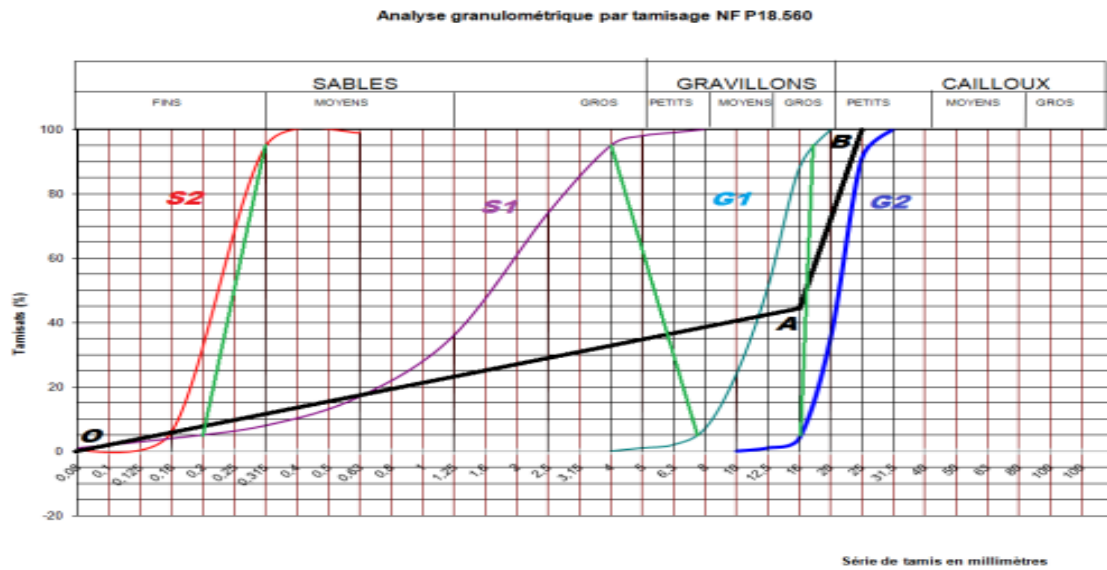


Figure 13: Courbe théorique des mélanges granulaires en fonction des proportions.

[4]

Les points O et B, sont invariables quel que soit les proportions du mélange.

Le point d'origine O est fixé à 0% de tamisats sur le plus petit tamis, 0,080mm.

Ce point est repéré par ses coordonnées : O [0,080 ; 0]

De même, B se situe sur le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât.

Ce point est repéré par ses coordonnées : B [D ; 100]

Pour le point de briseur A, il apparaît que le tamisât sur lequel il se situe est invariable quel que soit les proportions du mélange.

Observant de plus près, il apparaît que ce tamis se situe à $D/2$, si $D \leq 25$ mm, et au milieu de l'intervalle [5 ; D] si $D \geq 25$.

Il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure, cette position dépend des proportions du mélange. Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquent, sur sa résistance.

Le problème consiste donc à déterminer l'ordonnée du point de brisure qui permettra de donner la meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode de DREUX-GORISSE. [4]

L'ordonnée optimale du point de brisure, YA est déterminée par la relation suivante :

$$YA = 50 + K + Ks + KP$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. [4]

Tableau 15: les valeurs du coefficient correcteur K. [4]

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

K_s , ajustement de la granularité du sable.

Pour $2,2 \leq MF \leq 2,8 \rightarrow K_s = (6 \cdot MF) - 15$

MF: Module de finesse du sable.

K_p , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

$K_p = 0$ si le béton est non pompable.

$5 \leq K_p \leq 10$ si le béton est pompable.

3.4.5. La ligne de partage :

La ligne de partage joint d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulats au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire de plus gros granulats, le

point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique de mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier.

Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection, ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier. [4]

3.4.6. Dosage en masse des granulats :

La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire, mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre, D des granulats, des conditions de vibrations du béton et de sa plasticité

L'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs suivantes :

Tableau 16 : Coefficient de compacité selon la consistance et le serrage. [4]

Consistance	Serrage	compacité (c ₀)						
		D _{max} = 5	D _{max} = 8	D _{max} =12,5	D _{max} = 20	D _{max} =31,5	D _{max} = 50	D _{max} = 80
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840

	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Nota :

* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra

d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = - 0,01$)

Sable et gravier concassé ($c_1 = - 0,03$)

* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0.03$)

* Pour un dosage en ciment $C \geq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant :

$$(c_3 = (C - 350) / 5000)$$

La compacité représente la proportion du volume de matière que contient le matériau.

Le dosage en béton est déterminé pour obtenir 1m^3 de béton en place

$$1\text{m}^3 = 1000 \text{ L}$$

$$V_{\text{total}} = 1000. (\text{Compacité})$$

$$\rho_c = C/V_c \rightarrow V_c = C / \rho_c$$

ρ_c : masse volumique de ciment

Comme la proportion de sable ρ_s 1%, ρ_s 2% et de gravier ρ_g 1%, P_g 2% qui compose le mélange granulaire ont été déterminés par rapport à leur volume absolu, il est possible d'en déduire le volume absolu de sable et le volume absolu du gravier présent dans le mélange.

$$V_{\text{Granulats}} = V_{\text{total}} - V_c$$

$$VS1 = \rho_s\% \cdot V_{\text{Granulats}} ; VS2 = \rho_g\% \cdot V_{\text{Granulats}}$$

$$g1 = \rho_g \% \cdot V \text{ Granulats} ; Vg2 = \rho_g \% \cdot V \text{ Granulats}$$

Là encore, la connaissance des masses volumiques absolues des matériaux permet de calculer les masses de sable et de gravier qui correspondent à ces volumes absolus.

$s1, s2$ est les masses volumiques absolues de sable S1 et S2.

$g1, g2$ est les masses volumiques absolues de gravier $g1$ et $g2$.

$$MS1 = s1.VS1; MS2 = s2.VS2 \text{ M}$$

$$g1 = g1.Vg1 ; Mg2 = g2.Vg2$$

Ainsi toutes les masses des constituants du béton ont été déterminées pour obtenir un béton conforme aux attentes. Il est maintenant nécessaire de réaliser des éprouvettes, pour vérifier et ajuster les dosages expérimentaux afin de garantir la qualité du béton. [4]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiée défini un mélange optimal qui puisse assurer la résistance et la maniabilité désirée du béton. En ce qui concerne les formulations de béton, nous avons étudié plusieurs méthodes de formulation de béton.

La formulation d'un béton se résume alors en quatre étapes majeures :

- Détermination de la dimension maximale des granulats ;
- Détermination de la courbe granulométrique optimale des granulats ;
- Détermination du dosage en eau et air, en fonction de l'objectif d'ouvrabilité ;
- Détermination du dosage optimale en fines, qui sera en substitution du ciment ou en addition, ceci est en fonction des objectifs de résistances, et en respectant les prescriptions relatives à la durabilité.

CHAPITRE III:

*Influence des effets
climatiques sur les
propriétés*

1.Introduction

En raison des conditions que traverse le pays (coronavirus), il ne nous a pas été possible de réaliser des travaux pratiques, pour cela nous nous sommes appuyés uniquement sur l'analyse et la recherche des études antérieures. [39]

Les conditions de température élevées généralement rencontrées en période estivale produisent une évaporation rapide de la surface du béton et en accélèrent la prise.

Différents facteurs climatiques tels que des vents forts, une humidité relative faible, la radiation solaire ou un sur chauffage d'abri provoquent également des effets similaires.

Il en survient des fissurations et une baisse de la résistance à la compression. La norme CSA-A23.1 spécifie que lorsque la température ambiante dépasse 27°C (à l'ombre) ou que des prévisions météorologiques affichent que cette température sera dépassée, des précautions supplémentaires doivent être prises lors de la mise en place du béton. [39]

2.Le bétonnage par temps chaud:

Les conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons sont néfastes.

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 14). [38]

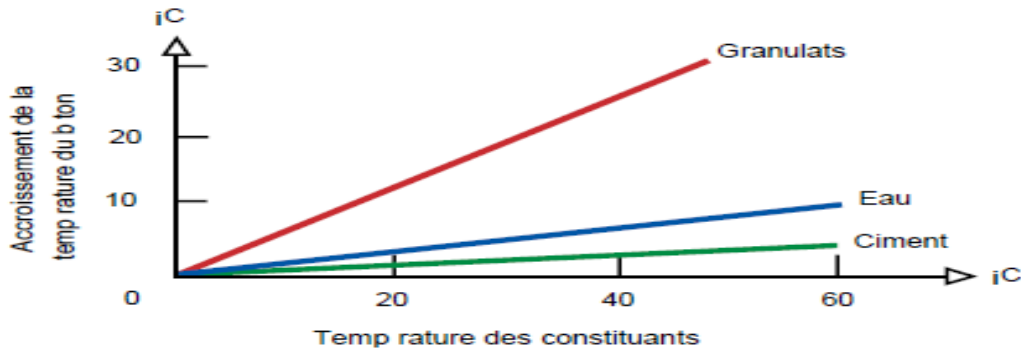


Figure 14: accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants. [38]

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées. [38]

2.1.Évolution de la porosité avec la température :

Le béton est un matériau hétérogène qui contient inévitablement de l'air. Il apparaît lors du malaxage (air entraîné) mais aussi une fois qu'une partie de l'eau libre s'est évaporée ou qu'elle ait été consommée par l'hydratation une fois le squelette solide forme. [70]

Cet air a des conséquences plutôt néfastes sur les caractéristiques mécaniques du béton, en diminuant principalement la résistance à la compression. Ainsi la formule de Féret tient compte de cet air pour l'estimation de la résistance en compression du béton [36].

En revanche, s'il est bien maîtrisé, il peut être bénéfique vis-à-vis de la résistance au gel/dégel. [70]

Pour le maîtriser, on utilise un entraîneur d'air qui permet la création de bulles d'air d'une taille de quelques dizaines de μm [25]. Afin de contrôler si le réseau de pores créé est satisfaisant, il existe un paramètre, le facteur d'espacement, mesure suivant diverses normes américaine [76] ou française [26], [27]. Ce facteur permet de

valider si le béton est résistant au gel interne. Sur ce sujet, la thèse de Fabbri [59] permet d'approfondir les mécanismes en jeu. [70]

La question que l'on peut se poser pour la problématique de résistance au feu pourrait être : est-il possible de mesurer également un facteur d'espacement adapté pour les sollicitations thermiques ?

Afin de mesurer la porosité du béton, il existe essentiellement deux méthodes :

– la porosité totale à l'eau : il s'agit de saturer un échantillon en eau puis de le sécher à 105°C, jusqu'à ce que la masse se stabilise. On obtient alors une valeur de porosité totale, mais pas de répartition porale. L'ordre de grandeur de la porosité rencontrée pour les bétons ordinaires varie de 14 à 20 % et pour les bétons hautes performances de 10 à 13 % d'après Carcasses [7]. Cette méthode permet d'atteindre les pores de la porosité capillaire du matériau (comprise entre quelques nanomètres et un micromètre).

– la porosité par intrusion de mercure : il s'agit d'injecter du mercure sous pression. Cette méthode permet de donner une information sur la porosité du matériau d'un point de vue de la répartition des pores. Concernant les tailles de pores, il existe des modèles qui permettent de les évaluer. L'échelle des pores accessibles est plutôt large (de quelques nanomètres aux dizaines de micromètres) ce qui en fait une méthode d'investigation appréciée.

Lors d'une élévation de température, l'évolution de la porosité est principalement liée à la pate de ciment mais aussi à l'interface granulats/pate. La figure 14 montre l'évolution de la porosité d'une pate de ciment. On observe clairement le passage d'une répartition centrée autour de 0.05 μm à température ambiante à une répartition centrée aux environs de 0.1 μm pour les températures jusqu'à 400°C. Puis une nouvelle classe de pores apparait, centrée autour de 0.5 μm . Cette classe serait due à la déshydratation de la Portlandien qui se produit entre 450°C et 550°C, d'après Alarcon [16].

La (figures 16 issue d'essais au prosimètre à mercure, montre l'évolution de la répartition porale de différents bétons. La proportion de plus en plus importante de pores de plus gros diamètres pourrait être expliquée par la détérioration et la fusion des petits pores qui créent alors des pores plus gros.

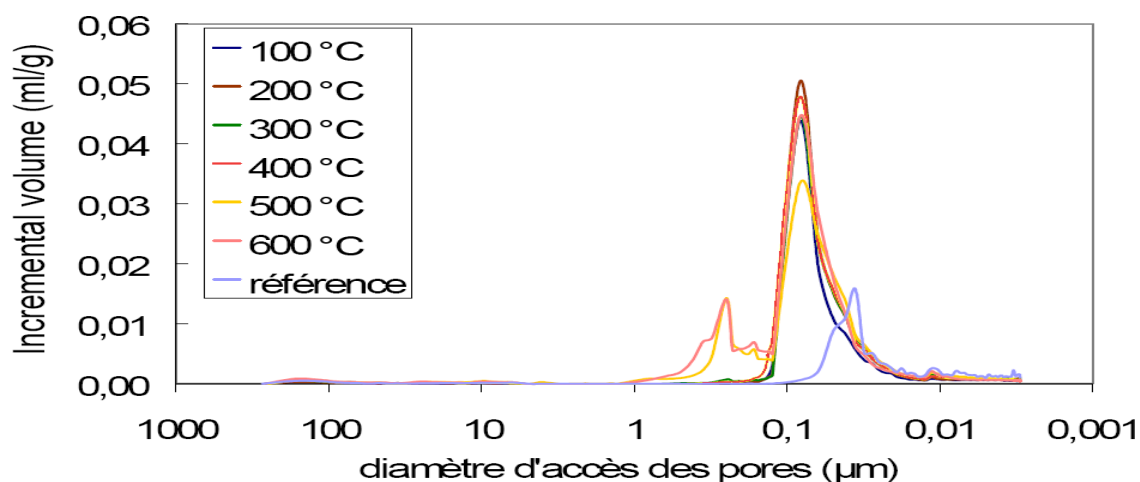


Figure15: Evolution de la porosité d'une pate de ciment CEM/A (CPJ) 32.5 d'un âge compris entre 40 et 60 jours, d'après Alarcon [16].

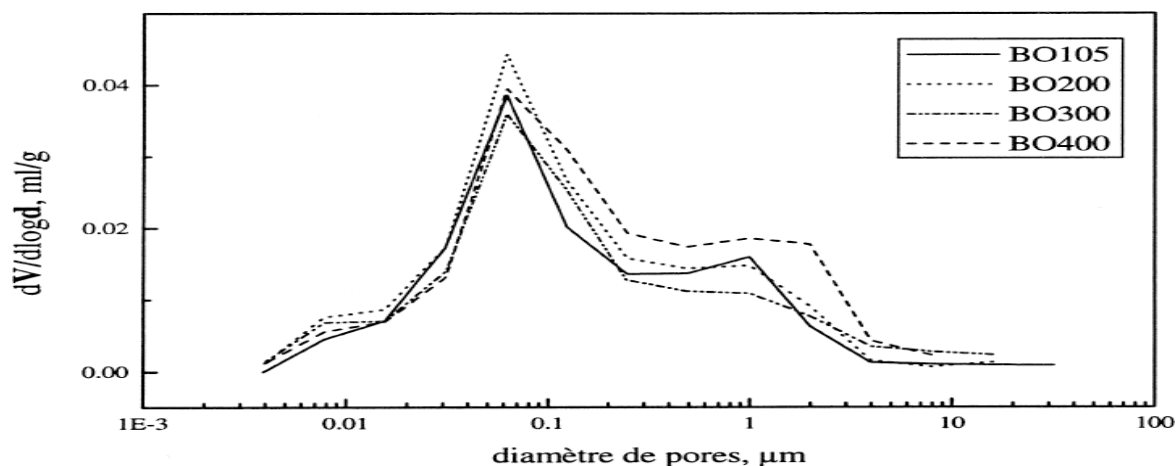


Figure16: Evolution de la distribution des pores pour un béton ordinaire (Rc=36 MPa), d'après Tsymbrovska [1].

Ces changements de distribution porale ont une influence sur les propriétés mécaniques. La relation entre la porosité et la résistance en compression simple est présentée par de Larrard [70] et a été modélisée par exemple par Matusinovic [29] ou bien mesurée par Vodak [28].

Dans les deux cas, les auteurs montrent bien que la compression simple diminue lorsque la porosité augmente, et pour Matusinovic, cela se fait de façon quadratique.

2.2.La rhéologie :

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams évolue en fonction de plusieurs paramètres (figure 17). [38]

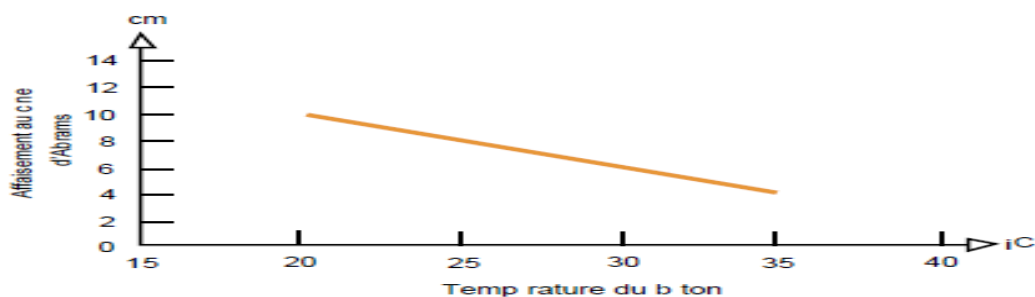


Figure 17: Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température. [38]

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 palier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances (figure 18). [38]

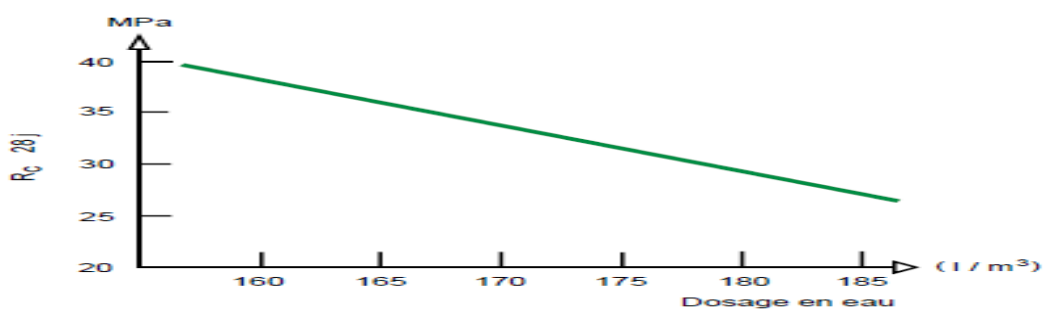


Figure 18: évolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau. [38]

2.3.Évolution des propriétés thermiques avec la température :

Dans un contexte de haute température, tous les modes d'échange de chaleur, à savoir rayonnement, convection et conduction sont sollicités. En ce qui concerne le

matériau lui-même, le mode de transfert par conduction régi par la loi de Fourier est prépondérant. Les paramètres essentiels sont :

- La chaleur spécifique ou capacité calorifique (C en $J / (kg.K)$) qui est l'énergie nécessaire à fournir pour élever d'un degré un kg de béton.
- La conductivité thermique (λ en $W / (m.K)$) qui représente la capacité du matériau à conduire la chaleur. Plus elle est élevée, plus la température sera homogène au sein du matériau.

Comme il a été dit précédemment, ces paramètres de conduction sont liés entre eux par l'équation de la chaleur de Fourier [25] :

$$(\rho.c) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{ grad}(T)) + P \dots \text{(A.3)}$$

Où P (en $W.m^3$) est un terme de production d'énergie volumique.

L'équation(A.3) peut se simplifier sous les hypothèses :

- Absence de production de source interne émettant une énergie volumique P ,
- λ est considérée comme constante dans tout le matériau en première approximation.

Elle devient alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \Delta T$$

Avec $\alpha = \frac{\lambda}{\rho.c}$

La diffusivité thermique du béton est exprimée en ($m^2.S^{-1}$). Cette diffusivité représente la vitesse à laquelle se propage la chaleur dans le matériau.

Les valeurs à température ambiante couramment rencontrées pour les bétons ordinaires sont

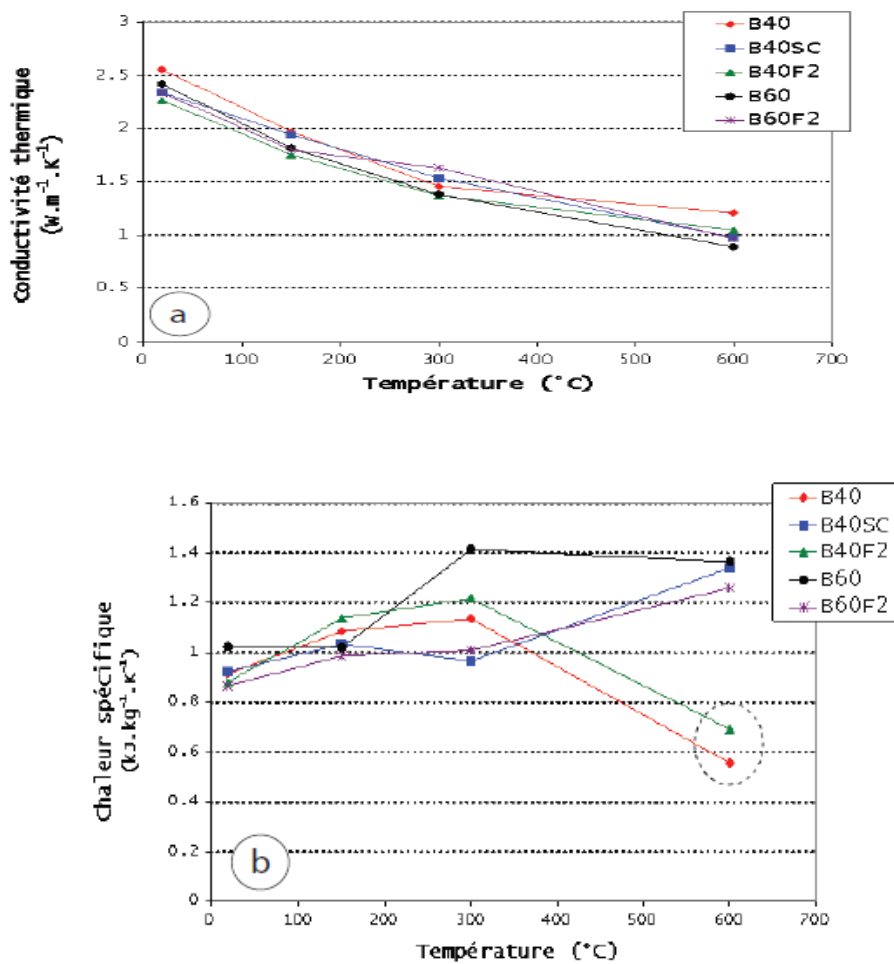
(D'après l'Eurocode 2 [26], et Bažant [31]) :

- $\lambda = 1.4 - 2 \text{ W} / (m.K)$
- $C = 900 \text{ J} / (kg.K)$
- $\alpha = 1 \text{ mm}^2/s$

L'application de la température va entraîner une modification des composants du béton ainsi que de sa structure. D'un point de vue macroscopique, il en résulte une modification des propriétés thermiques.

La figure 18 montre l'évolution avec la température des paramètres présents précédemment.

On peut noter que la tendance concernant la conductivité thermique est identique quel que soit le béton. Cette baisse quasi linéaire est expliquée par Mindeguia par la création de vides par le séchage du béton ou de fissures par le chauffage. [70].



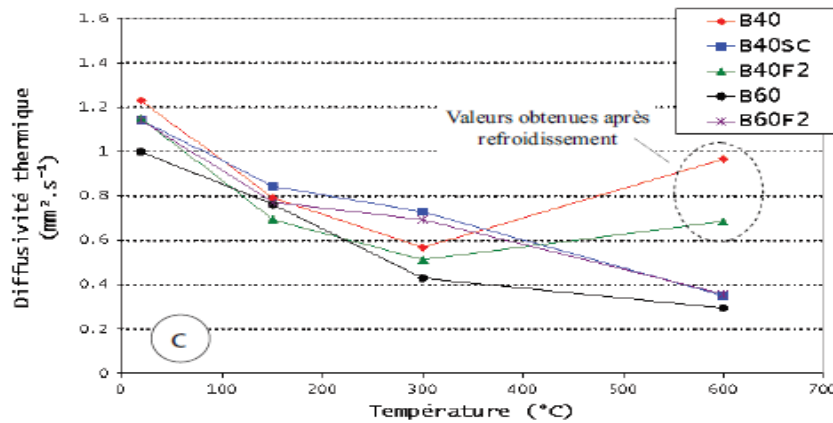


Figure 19: Evolution des propriétés thermiques obtenues sur des bétons ordinaires, avec et sans fibres, par Mindeguia : (a) conductivité thermique, (b) chaleur spécifique, et (c) diffusivité thermique [66].

2.4. Les temps de prise :

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques : la prise du béton est plus rapide (figure 20). [38]

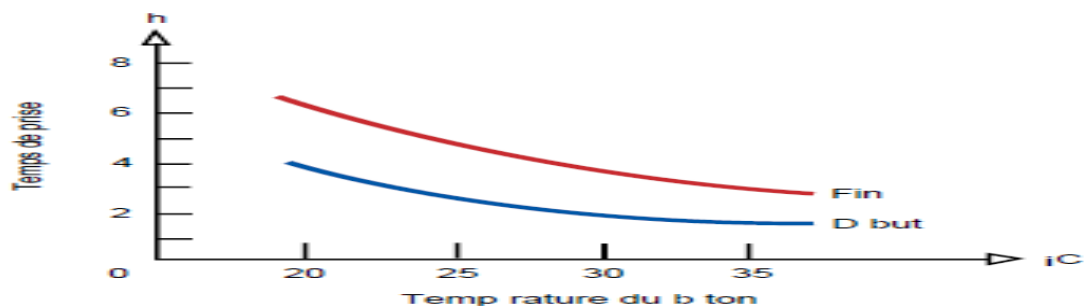


Figure 20: Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température. [38]

2.5. Les résistances mécaniques :

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 (figure 21) 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. [38]

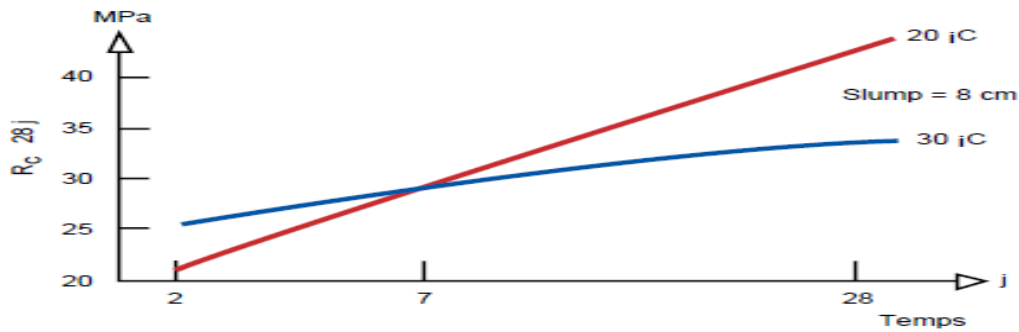


Figure 21: évolution des résistances en compression en fonction de la température.

[38]

2.6. La 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 $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$. Elle est d'autant plus importante que :

- la température ambiante est élevée,
- la température du béton augmente,
- l'air est sec. [38]

2.7.Éclatement des bétons sous sollicitations thermiques

2.7.1 Les différents types d'instabilités thermiques :

La notion d'instabilité thermique est reprise de la thèse de Mindeguia [66]. Ce terme semble adapté pour décrire le phénomène rencontré lorsqu'on chauffe certains bétons. On peut définir plusieurs instabilités thermiques d'après l'étude d'Arup [62]. Les plus courantes et celles qui nous intéressent le plus sont :

- l'écaillage (surface spalling en anglais) correspondant à un détachement local, plus ou moins rapide, de la surface du matériau. Ce phénomène se produit généralement dans la première phase de l'élévation de température. Ceci peut amener les armatures être nu et donc compromettre fortement la stabilité de la structure, d'après Khoury [32].

– l'éclatement (explosive spalling en anglais) correspondant à un détachement violent de parties en général plus grosses que lors de l'écaillage. La caractérisation principale est l'énergie importante dégagée lorsque l'éclatement a lieu. [70]

On rencontre plus souvent le phénomène d'éclatement dans les bétons à hautes performances que pour les bétons ordinaires, pour Phan [67]. Les raisons qui expliquent cela sont abordées dans les parties suivantes. [70]

2.7.2 Les hypothèses d'instabilités thermiques :

Les instabilités thermiques présentées précédemment reposent sur différentes hypothèses, qui sont défendues par plusieurs auteurs. Ces hypothèses sont elles-mêmes basées sur l'influence observée qu'ont les paramètres suivants : la teneur en eau et la compacité du béton, le type de sollicitation thermique. [70]

2.7.2.1 L'aspect thermo-hydrique :

L'hypothèse considérant la pression interne élevée proche de la surface comme responsable de l'instabilité thermique est expliquée par Anderberg [47]. Ainsi la pression interne augmente jusqu'à créer un état de contrainte dépassant la limite en traction du béton et serait responsable de l'instabilité thermique. Cette hypothèse est soutenue par Harmathy [43], England [44], Kalifa et al [45], Yanko [68], Noguchi [46] et Dal Pont [33].

Le rôle des fibres synthétiques est l'efficacité supérieure des fibres de polypropylène vis-à-vis de l'instabilité thermique. En revanche nous pouvons déjà dire que cette hypothèse serait bien en accord avec la capacité des fibres synthétiques à fondre et donc à créer un volume améliorant la migration de la vapeur d'eau et permettant de diminuer la pression interne.

Le calcul de la contrainte directe présentée est basé sur un modèle sphérique de pore (voir figure 22, d'après Lottman) [69].

Une légère modification de l'hypothèse thermo-hydrique ci-dessus a été proposée par Jansson et Bostrom [71].

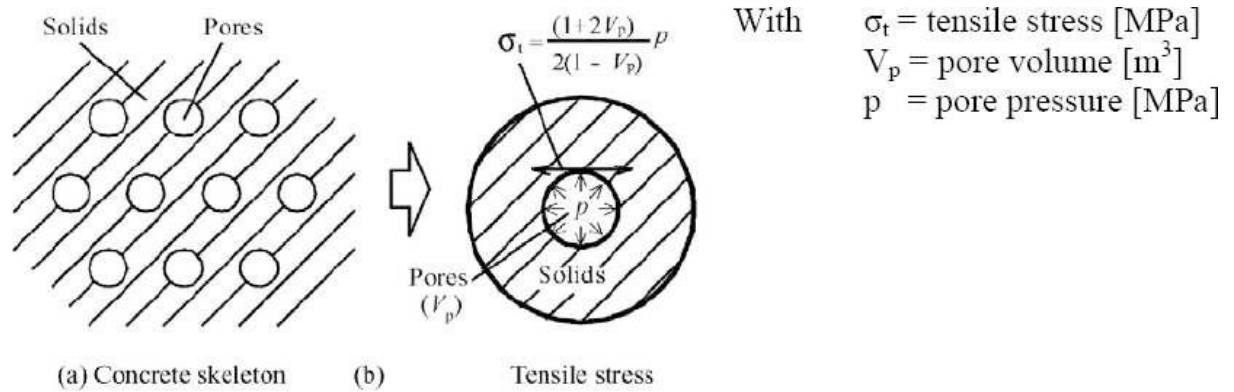


Figure 22: Modèle de pore sphérique utilisé par Lottman [69] pour le calcul des contraintes de traction.

2.7.2.2 L'aspect thermomécanique :

L'instabilité thermique provoquée par des contraintes mécaniques engendrées par la dilatation thermique empêchée est soutenue par Bažant [31], Ulm [42] et Msaad [48]. Cette hypothèse défend l'idée que le gradient de température entraîne des dilatations empêchées des granulats et de la pâte. Celles-ci engendrent alors des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée, et par effet Poisson une déformation perpendiculaire à la surface chauffée, qui peut entraîner des contraintes de traction. De plus, le gradient thermique provoque des dilatations différentes entre pâte et granulats du fait de leurs caractéristiques thermiques. Cette incompatibilité de dilatation thermique entre granulats et pâte de ciment est intéressante, cependant, l'efficacité des fibres synthétiques dans la tenue au feu est difficilement explicable dans ce cas là. Il semble tout de même intuitif que cet aspect puisse entrer en jeu dans les instabilités. Si ce n'est pas le facteur principal, il peut être un élément déclencheur. [70]

2.7.2.3 Le couplage thermo-hydro-mécanique :

Chaque hypothèse précédemment évoquée, prise individuellement n'est pas totalement satisfaisante. L'idéal est de considérer les deux phénomènes en parallèle, l'effet de pression de vapeur et celui du gradient thermique. Ainsi certains modèles supposent un couplage thermo hydro- mécanique afin de prédire les instabilités thermiques, comme Ožbolt [3], Gawin [12] et Meftah [45]. Ces

modèles semblent représenter plutôt bien des expériences déjà réalisées mais le caractère prédictif du modèle reste encore à vérifier. [70]

2.8. 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.

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 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.

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 générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures. [38]

2.9. Conséquences des effets climatiques :

Il est important de tenir compte du temps chaud et des facteurs climatiques équivalents lors du bétonnage à cause de leur influence sur les propriétés plastiques du béton fraîchement mis en place. La température élevée provoque un accroissement de la demande en eau, ce qui se traduit par une augmentation du rapport eau/liant et une diminution de la résistance à la compression (figure 23). Les effets décrits ici-bas

peuvent se produire.

[22]

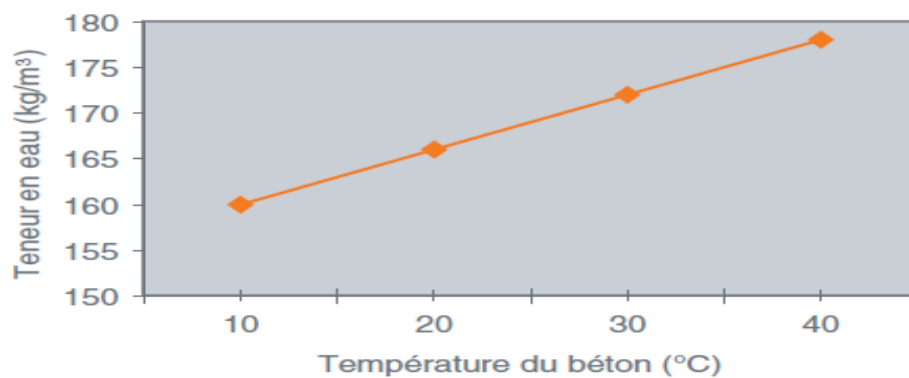


Figure 23 : Augmentation de la teneur en eau de gâchage avec l'augmentation de température. [22]

2.9.1. Fissuration plastique :

L'évaporation de l'eau de la surface du béton frais est en relation directe avec la température ambiante, la température du béton, la vitesse du vent et le faible taux d'humidité de l'air.

Lorsqu'elle se fait trop rapidement, cette évaporation provoque un retrait élevé entraînant l'apparition de fissurations plastiques de dalles de béton ou de tout autre élément soumis à ce phénomène. [22]

2.9.2. Fissuration thermique :

Des fissures d'origine thermique sont susceptibles d'apparaître lors de la mise en place d'un élément mince (dalle, mur), particulièrement lors de temps chaud suivi d'un refroidissement rapide (nuit fraîche).

Le potentiel de fissuration est accru dans les ouvrages de masse, conséquence de l'accélération du dégagement de la chaleur produite par l'hydratation du ciment.

Dans la majorité des cas, il suffit que le différentiel maximal de température entre la surface et le centre de l'élément de béton soit inférieur à 20°C pour contrer le phénomène. [39]

2.9.3. Problématiques liées aux variations de température

2.9.3.1. Le séchage des bétons à température ambiante :

Une structure en béton exposée à une humidité relative environnante inférieure à celle régnant au sein du matériau subit alors un déséquilibre hygrométrique (lors de la fin de cure des bétons lors de leur soumission à l'air ambiant). Ce déséquilibre se traduit alors par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur pour rétablir l'équilibre de milieu, conduisant au séchage de celui-ci. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est donc d'une grande importance, le séchage s'accompagnant généralement d'effets structuraux, du fait du gradient de déformations induit. De plus, l'humidité relative locale influence de façon très importante les propriétés de transfert comme la diffusivité et la perméabilité. [72]

Le séchage de la pâte de ciment durcie est complexe. Le mécanisme moteur du séchage est lié au gradient d'humidité relative induit au sein du matériau, en termes de répartition de l'eau à l'état vapeur au sein du matériau. L'équilibre thermodynamique entre les phases vapeur et liquide de l'eau présente dans le béton devant être maintenu, l'eau liquide va également être concernée par le séchage. Parmi les phénomènes qui peuvent intervenir lors du séchage on peut citer : le phénomène de

permutation, diffusion, adsorption-désorption, condensation-évaporation. Tous ces phénomènes sont en effet mis en jeu dans la pâte de ciment. [72]

2.9.3.2. Mouvements hydriques dus à la variation de température :

La variation de la température dans les bétons peut engendrer des gradients de température au sein du matériau qui vont provoquer des déséquilibres hydriques, causés par le séchage et l'humidification, et des endommagements de la microstructure. [72]

L'élévation de température génère un gradient de température, une migration de l'eau et des variations locales d'humidité dans les éléments structuraux. Ce sont donc des phénomènes de déshydratation et de transformations cristallines qui induisent des modifications structurales et dimensionnelles du béton aux niveaux micro et macroscopique. Dès qu'un chauffage intervient à la surface d'un élément en béton, les différents mécanismes de transferts vont être plus ou moins accentués par l'existence de ces gradients entraînés par le changement de température. Ces gradients, principalement gouvernés par la conduction thermique (loi de Fourier) entraînent des gradients de pression de gaz (pression partielle de vapeur d'eau et/ou pression d'air sec); l'influence de ces gradients de pression sur le transfert de masse sera d'autant plus importante si la température est supérieure à 100°C. En effet, pour des températures inférieures, les phénomènes de diffusion restent prépondérants [LIE 95]. [72]

England et al 1997 [ENG 97] ont révélés que pour des températures élevées ($T > 105^{\circ}\text{C}$), la filtration est le phénomène de transport dominant : du fait que le chauffage entraîne une évaporation de l'eau et une pressurisation non négligeable de la vapeur et de l'air à l'intérieur des pores. Lorsqu'une surface d'un élément en béton est exposée à une augmentation de température, les phénomènes précédents entraînent d'une part, une migration et un largage de vapeur aux limites de la structure et une migration de l'eau liquide depuis les zones les plus chaudes vers les zones les plus froides du béton d'autre part. [72]

La migration de la vapeur d'eau saturée et de l'eau liquide à l'intérieur du béton va augmenter le taux de saturation dans cette zone, donc c'est à cet endroit où la pression sera maximale. Le mouvement de la vapeur d'eau au sein du béton entraîne

sa condensation lorsqu'elle traverse les couches froides. La vapeur condensée va augmenter le degré de saturation de ces couches et former un front de saturation, selon Consolazio et al 1997 [CON 97]. L'accumulation de la vapeur d'eau condensée et de l'eau liquide dans cette zone va créer ce que l'on nomme communément un « Bouchon d'humidité » (ou « Moisture clog » en anglais). Ce dernier va migrer vers les zones froides sous l'effet du gradient de pression. Le milieu saturé du « bouchon » est donc imperméable au gaz. [72]

2.9.3.3. Modifications physiques et chimiques du béton sous hautes températures :

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques et physiques se produisent. Ces phénomènes peuvent concerner la pâte de ciment durci, les granulats ainsi que la zone interfaciale pâte-granulats. Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes (libres, liée, adsorbée). Les premiers phénomènes concernent l'évaporation de l'eau libre et adsorbées à des températures jusqu'à 120°C [BAZ 96] [NOU 95]. L'augmentation de la température, entre 130°C et 550°C, provoque dans un premier temps, la décomposition du gypse et le début de processus de déshydratation de la pâte de ciment durci qui entraîne la rupture interne de la structure du gel de CSH et la libération de l'eau chimiquement liée [BAZ 96]. Ensuite la décomposition de la portlandite en chaux libre peut avoir lieu à partir de 450°C. Au-delà de 600°C, d'autres phénomènes se produisent : la seconde étape de déshydratation (autour de 700°C) et la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3), autour de 800°C, pour former de la chaux libre (CaO). [72]

A hautes températures, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurelles du matériau. En effet, selon Harada et al, 1973 [HAR 73] et Schneider, 1976 [SCH 76] à l'aide d'une analyse thermique différentielle, il est montré que la majorité des granulats sont généralement stable jusqu'à 500°C. Dans le cas des granulats siliceux, une transformation du quartz se produit à partir de 570°C accompagnée d'une dilatation significative (entre 1 et

5,7%). En revanche dans le cas des granulats calcaires, la décarbonatation de CaCO_3 se produit au-delà de 600°C . Ceci indique que les granulats calcaires peuvent présenter des faiblesses avant la phase de décarbonatation. Les phénomènes entraînés par la variation de température ont souvent des effets sur les propriétés de transfert du béton. La porosité et la perméabilité sont les premières propriétés influencées par le chauffage, il est montré que la porosité et la perméabilité du béton augmentent à chaque fois qu'il est exposé à hautes températures. Cette augmentation de la porosité induit dans la majorité des cas une diminution de résistance mécanique du matériau ce qui rend la structure en béton de plus en plus fragile d'une part. Mais d'autre part, l'augmentation de la porosité ou de la perméabilité, durant le chauffage, a un effet bénéfique dans la diminution du risque d'instabilité thermique (Eclatement, Spalling en anglais) des bétons à hautes performances, comme dans les tunnels en situation d'incendie où le phénomène d'éclatement est souvent rencontré, vu les niveaux de température atteints. [72]

2.9.3.4. Variations dimensionnelles due au chauffage :

En plus des mouvements hydriques et les modifications chimiques, l'augmentation de la température entraîne des déformations thermiques dans le béton [HEI 98] [HAG 04]. Cette déformation est conditionnée par la dilatation thermique de la pâte de ciment et des granulats. En raison des gradients thermiques se développant durant les phases transitoires de propagation de la chaleur, vu que la pâte de ciment durci et les granulats ont deux comportements thermiques très différents, cela entraîne des déformations thermiques non uniformes au sein des structures en béton armé soumises à des sollicitations de ce type. Cette non-uniformité engendre des contraintes internes qui peuvent elles-mêmes occasionner la fissuration du matériau. Sous l'effet de la température, la pâte de ciment subit dans un premier temps une dilatation jusqu'à 150°C puis une contraction, déformations de retrait irréversible, importante jusqu'au-delà de 800°C due essentiellement au départ de l'eau libre puis de l'eau liée chimiquement [HAR 72] [JUM 86] [KHO 95]. [72]

En effet, les granulats occupent environ 70% du volume du béton. La dilatation thermique des bétons est, principalement liée à leur dilatation. Les

granulats subissent durant le chauffage une importante expansion volumique non proportionnelle à la température et fortement influencée par leur nature chimique. Une augmentation significative de l'expansion de la plupart des granulats est observée au-delà de 550°C qui s'explique par les modifications chimiques et cristallines qu'ils subissent. [72]

La combinaison des deux déformations durant le chauffage, le retrait de la pâte de ciment et l'expansion des granulats, engendrent des microfissurations et des contraintes au sein du béton. Les transformations et les décompositions chimiques des différents constituants du béton s'accompagnent par contre de variations dimensionnelles. [72]

2.10. Mesures préventives :

2.10.1. Respecter la température maximale du béton :

Le tableau 17 : Mentionne les valeurs maximales de température du béton frais selon l'épaisseur de l'ouvrage à réaliser. [67]

Épaisseur de l'ouvrage(m)	Température maximale(°C)
Moins de 0,3	35
De 0,3 à 1	30
De 1 à 2	25
Plus de 2	20

2.10.2. Résistance à la compression insuffisante :

Le béton mis en place et mûri dans des conditions de températures élevées développe, à court terme, une forte résistance mécanique. Par contre, le gain de résistance entre le 7^e et le 28^e jour s'avère plus faible que celui d'un même béton conservé à de basses températures. Les essais réalisés (figure 24) démontrent ces écarts de résistance. D'autres conséquences s'ensuivent du bétonnage par temps chaud, parmi lesquelles :

- la perte d'affaissement et la diminution de la teneur en air entraîné.

- l'accélération du temps de prise et du temps de finition. [39]

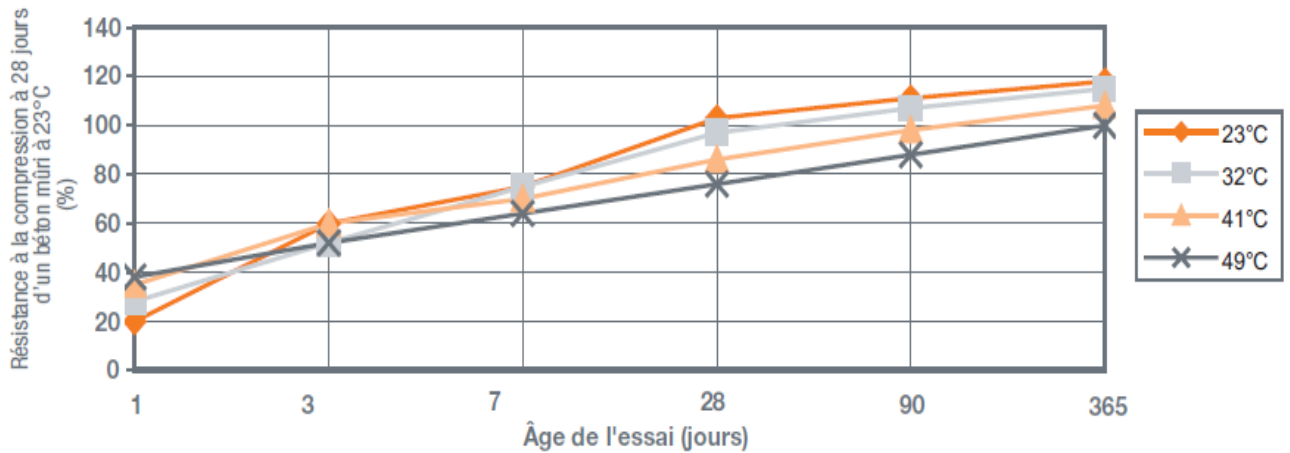


Figure 24 : Effet des températures élevées sur la résistance à la compression du béton à différents âges [23].

2.11.Principe de l'écrasement :

Les conditions climatiques ont une grande influence sur la résistance de béton. Pour cela on a mesuré la température intérieur (laboratoire) et extérieur avant de faire l'écrasement. [73].



Figure25: Mesure la température à l'extérieur et mesure la température à l'intérieur [73]

- **Composition 1 :** 100% SD + ciment EL MATINE+ 3/8 gravier+8/15 gravier+15/25 gravier + Adjuvant

Tableau 18: Résultats de la résistance mécanique (CEMII/B 42.5N +100% SD (C1)). [73]

Age		Poids (kg)	Contrainte (MPa)	Moyenne (MPa)	Températures °C		Af (cm)
					1	2	
7jours	Int	12,945	32,42	30,87	30	29	21
		12,970	30,17				
		12,993	30,02				
	Ext	12,915	25,19	25,51	35	34	
		13,015	25,44				
		12,790	25,92				
14jours	Int	12,345	29,58	31,40	32	27,8	20
		12,670	29,51				
		12,655	35,12				
	Ext	11,904	25,95	25,78	33	30	
		11,875	25,34				
		11,935	26,06				
28jours	Int	13,145	32,68	33,27	29	27,5	20.5
		12,975	32,03				
		12,339	32,12				
	Ext	12,995	30,22	30,16	30	29	
		12,985	30,56				
		12,980	29,70				

45jours	Int	13,185	33,63	33,71	32	25,2	20
		13,265		33,26			
		13.120	34,25				
	Ext	12,955	30,05	30,47	38	32	
		13,220		28,93			
		13,030	32,43				

2.11.1.La résistance mécanique en fonction d'âge dans les deux modes (int, ext (C1)) :

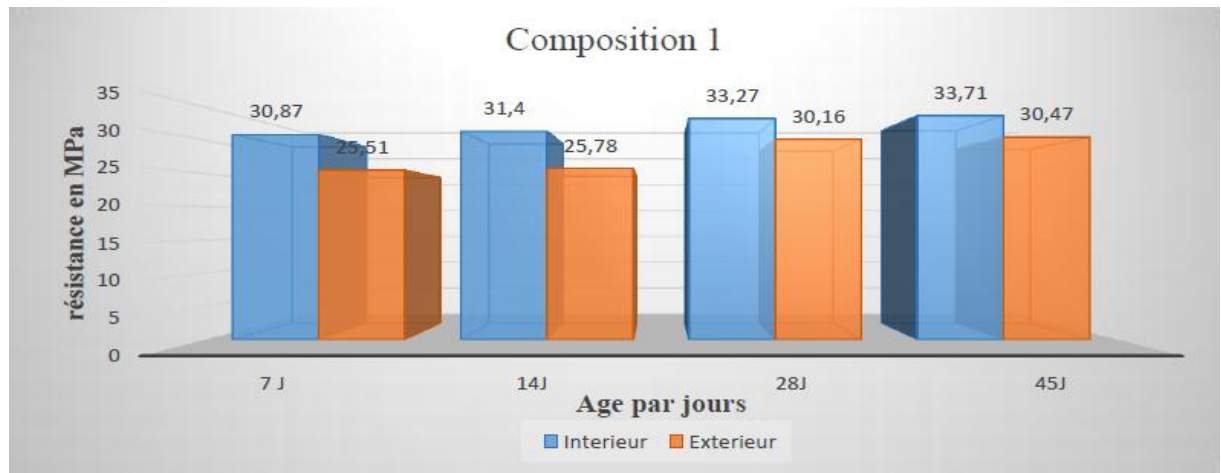


Figure 25: Variation de la résistance en fonction d'âge(C1). [73]

- **Composition 2 :** 100% SD+ ciment STG+3/8+gravier+8/15 gravier+15/25 gravier + Adjuvant.

Tableau 19: Résultats de la résistance mécanique (100%SD+CEMII/B STG). [73]

Age Poids (kg) Contrainte Moyenne Températures Af (cm)

		(MPa)		(MPa)	°C		
					1	2	
7jours	Int	12,670	28,73	29,69	30	27,5	20,6
		13,105	31,07				
		12,970	29,26				
	Ext	13,020	25,37	27,32		32	
		12,930	27,42		35		
		13,020	29,16				
14jours	Int	12,585	40,32	37,47		28	20,7
		12,590	34,16		30		
		12,510	37,94				
	Ext	13,015	32,63	33,45			
		13,330	29,56		33	32	
		12,900	38,16				
28jours	Int	13,00	38,71	38,38		27,3	20
		13,400	30,60		30		
		13,190	45,82				
	Ext	12,490	30,06	33,91		30	
		12,550	36,09		32		
		12,630	35,59				
45jours	Int	13,350	40,90	39,7	35		

CHAPITRE III: Influence des effets climatiques sur les propriétés

	13,290	39,70		28,2	20,5
	12,720	38,50			
Ext	13,030	32,56	34,47		39
	13,090	34,90		40	
	13,150	35,95			

La résistance mécanique en fonction d'âge dans les deux modes (int, ext (C2))

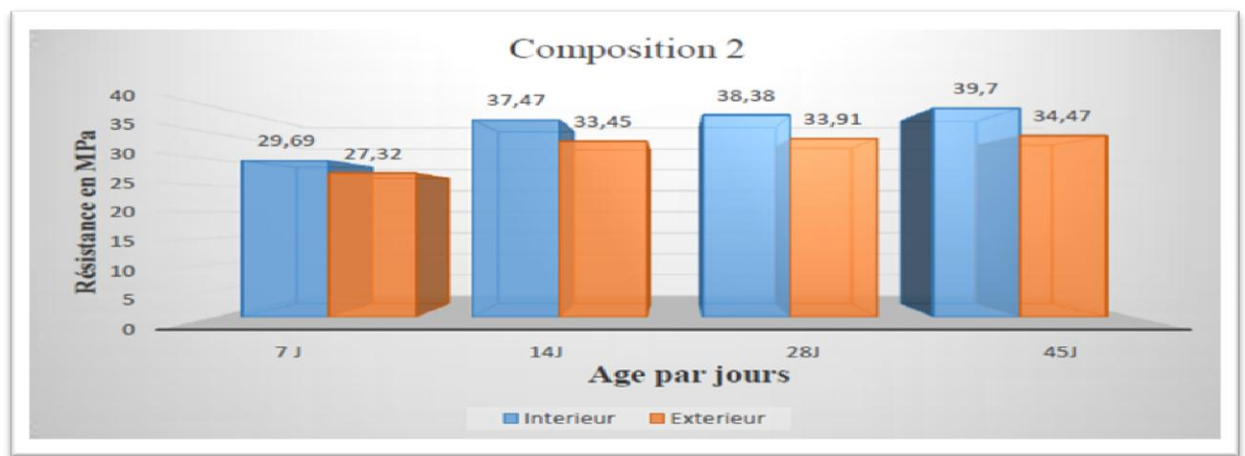


Figure 26: Variation de la résistance en fonction d'âge(C2). [73]

2.11.2. La résistance mécanique en fonction de température :

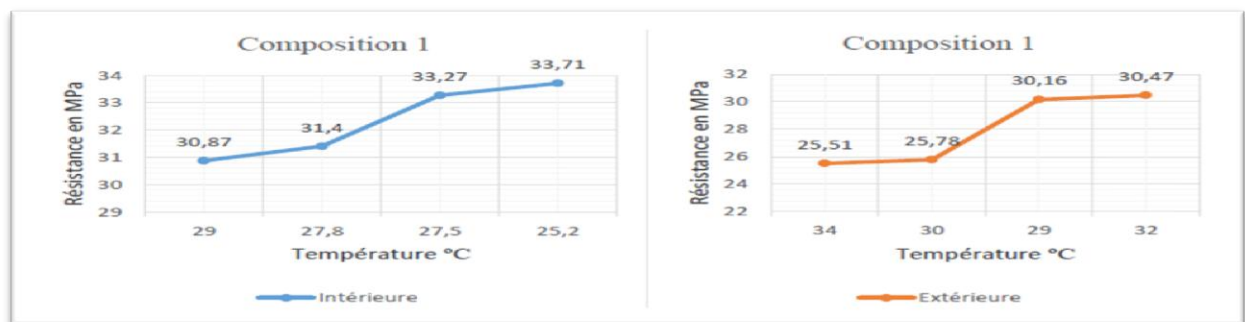


Figure 27: Résistance à la compression en fonction de la température (C1). [73]

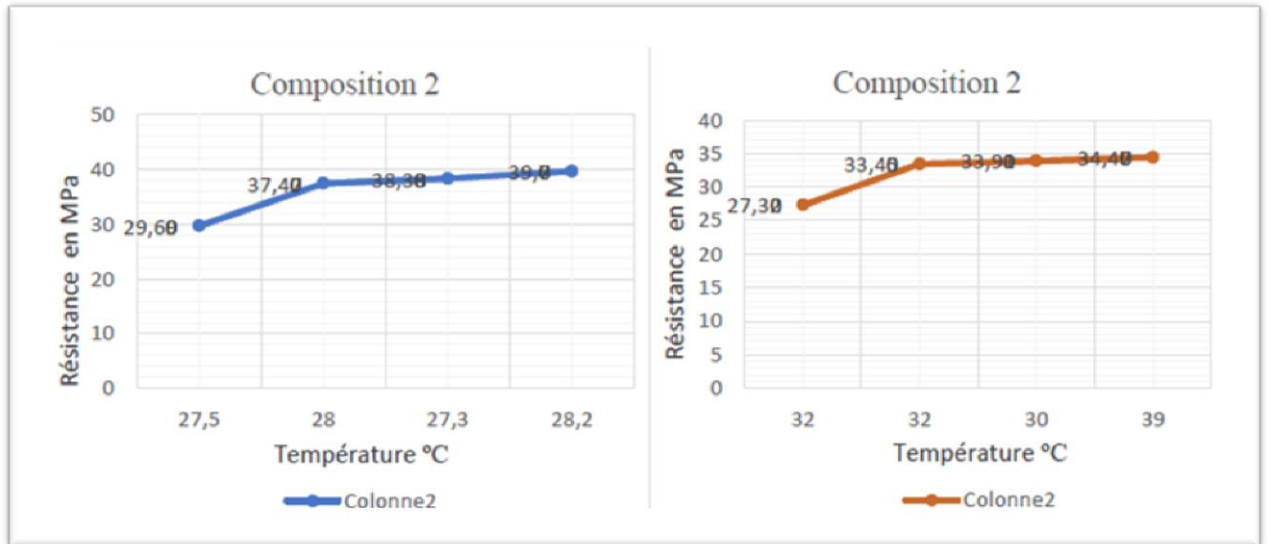


Figure 28: Résistance à la compression en fonction de température (C2). [73]

3. Le 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 °C , la mise en place du béton est déconseillée. Entre -5 °C et $+5\text{ °C}$, 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. [38]

3.1 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 (figure 29) ;
- un allongement du temps de durcissement (figure 30).

On observe aussi une augmentation du ressuage.

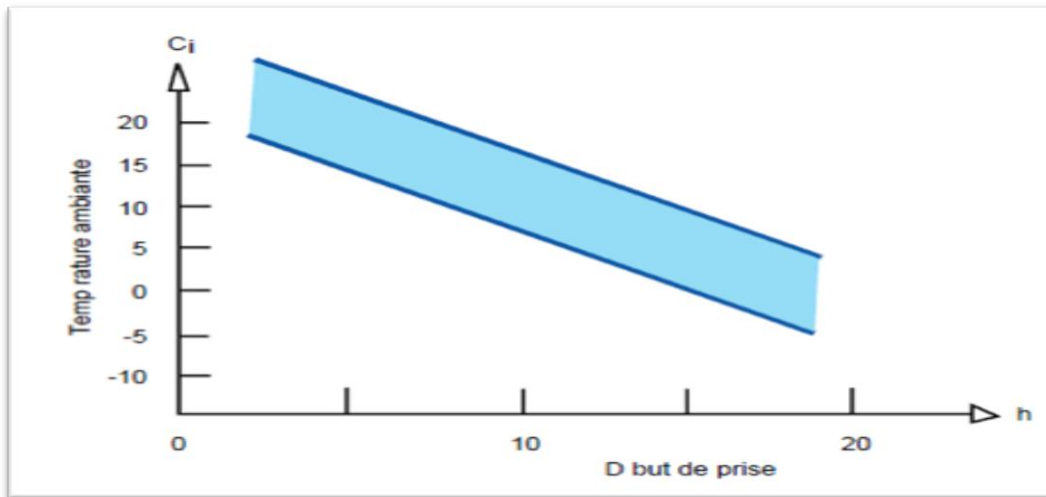


Figure 29: Début de prise du béton en fonction de la température. [38]

3.2 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-granulat 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. [38]

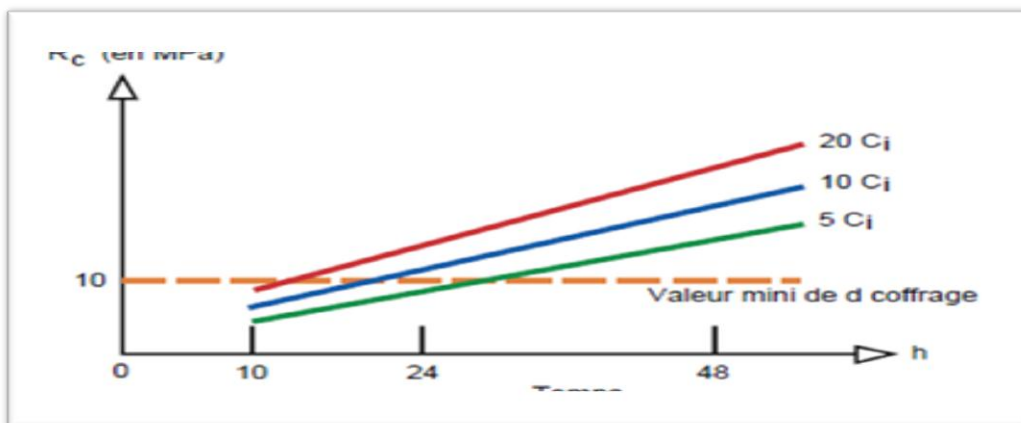


Figure 30 : Délai de décoffrage en fonction de la température. [38]

3.3 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 ;
- de maintenir ces dispositions de protection en place au-delà des délais habituels.

3.4 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/m^3 ,
- 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. [38]

3.5 Apport et maintien de chaleur

5.1. Calorifugeage : les coffrages pourront comporter une isolation qui limitera les échanges thermiques avec l'extérieur. [38]

5.2. Transport : le transport du béton frais ainsi que l'attente des toupies seront le plus court possible. [38]

5.3. Étuvage : l'étuvage du béton au cours de son durcissement accélérera l'hydratation du ciment. [38]

5.4. Protection de surface : la surface du béton en contact avec l'air devra être protégée du froid, par exemple avec une bâche isolante. [38]

5.6. 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. [38]

3.6. 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. [38]

Conclusion :

Sur la base d'études précédentes, nous notons que la résistance a diminué à cause de l'évaporation d'eau rapide dans le béton, alors les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. On sait que le béton est sensible aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent...etc. 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.

Cette partie a fait le lien entre le béton comme matériau poreux et les problématiques qui lui sont associées lorsqu'il est exposé à une variation de température. Elle précise que le cadre de notre travail concerne l'étude du comportement des bétons exposés à hautes températures.

Nous remarquons aussi que la température affecte négativement la résistance à la compression du béton. On sait qu'il y a toujours un risque de fissuration dus à l'évaporation trop rapide de l'eau contenue dans le béton. [73]

La température a affecté négativement :

- Résistance du béton
- Fissuration plastique
- Fissuration thermique
- La rhéologie
- L'instabilité thermique
- La fissuration
- L'évolution du temps de prise du béton
- L'évolution de la porosité
- L'évolution des propriétés thermiques des bétons
- Délai de décoffrage



CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Durant l'élaboration de ce travail et à partir des résultats et analyses, des conclusions et des recommandations peuvent être soulignées dans ce mémoire.

Cette étude entre dans le cadre de connaître l'influence de la température des différents constituants sur les comportements mécaniques du béton.

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'identifier les mécanismes élémentaires conduisant à la dégradation des bétons sous l'effet de la température.

Les principaux points que nous pouvons retenir comme conclusion sont :

- La résistance mécanique des éprouvettes préparées avec des constituants à une température élevée est inférieure à celles des constituants à une basse température.

Les conséquences de la température des constituants élevée sont :

- Evaporation rapide de l'eau de gâchage au premier contact avec les constituants (prés-moulage).
- Accélération des temps de prise dans la présence de ciment.
- Diminution de la consistance ;
- Fissuration de retrait thermique.

Recommandations

- Le constituant quel que soit (ciment, sable et gravier) doit être conservé dans un endroit protégé contre les rayons solaires.
- Éviter le bétonnage durant la période la plus chaude.
- Utilisation des adjuvants refroidissant le béton pour diminuer la température élevée des constituants au moment de malaxage.

A decorative scroll graphic with a light gray background and a black outline. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling inward. The text is centered on the unrolled portion.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

S

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les livres

- [1] F. de Larrard. Structures granulaires et formulation des bétons. OA34, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées édition, 2000
- [2] J. Fourier. Théorie analytique de la chaleur. Firmin didot, père et fils édition, 1822.
- [3] J. Ožbolt, G. Periškić, M. Jelčić, and H.W. Reinhardt. Modelling of concrete exposed to high temperature. In 1st International Workshop on concrete spalling due to Fire Exposure, pages 461–469, Leipzig, 2009.
- [4] Holcim, Guide pratique du béton: Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, Edition Suisse, 2015.
- [5] Aamr- Daya E, Langlet T, Benazzouk A, Quéneudec M. Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles, physico-mechanical properties. Cement and Concrete Composites, 30 (10):2008.
- [6]. AFPC-AFREM, LMDC, Projet National BHP 2000, ANDRA, Ecole Française du Béton, Recommended methods for measuring of durability parameters, Proceedings of the technical AFPC/AFREM days on concrete durability, Toulouse, 11 and 12 December 1997.
- [7] M. Carcasses. La durabilité des BFUP / recommandations AFGC. In Caractériser et dimensionner les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performance BFUP, 2011
- [8] J. M. Sganzin, Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions: avec des applications tirées spécialement de l'art de l'Ingénieur des ponts et chaussées.
- [9] R. Vittone, Bâtir : manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [10] o. d. bibliothèque, pratiques actuelles pour la formulation des bétons (5/191), F.S.I.
- [11] Cours de MDS .Les granulats .Setif : université Farhate Abes. p.1.
- [12] D. Gawin, F. Pesavento, and B.A. Schrefler. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model for concrete. Computer Methods in

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- applied Mechanics and Engineering, 195 :5707–5729, 2006.
- [13] Jean-Luc, Akouet. Les matériaux de voirie : Les granulats, novembre 2016.
- [14] Cimbéton « Les constituants des bétons et des mortiers»3
- [15] Dreux.G et Festa.J : Nouveaux guide du béton et ces constituants, Ed. Eyrolles 1998
- [16] L. Alarcon-Ruiz, C. Galle, and E.Massieu. Analyse de l'évolution de la porosité des pates de ciment à haute température. Premier congrès interdisciplinaire sur les matériaux en France, 2002. 17, 18, 193
- [17]Neville.A.M : propriété des bétons traduit par le CRIB, Ed. Eyrolles, 1998
- [18] Holcim, Suisse « Guide pratique du béton », édition Suisse, 2015
- [19] solutions béton Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2014 P.16.
- [20] R. Dupain, J.-C. Saint-Arroman« Granulats, sols, ciments et Béton», édition CASTEILLA, France, 2009
- [21] construction "le ciment" skia France
- [22]ACC. Dosage et contrôle des mélanges de béton, Association Canadienne du Ciment, Canada, 2004. p. 227 et 231 EB101-07T.
- [23]BNQ. Bétons de masse volumique normale et constituants. Québec. Bureau de normalisation du Québec, novembre 2002, 37 p. (NQ 2621-900)
- [24]Naser-Edine Kedjour « laboratoire du béton », édition office des publications universitaires imprimé en Constantine Algérie 2009
- [25] F. Buyle-Bodin. Projet national calibre/fabrication. Méthode ava, 2000.
- [26]AFNOR, Commission de normalisation. NF P18-424. Bétons - essai de gel sur béton durci - gel dans l'eau - dégel dans l'eau, 2008.
- [27] AFNOR, Commission de normalisation. NF P18-425. Bétons - essai de gel sur béton durci - gel dans l'air - dégel dans l'eau, 2008.
- [28] F. Vodak, K. Trtik, O. Kapičková, S. Hořková, and P. Demo. The effect of temperature on strength / porosity relationship for concrete. Construction and building materials, 18:529–534, 2004.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[29] T. Matusinovic, J. Sipusic, and N. Vrbos. Porosity-strength relation in calcium aluminate cement pastes. *Cement and concrete research*, 33: 1801–1806, 2003.

[30] AFNOR, Commission de normalisation. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.

Partie 1-2 : Règles générales/Calcul du comportement au feu. Afnor édition, 2005. 9, 10, 27, 193

[31] Z.P. Bažant and M.F. Kaplan. *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*. Longman, @ Longman group limited édition, 1996. 14, 15, 27, 32

[32] G.A. Khoury. *Spalling. Course on effect of heat on concrete*, 2003.

[33] S. Dal Pont, H. Colina, and A. Ehrlacher. A relationship between liquid saturation and crack opening in concrete at high temperature. In *Consec'07*, pages 1581–1588, Tours, France, 2007. F. Toutlemonde and K. Sakai and O. E. Gjorv and N. Banthia.

[34] R. Jansson and L. Bostrom. The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete. In *Structure in Fire*, pages 418–429, Singapore, 2008.

[35] F. Meftah. A mesoscale thermo-hygro-mechanical analysis of microstructure effects on heated concrete. In *1st International Workshop on concrete spalling due to Fire*

Exposure, pages 436–445, Leipzig, 2009.

Fiches techniques

[36] Cimbeton. *Fiches techniques/Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*.

Collection technique Cimbeton, cimbeton/efb édition, 2006.

[37] Cimbéton « Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre »

[38] Cimbéton « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre »

[39] Techno-béton « Le bétonnage par temps chaud » 1998 et 2005

[40] LAFARGE, Documents de LAFARGE, France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[41] Baron J, Lesage R. Décembre 1976. La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier, Rapport de recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées 64.

[42] F.-J. Ulm, P. Acker, and M. Levy. The chunnel fire. ii : Analysis of concrete damage.

Journal of engineering mechanics, 125(3) :283–289, 1999.

[43] T.Z. Harmathy. Thermal properties of concrete at elevated temperatures. Journal of

Materials, 5 :47–74, 1970. 29, 30, 194

[44] N. Khoylou G.L. England. Pore pressure and moisture flow in concrete : steady and transient temperatures. In Proceedings of SMiRT 14, pages 491–501, Lyon (France),

[45] P. Kalifa, F.D. Menneteau, and D. Quenard. Spalling and pore pressure in hpc at high temperatures. Cement and Concrete Research, 30:1–13, 2000.

[46] T. Noguchi, M. Kanematsu, J. W. Ko, and D. W. Ryu. Heat and moisture movement and explosive spalling in concrete under fire environment. In Consec'10, pages 537–544,

Merida, Mexico, 2010. P. Castro-Borges and E.I. Moreno and K. Sakai and O.E. Gjorv and N. Banthia.

[47] Y. Anderberg. Spalling phenomena of hpc and oc. In L.T. Phan, D. Carino, E. Duthiuh, and Garboczi, editors, Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg (USA), pages 69 – 73, 1997.

[48] Y. Msaad and G. Bonnet. Analyses of heated concrete spalling due to restrained thermal dilation : Application to the “chunnel” fire. Journal of Engineering Mechanics,

132(10) :1124–1132, 2006.

[49] De Larrard 2000, « Structures granulaires et formulation des bétons », traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[50] Georges Dreux « Béton hydraulique, les compositions du béton ».

Les thèses et mémoires

[51] RAKOTONIAINA Volasolo «CONTRIBUTION L'ETUDE DU BETON DE SABLE – APPLICATION » université d'Antananarivo Promotion 2006)

[52]HACHEMI NADIR;BOUSSA ADEL ; «Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton» Université de M'hamed Bougara –Boumerdes2017 ; Mémoire de master.

[53]BAIKER Mohamed Cherif, « Contribution à l'étude des Caractéristiques physicomécaniques d'une brique a base du sable des dunes et les copeaux de bois », Mai 2016.

[54]Pr. GHOMARI Fouad «Matériaux de Construction», Université Aboubekr Belkaid

[55]CHERAIT YACINE, NAFA ZAHREDINNE« Eléments de matériaux de construction et essais» Université de Guelma2007

[56] RACHI -DENDANI MOHAMED «influence des différentes granulométries des agrégats sur le comportement mécanique du béton ordinaire" université de m'Hamed Bougara Mémoire Master

[57]Hachemi Samya « Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants », université de Biskra 2015. Thèse du doctorat.

[58] Hachemi, Bousa "Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton" université de m'Hamed Bougara Mémoire Master

[59] A. Fabbri. Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel. PhD thèses, Université de Marne-La-Vallee, 2006.

[60]: F. HAFIDI, F .SAFOUNI, F. FARDJI, « Endommagement des structures en béton arme dû au retrait par temps chaud ». Mémoire de licence, Université Africain d'ADRAR ,2013.

[61] Bernard., Menguy.G.et Schwartz.M.1992:Le rayonnement solaire conversion thermique et application. LAVOISIER tec et doc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [62] Arup Fire. Fire resistance of concrete enclosures. Arup Group Ltd, Oct 2005.
- [63] Menou.A ,2004 : étude du comportement thermomécanique des bétons a haute température, Thèse de doctorat à l'Université, de Pau et des pays de L'Adour.
- [64]SAFI Brahim. Méthodes de formulation des bétons
- [65] M. Tsybrovska. Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées, évolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure. PhD thèses, Université de Grenoble UJF, 1998.
- [66] J.-C. Mindeguia. Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. PhD thèses, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [67] L.T. Phan, J.R. Lawson, and F.L. Davis. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. Matériaux et constructions, mars 2001.
- [68] W. A. Yanko. Experimental and numerical evaluation of concrete spalling during extreme thermal loading. PhD thesis, University of Florida, 2004.
- [69] B.B.G. Lottman. Fire in bored tunnels. Structural behaviour, during fire conditions, of bored tunnels made with a concrete segmental lining. PhD thesis, Delft University of Technology, 2007. 31, 194
- [70] Evariste Ouedraogo. Codirigée par Yann Malecot « Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances : application au BCV». Université de Grenoble ,7 août 2006
- [71] R. Jansson and L. Bostrom. The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete. In Structure in Fire, pages 418–429, Singapore, 2008.
- [72] Rachid HANICHE « Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert : Etude de l'éclatement». 25 May 2012

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[73] TAYEB HAMMANI Karima ,BOUYAHIA Chérifa «Influence des effets de température et de conservation sur la résistance mécanique du béton». Université Ahmed Draia Adrar , 2018

Les sites web

[74]<http://www.prc.cnrs.fr/spip2.php?article92>

[75] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Slump_test.png

[76] [https:// www.astm.org](https://www.astm.org), 2010a.ASTM.Astm c457 / c457m – 10 a: Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete.

Les normes :

- NF P 18-560 L'analyse granulométrique : Analyse granulométrique par tamisage, 09/1990. NF P 18 304 Module de finesse.
- NFP18-554 ,11/ 1990 Les masses volumiques (apparente et absolue).
- NF P 18-554 ,11/ 1990, Absorption de l'eau
- NF P 18-591 Propriété de gravier
- NA 455/EN933-8 Décembre, L'équivalent de sable : Détermination de la propreté des sables
- NF P 18-597 Equivalent de sable : Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines.
- NF P -18-561, Coefficient d'aplatissement
- NFP-18 573, Los Angeles
- NFP-18 572, Micro Deval en présence d'eau
- EN 197-1, La norme de référence des ciments courants est la norme européenne, publiée par AFNOR sous la référence NF EN 197-1,