

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

**Département de Génie Civil**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Projet de Fin d'Etudes**  
**en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état**  
**en Génie Civil**

**Thème**

*Estimation de la poussée*  
*du béton frais*  
*dans les parois de coffrage*

**Proposé par :**  
Mme. A. CHIKH

**Réalisé par :**  
M<sup>elle</sup>.HADDADOU Nabila

**Promotion 2006**

## **Remerciements**

Je tiens à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de m'avoir donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Mes sincères remerciements vont à Mme Chikh qui a dirigé ce travail. Son aide inestimable, ses conseils, et sa gentillesse.

Mes remerciements à tous les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner ce travail.

Ma gratitude va également à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

## **Dédicaces**

Je dédis ce modeste travail à mon grand amour, mon fils Said, à mon mari, à ma promotrice M<sup>me</sup> CHIKH qui l'a dirigé ;

Je le dédis aussi à ma grande famille ; ma mère, mes oncles, mes sœurs, mes frères, mes neveux, mes nièces, mes cousins et cousines ;

Ainsi que ma belle mère, mon beau père, mes belles sœurs, mes beaux frères ;

Et en fin mes copines et tous les gens qui m'ont aidé de loin ou de près.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى تقدير ضغط الإسمنت الجديد على جدران القوالب الإجتتاب الحوادث والتشوهات .  
تحديد أيد قوالب الخرسانة و تقليص أجل الظاهرة و كذا دراسة مختلف التفاعلات الكيميائية التي تحدث مع  
ظاهرة إماهة الإسمنت , و كذا نزع القوالب مع دراسة مختلف أنواعها و مواصفاتها

### **Résumé :**

L'objectif de ce travail est d'estimer la poussée du béton frais sur les parois de coffrage pour éviter les accidents et les déformations, dimensionner les coffrages et diminuer les délais de décoffrages ; y compris l'étude des différentes réactions chimiques qui se passent pendant le phénomène d'hydratation du ciment ainsi que la mise en place des coffrages, et aussi les différents types de coffrages et leurs prescriptions générales.

### **Summary:**

The objective of this work is to estimate the pressure of the freshly-mixed concrete on the walls of formwork to avoid the accidents and the deformations, to dimension the formwork and to decrease the times of dismantling; including the study of the various chemical reactions which occur during the phenomenon of hydration from cement as well as the installation from the formwork, and also the various types of formwork and their general regulations.

### **Mots-clé :**

Pression totale, pression interstitielle, coffrage, pâte de ciment, prise, capteur de pression ;

Béton, durcissement, hydratation, poussée du béton frais ;

Sable, gravier, la chaleur dégagée.

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Dénomination et composition des ciments normalisés (pourcentages en masse). [3]

Tableau II-2: Exigences mécaniques et physiques. [3]

Tableau II-3 : Exigences chimiques. [3]

Tableau II.4 : Le  $C_3A$  n'est pas très réactif et il y a peu de sulfate en solution [20]

Tableau II.5 : Le  $C_3A$  est très réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution [20]

Tableau II.6 : Le  $C_3A$  est très réactif, mais il y a peu de sulfate en solution [20]

Tableau II.7 : Le  $C_3A$  est peu réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution [20]

Tableau II.8 : Diagramme de Löcher [20]

Tableau V-1 : Valeurs limites de  $P_1$  [21]

Tableau V-2 : Valeurs limites de  $P_2$  [21]

Tableau V-3 : Valeurs limites de  $P_3$  [21]

Tableau VI.1 : Pression latérale pour les coffrages murs [3].

Tableau VI.2 : Pression latérale pour les coffrages colonnes [3].

Tableau VI-3 : Formulation de la poussée des bétons par la norme Allemande [3].

Tableau VI-4 : Formulation de la poussée des bétons par la norme CIRIA [3].

# LISTE DES FIGURES

Fig.I.1 : Différents types de granulats [3]

Fig.I.2 : Différentes formes de granulats [3]

Fig.I.3 : Classe granulaire ( $d/D$ ) [3]

Fig.I.4 : Courbe granulométrique [3]

Fig.I.5 : Courbes granulométriques pour les graviers roulés 4/14 et 4/28 [3]

Fig.I.6 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20 [3]

Fig.I.7 : Types de sable [3]

Fig.I.8 : Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen [3]

Fig.II.1 : Différents types de ciments [3]

Fig.II.2 : Différents classes de résistance des ciments [3]

Fig.II.3 : Exemples de désignation de quelques ciments [3]

Fig.II.4 : Le choix d'un ciment dans les conditions normales [3]

Fig.II.5 : Le choix d'un ciment dans on temps très froid [3]

Fig.II.6 : Le choix d'un ciment dans un temps très chaud [3]

Fig.II.7 : Dégagement de chaleur au cours du temps [20]

Fig.II.8: Hydratation de pâte  $C_3S$  dans un calorimètre de la conduction; effet de région de la surface [20]

Fig.II.9: La structure du cristal d'ettringite [20]

Fig.II.10: La structure du cristal demonosulfate [20]

Fig.II.11: Les deux étapes de l'hydratation du  $C_3A$  [20]

Fig.II.12: Mécanisme d'hydratation de  $C_3A$  [20]

Fig.II.13: Apparition du 3ème pic dans la courbe calorimétrique [20]  
Fig.II.14: L'effet du gypse sur l'hydratation globale du ciment portland [20]

Fig.II.15 :L'influence de gypse sur l'hydratation du  $C_3S$  [20]

Fig.II.16 : Phénomène de prise de ciment [20]

Fig. II.17: hydratation de  $C_3A$  avec et sans gypse [20]

Fig. II.18: hydratation de  $C_3S$  avec et sans gypse [20]

Fig.II.19 : Diagramme de Rankin (1916) [10]

Fig.II.20 : Diagramme de Rankin à trois phases pour additions sélectionnées [23]

Fig.III-1 : Coffrage traditionnel en bois [3]

Fig.III-2 : Coffrage de mur au moyen d'éléments en bois contreplaqué [3]

Fig.III-3 : Coffrages métalliques [3]

Fig. III-4 : Coffrage à progression verticale continue [3]

Fig. III-5 : Coffrage perdu [3]

Fig. III-6 : Coffrage glissant [3]

Fig. III-7 : L'écart d'implantation des parois à parements verticaux [21]

Fig. III-8 : L'écart sur la verticalité du parement d'un mur [21]

Fig.IV.1 : Pression verticale s'exerçant sur un coffrage horizontal [3]

Fig.IV.2 : Pression horizontale exerçant sur le coffrage [3]

Fig.IV.3 : Profil type de la poussée du béton frais selon Gardner [19].

Fig.IV.4 : Profil type de la poussée du béton frais (Bernier [19]).

Fig.IV.5 : Influence de la phase granulaire sur la poussée mesurée à 1,60 mètre de profondeur (d'après S.Amziane) [19]

Fig.IV.6 : Répartition des pressions d'un béton sur un coffrage [19]

Fig.IV.7 : Comparatif entre le modèle de Rodin et celui du ACI pour différentes valeurs de vitesse de bétonnage (H=3 m et T=20°C). [19]

Fig.IV.8 : Comparatifs des différents modèles empiriques (H=3m ; V=3 m/h et T=20°C). [19]

Fig.IV.9 : Influence de la vitesse de bétonnage sur le rapport  $P_{\max}/P_{\text{hydrostatique}}$  (Hauteur du coffrage=3m, T=20°C, densité du béton=2,3). [19]

Fig.IV.10 : Facteurs de réduction pour pression horizontale [3]

Fig.V.1 : Poussée hydrostatique du béton [19]

Fig.V.2 : Effet de voûte ou effet d'arc en fonction de la petite dimension du coffrage d [19]

Fig.V.3 : Effet de durcissement en fonction de l'affaissement de l'ouvrabilité [19]

Fig.V.4 : Comparaison des différentes normes de détermination du profil initial [19]

Fig.VI.1 : Représentation de la norme NF P 18-451 pour différentes épaisseurs pour H=3m

Fig.VI.2 : Représentation de la norme NF P 18-451 pour différentes épaisseurs pour H=7 m

Fig.VI.3 : Représentation de la norme DIN 18218 pour H=3m

Fig.VI.4 : Représentation de la norme DIN 18218 pour H=7m

Fig.VI.5 : Représentation de la norme CIRIA pour H=7m

Fig.VI.4 : Comparaison des différentes normes de détermination du profil initial [19]

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

<b>1-CONTEXTE :</b> .....	1
<b>2-OBJECTIFS :</b> .....	1
<b>3-METHODOLOGIE DE TRAVAIL :</b> .....	2

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS

<b>I-GENERALITES :</b> .....	3
<b>II-LES COMPOSANTS DU BETON :</b> .....	3
1. Ciment.....	3
2. Granulats.....	4
3. Sable.....	8
4. Eau.....	10
5. Adjuvants.....	10
<b>III-PREPARATION DU BETON :</b> .....	11
1. Malaxage.....	11
2. Coulage.....	11
3. Vibration.....	11
4. Durcissement.....	11
5. Décoffrage.....	12

## CHAPITRE II : LES CIMENTS

<b>I-GENERALITES :</b> .....	13
<b>II-LES DIFFERENTES PROPRIETES DES CIMENTS :</b> .....	13
<b>III-LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES CIMENTS :</b> .....	13
1. Clinker portland.....	13
2. Laitier granulé de haut fourneau.....	15
3. Cendres volantes.....	16
4. Filler calcaire.....	16
5. Sulfate de calcium.....	16
6. Additifs.....	16



<b>IV.LA NOMENCLATURE DES CIMENTS :</b>	16
<b>V-FABRICATION, COMPOSITION ET DESIGNATION DES CIMENTS NORMALISES :</b>	20
1. Fabrication du ciment portland.	20
2. Composition et désignation du type de ciment.	21
3. Exigences complémentaires.	22
<b>VI-HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND :</b>	25
1. Théorie de base de l'hydratation du ciment.	25
2. Théorie de la prise et du durcissement.	25
a) La théorie cristalloïdale.	25
b) La théorie colloïdale.	26
3. Combinaisons hydratées des constituants des ciments portland.	26
■ Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$	28
■ Hydratation du silicate bicalcique $C_2S$	31
■ Hydratation de l'aluminate tricalcique $C_3A$ .	31
■ Hydratation du silicate tricalcique $C_4AF$ .	35
<b>VI- INFLUENCE DU GYPSE SUR L'HYDRATATION :</b>	36
1• Hydratation du $C_3S$ et du $C_2S$ .	36
2• Hydratation du $C_3A$ .	37
<b>VII-PRISE DU CIMENT :</b>	37
<b>VIII-ANOMALIE DE LA PRISE :</b>	39
<b>IX-REPRESENTATION TRIANGULAIRE DES CONSTITUANTS DU CIMENT :</b>	42

### **CHAPITRE III : LES COFFRAGES**

<b>I - INTRODUCTION :</b>	46
<b>II - CONDITIONS A REMPLIR PAR LES COFFRAGES :</b>	46
<b>III- LES DIFFERENTS TYPES DE COFFRAGE :</b>	46
a) Coffrages traditionnels en pièces de bois assemblées par clouage.	46
b) Coffrages en contreplaqué.	47
c) Coffrages métalliques.	48
d) Coffrages spéciaux.	48
e) Coffrages mobiles.	49
f) Coffrages perdus.	50
g) Coffrages glissants.	50

<b>IV-PRESCRIPTIONS GENERALES RELATIVES AUX COFFRAGES..</b>	<b>51</b>
1. Résistance des coffrages.....	51
2. Rigidité des coffrages et contre-flèches.....	51
3. Etanchéité des coffrages .....	52
4. Ouvertures de contrôle et de serrage.....	52
5. Sécurité du personnel sur le plan de travail.....	52
6. Mise en place des coffrages.....	53
<b>V-PRODUITS ANTI-ADHERANTS :</b> .....	<b>54</b>
<b>VI-DELAIS DE DECOFFRAGE :</b> .....	<b>54</b>

### **CHAPITRE IV: ACTIONS DU BETON FRAIS**

<b>I - INTRODUCTION :</b> .....	<b>55</b>
<b>II-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE :</b> .....	<b>57</b>
1-profil de pression :.....	57
2-formulations empiriques :.....	61
<b>III-ANALYSE :</b> .....	<b>65</b>
1. Consistance du béton-eau de gâchage -densité.....	66
2. Angle de frottement interne - cohésion.....	66
3. Mode de mise en œuvre : coulage – damage – vibration.....	66
4. Vitesse du bétonnage et temps de prise du béton.....	68
5. Nature des coffrages-angle de glissement.....	68
6. Dimensions du coffrage en place, effet de silo.....	68

### **CHAPITRE V:REGLEMENTATION**

<b>NORMES ACTUELLES :</b> .....	<b>70</b>
---------------------------------	-----------

### **CHAPITRE VI:APPLICATIONS**

<b>I-APPLICATION :</b> .....	<b>75</b>
<b>II-CALCUL DE LA PRESSION LATERALE DU BETON FRAIS :</b> .....	<b>75</b>

<b>III-RECOMENDATIONS ET REMARQUES IMPORTANTES :</b> .....	86
1-Mise en place du béton dans un coffrage ou sous eau :.....	86
2-Bétonnage sou eau :.....	86
3-Serrage du béton :.....	88
4-Eléments constituant un coffrage :.....	88
<b>IV-CONCLUSION :</b> .....	88
<b><u>CONCLUSION GENERALE :</u></b> .....	90

**ANNEXES**

**BIBLIOGRAPHIE**

# INTRODUCTION

## 1. CONTEXTE :

Ces dernières années ont connu la naissance de nouveaux bétons tel que les bétons à hautes performances, les bétons à très hautes performances, de fibres, de poudres réactives, autocompactants ...etc.

C'est aussi à cause de la grande fluidité de ces nouveaux bétons que les constructeurs ont commencé à utiliser des coffrages de plus en plus hauts,pouvant atteindre 12 mètres,ceci dans le but de diminuer les délais de réalisation des ouvrages.

Mais les parois coffrantes de grandes hauteurs peuvent présenter des déformations trop importantes et même devenir instables. La réglementation en vigueur ne les a pas encore pris en considération.

La réalisation des ouvrages en béton armé nécessite des coffrages coûteux, et le durcissement du béton impose des délais de décoffrage plus au moins longs qui limitent souvent l'avancement des travaux et les cadences de production. D'où l'intérêt de connaître et d'estimer les paramètres influençant la poussée du béton dans les coffrages.

## 2. OBJECTIFS :

Après avoir passé en revue dans notre étude bibliographique, le phénomène de prise et de durcissement du béton ainsi que les facteurs les plus influençant, pris en compte dans les dernières recherches, nous avons décidé de nous intéresser plus particulièrement aux paramètres suivants :

- Composition du béton (adjuvants, consistance) ;
- Vibration ;
- Dimension des éléments de coffrage ;
- La température ;
- Vitesse de bétonnage
- et plus particulièrement l'effet de la prise du ciment sur le durcissement du béton ;

Le contexte montre la nécessité d'entreprendre de nouvelles études en ce qui concerne notamment le comportement du matériau entre sa mise en oeuvre dans le coffrage et le décoffrage.

La détermination de la poussée initiale, c'est-à-dire juste après la mise en oeuvre, des matériaux cimentaires sur les coffrages est un de nos objectifs.

Par ailleurs, l'ensemble des processus de maturation des matériaux cimentaires conduit progressivement au durcissement et par conséquent à la disparition de la poussée sur les coffrages.

### **3. METHODOLOGIE DE TRAVAIL :**

**Le premier chapitre** de ce travail est destiné aux rappels sur les constituants du béton et le processus de sa préparation.

**Le deuxième chapitre** est consacré au phénomène d'hydratation du ciment et l'étude des différentes réactions chimiques qui se passent.

**Le troisième chapitre** est dédié à la mise en place des coffrages, et aussi les différents types de coffrages ainsi que leurs prescriptions générales.

**Le quatrième chapitre** montre les différentes actions du béton frais qui s'exercent sur les coffrages, ainsi que les instruments de mesure de ces pressions.

**Le cinquième chapitre** est destiné aux normes et réglementations indiquées dans l'étude des phénomènes traités dans les chapitres précédents.

**Le sixième chapitre** est consacré à la détermination de la valeur approximative de la poussée exercée sur les coffrages par différentes méthodes.

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR LES BETONS

### I-GENERALITES:

Le béton est un matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics.

Le béton est un matériau durable lorsqu'il est bien formulé et correctement mis en oeuvre. Toutefois, même durci de longue durée, c'est loin d'être un matériau inerte. Il travaille et subit l'épreuve du temps dans le milieu plus ou moins agressif qui l'entoure

Les dégradations physico-chimiques peuvent être dues:

- à des agents extérieurs (acide, eau pure, eau de mer, solutions salines, etc.) ou
- à des agents internes (alcali réaction, activité sulfatique, gel-dégel de l'eau interstitielle, etc.).

Par ailleurs, ces altérations sont de deux types :

- soit une érosion qui entraîne une partie du liant,
- soit un gonflement souvent accompagné par une fissuration due à la formation de composés expansifs.

### II-LES COMPOSANTS DU BETON :

Le dosage des différents constituants du béton dépend du type de matériau recherché, déterminé par ses utilisations. En effet, ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de sa composition et de facteurs extérieurs, tels que la température.

#### 1. Ciment :

La teneur en ciment dépend de la résistance souhaitée. Pour les bétons de remplissage, peu sollicités, le dosage est de  $150 \text{ kg/m}^3$ . Pour toutes les pièces constituant la structure des bâtiments, en béton armé ou précontraint, le béton contient généralement  $350 \text{ kg/m}^3$  de ciment. Pour les mortiers, mélanges de sable, de ciment et d'eau, la teneur atteint en moyenne  $450 \text{ kg/m}^3$ . Enfin, les coulis, utilisés en injection dans des forages, ne comprennent que du ciment et de l'eau. Ils servent à boucher les microfailles et les fractures d'un terrain, par exemple autour d'un barrage avant son édification.

Dans le chapitre suivant, le ciment sera étudié plus en détail, tenant compte de son importance.

## 2. Granulats :

On appelle granulats les matériaux inertes, sable, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons. Ils constituent le squelette du béton, qui doit être le plus compact et le plus durable possible.

### a) Types de granulats :

Les granulats utilisés sont des graviers issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières (figure.I.1). La taille des granulats varie en fonction de celle du coffrage, de la densité d'acier pour les éléments en béton armé, et du type de béton recherché. La taille des granulats est indiquée par deux chiffres, la plus grande dimension des éléments les plus petits et celle des éléments les plus grands. Par exemple, un gravier 5/15 est composé de particules dont le diamètre varie entre 5 et 15 mm. Pour les bétons employés en bâtiment, les granulats les plus courants sont des graviers 5/15 et 15/25. Pour des travaux de génie civil, où les pièces sont plus massives, les graviers sont plus gros, jusqu'à 150 mm de diamètre dans le cas des barrages. Il s'agit alors de béton cyclopéen.

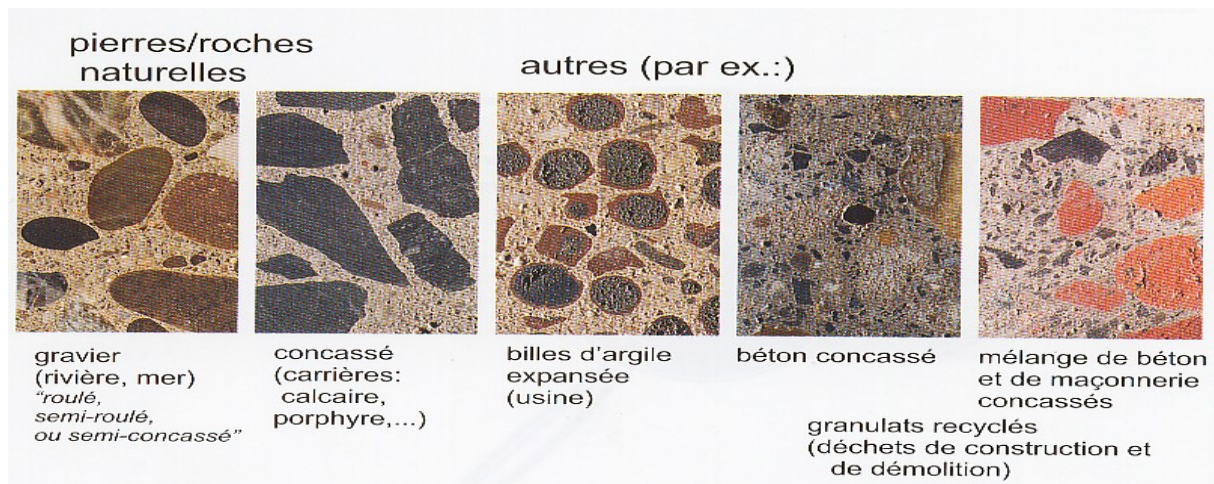


Fig.I.1 : Différents types de granulats [3]

### b) Formes des granulats :

Les granulats ont généralement différentes formes comme l'indique la figure I.2.

La forme des granulats a une influence importante sur la stabilité du mélange, ainsi que sur la quantité nécessaire de mortier donc de ciment.

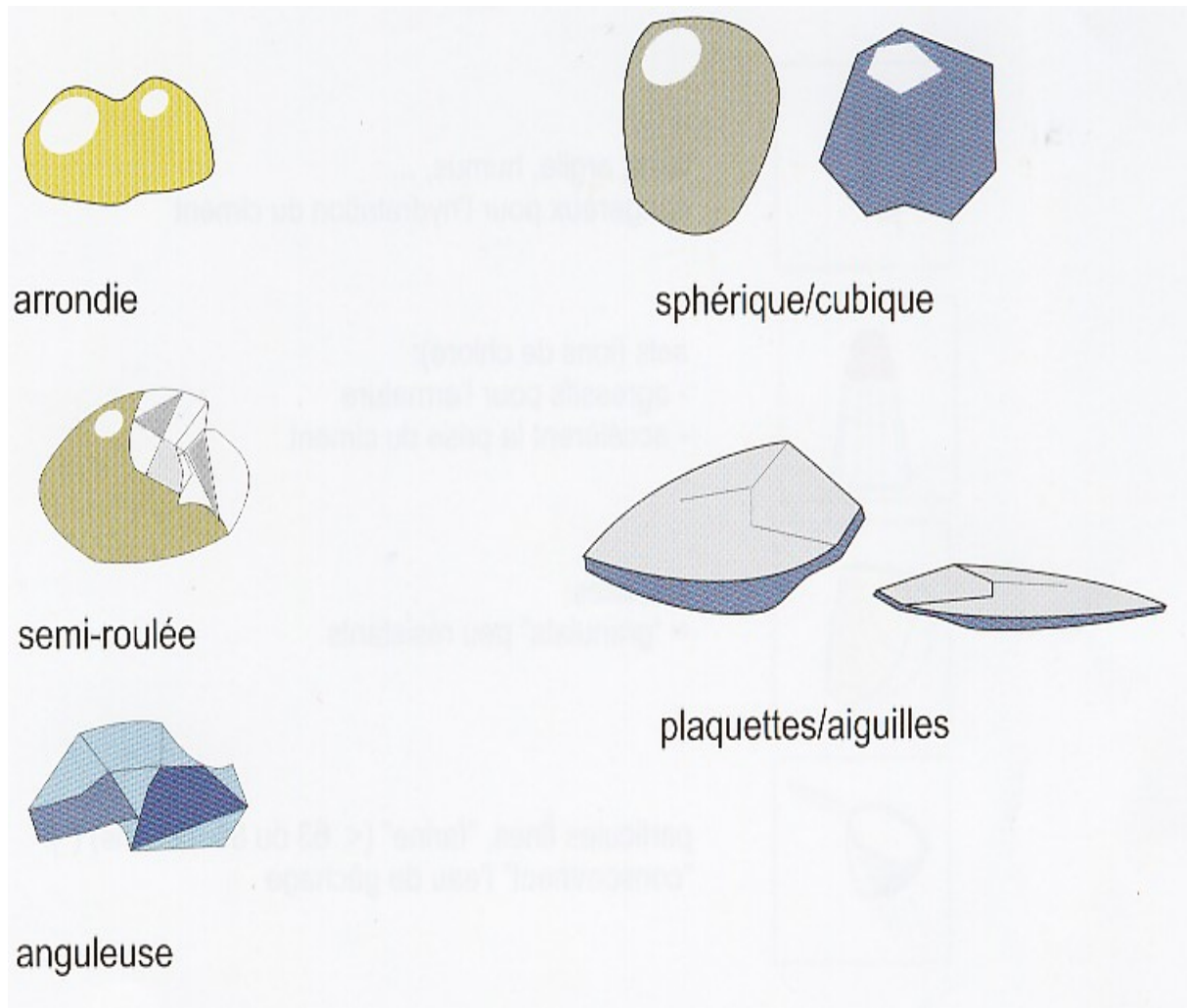


Fig.I.2 : Différentes formes de granulats [3]

### c) Classe granulaire :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle tamisât la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et refus la partie qui est restée sur le tamis.

La classe granulaire  $d/D$  représente les dimensions des plus petits et des plus gros grains. Une bonne granulométrie garantit simultanément un minimum de vides entre grains et un maximum de gros grains (figure.I.3).



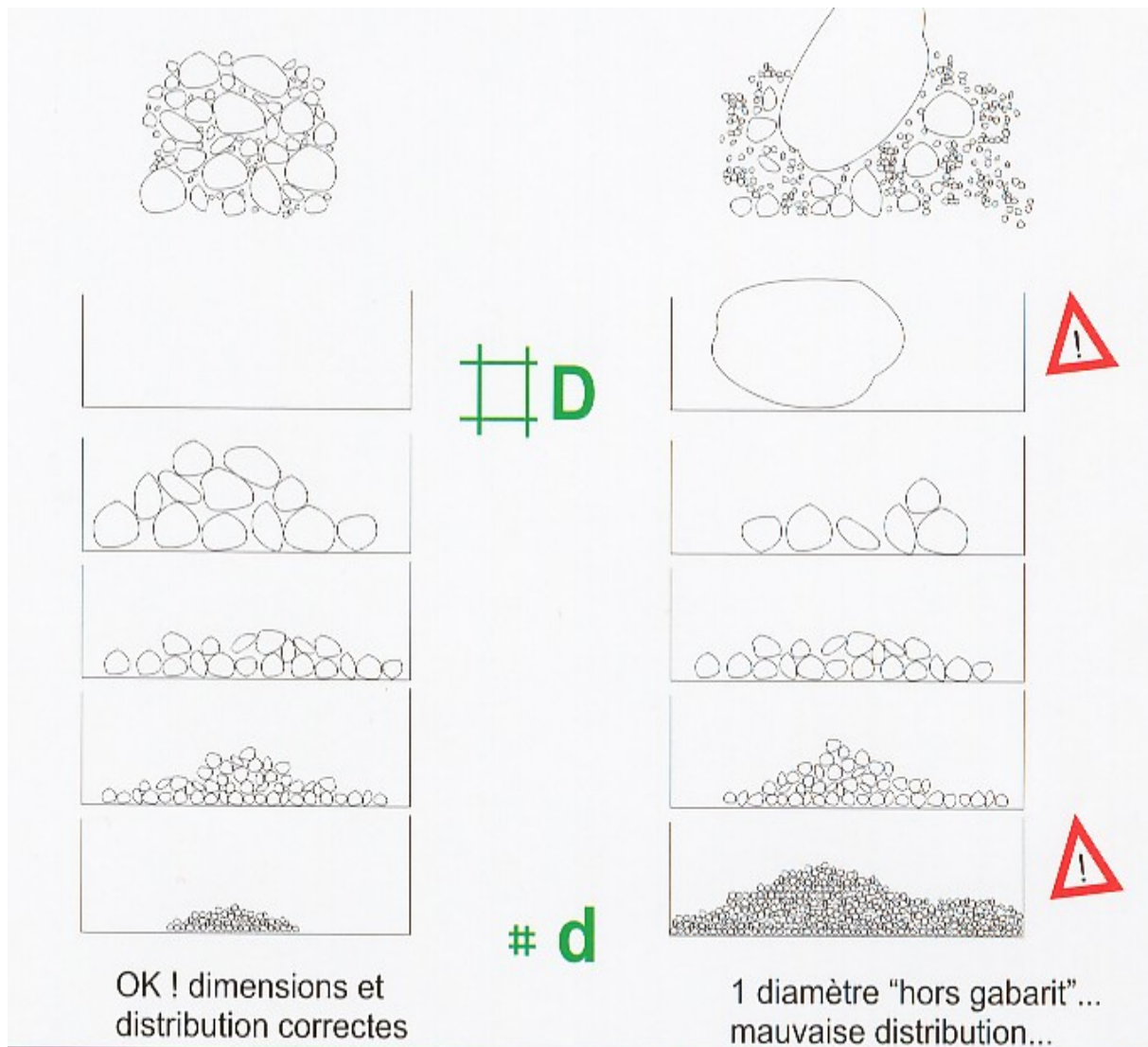


Fig.I.3 : Classe granulaire ( $d/D$ ) [3]

#### d) Courbe granulométrique :

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires composant un granulat donné  $d/D$  ; dans la mesure où l'on peut admettre que la masse spécifique des grains constituant le granulat analysé reste la même quelle que soit la grosseur des grains, la distribution volumétrique est la même que la distribution pondérale.

La granularité est exprimée par un graphique (figure.I.4): la courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs. Pour les classes granulaires les plus fréquentes, les normes définissent des « fuseaux » à l'intérieur desquels les courbes granulométriques doivent être situées.

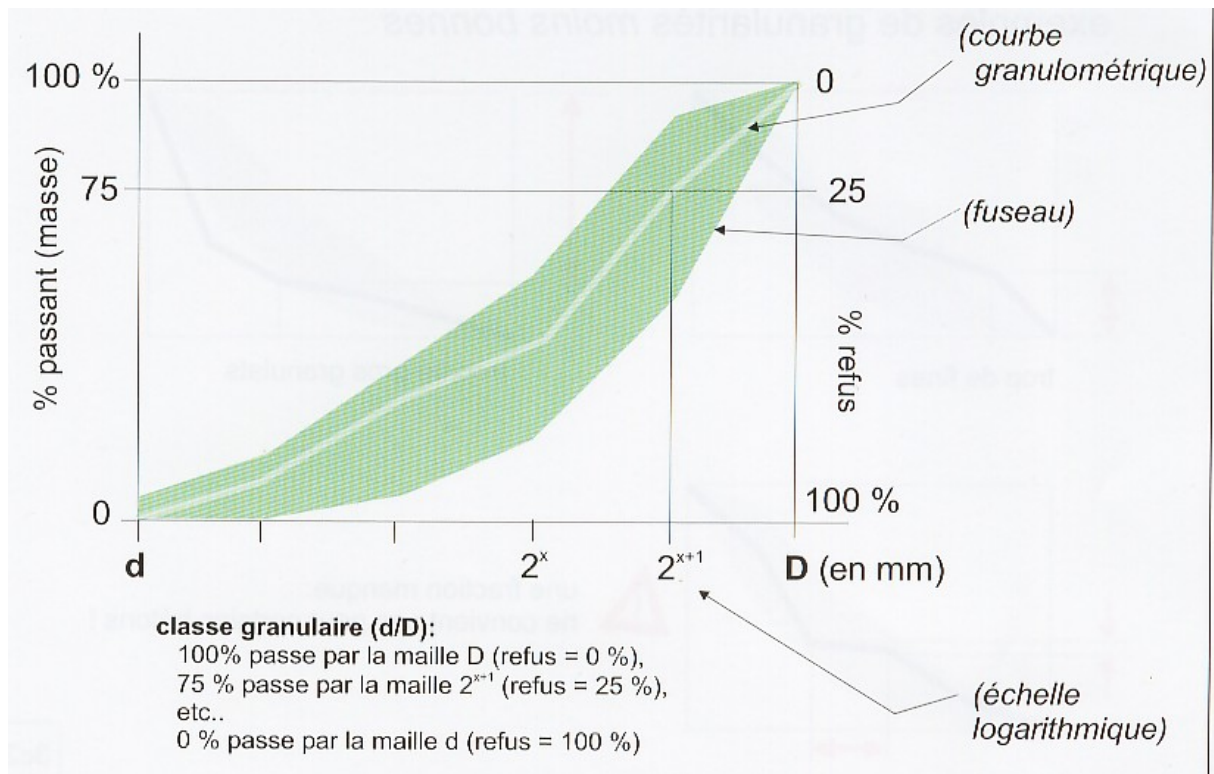


Fig.I.4 : Courbe granulométrique [3]

- Exemple : Courbes granulométriques pour les graviers roulés 4/14 et 4/28

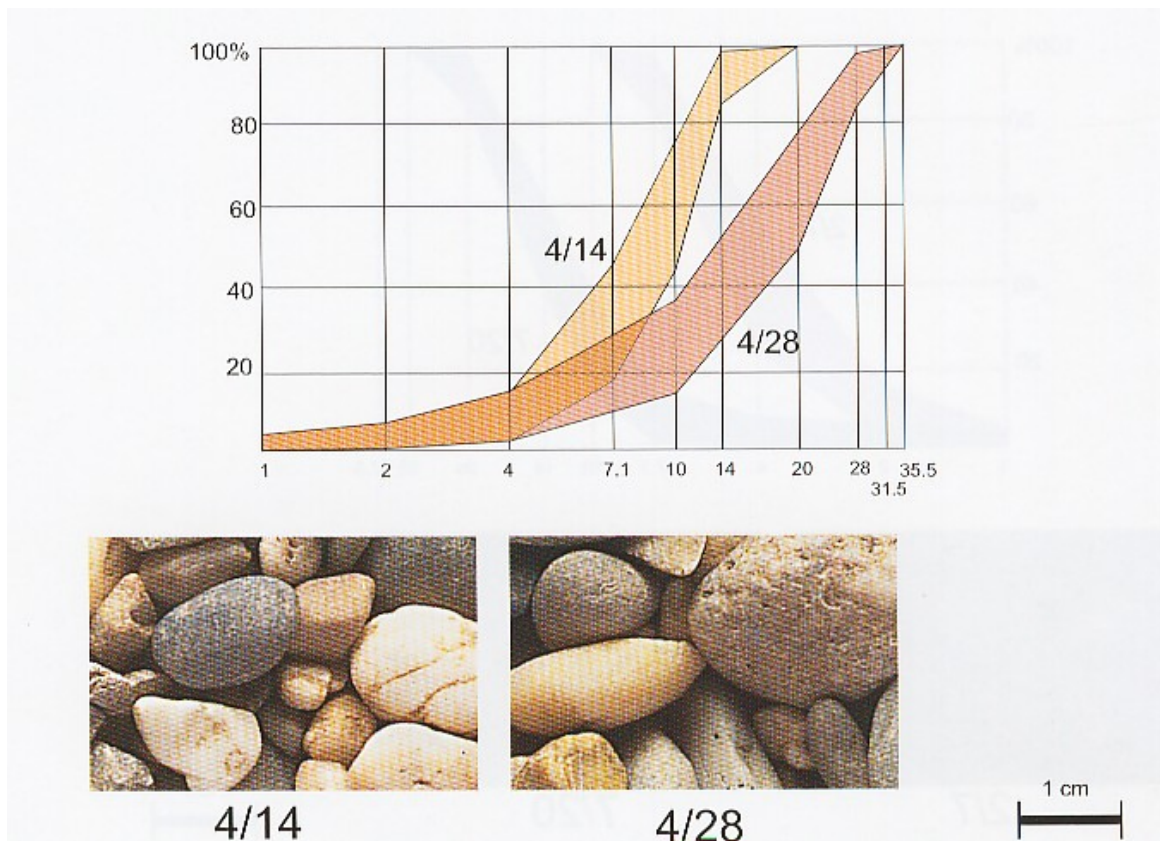


Fig.I.5 : Courbes granulométriques pour les graviers roulés 4/14 et 4/28 [3]

- Exemple : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20

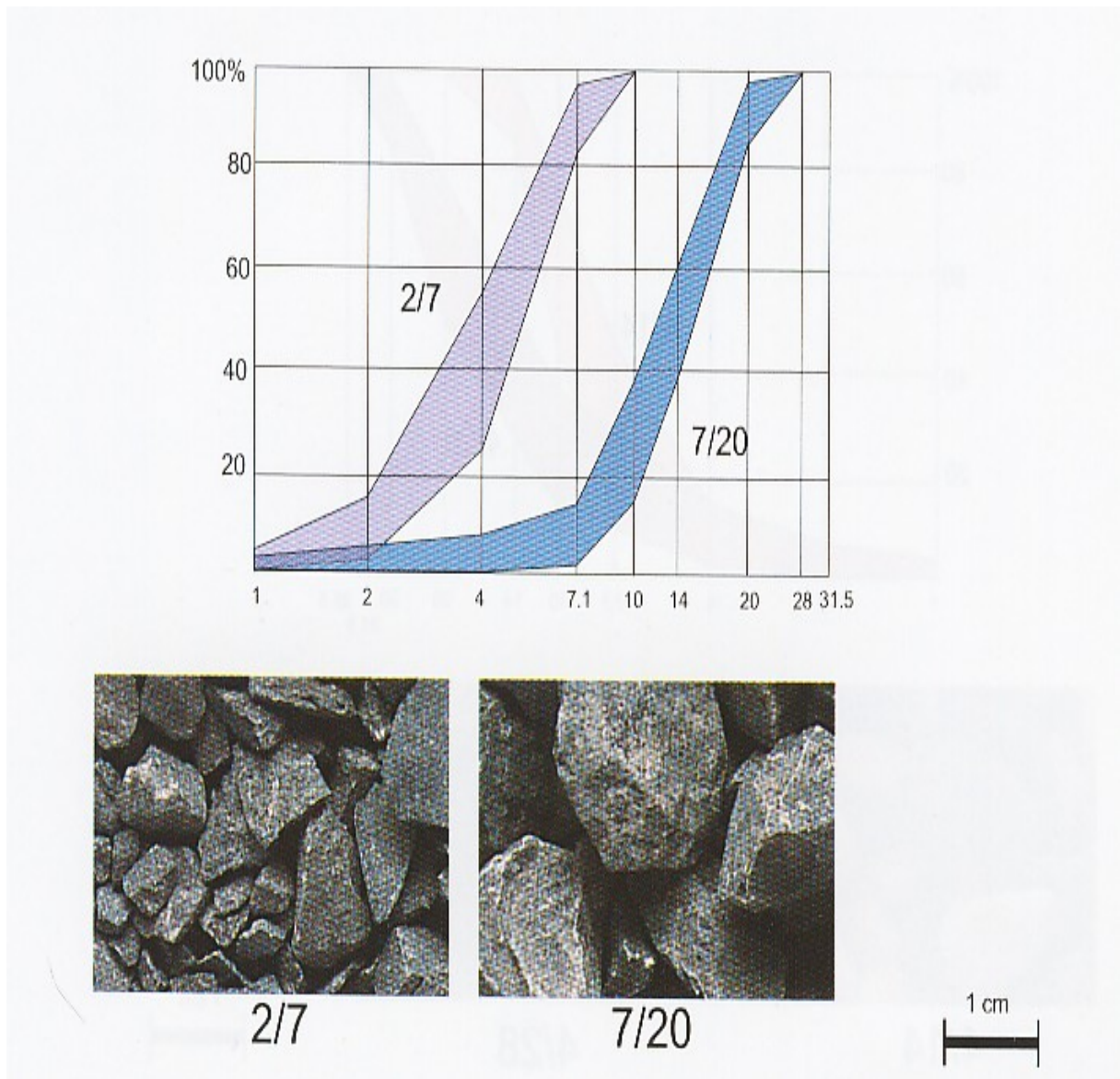


Fig.I.6 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20 [3]

### 3. Sable :

Les grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 2 mm. Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau.

Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs.

Le sable de sablière présenté ici (figure.I.7) est mono granulaire. Pour cette raison, il ne convient pas a priori pour faire du béton.



Fig.I.7 : Types de sable [3]

- Exemple : Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen

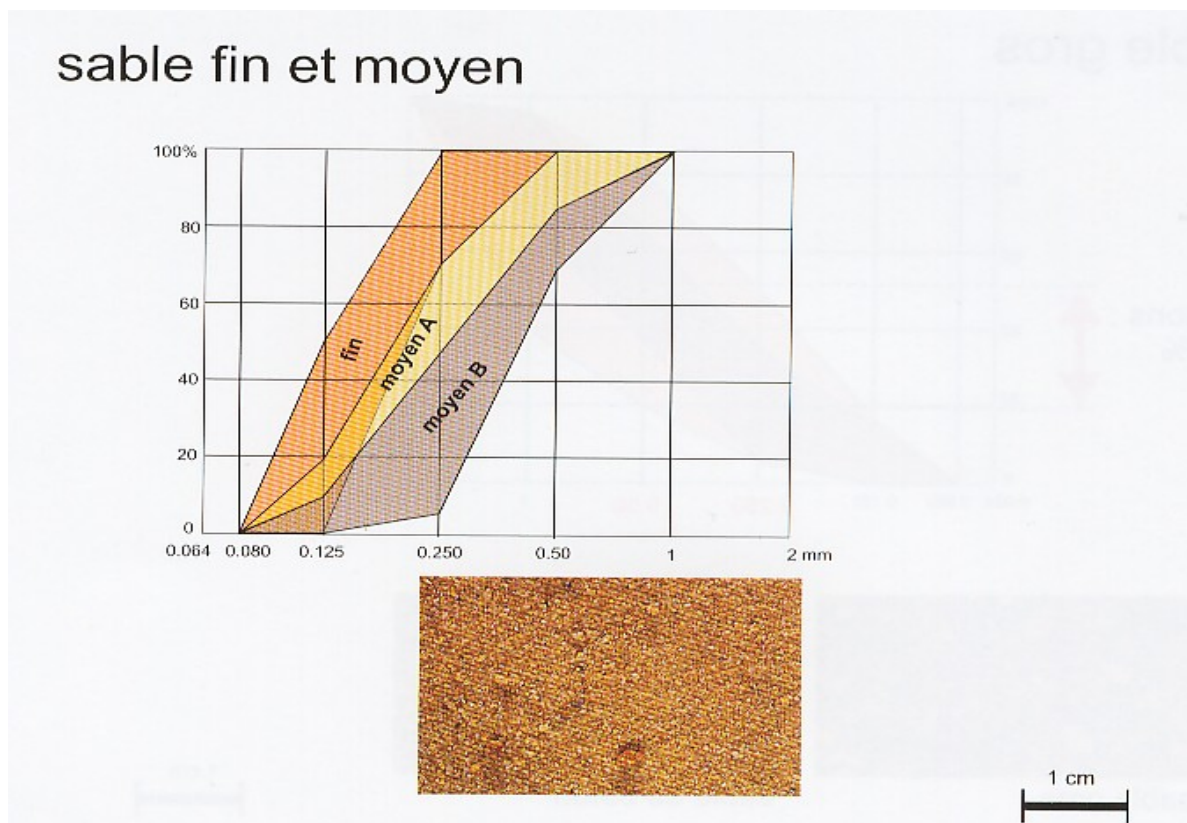


Fig.I.8 : Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen [3]

#### **4. Eau :**

L'eau de ville convient parfaitement au malaxage du béton. Si l'eau de gâchage provient d'autres sources, il y a lieu de procéder à une analyse chimique. En effet, ni la couleur, ni l'odeur, ni le goût ne peuvent attester de sa convenance. Lors du dosage de l'eau de gâchage, la totalité de l'eau intervenant dans le mélange doit être considérée, y compris celle introduite par les granulats, surtout les sables humides.

L'eau doit être propre ; c'est généralement de l'eau potable.

Si l'eau contient des chlorures, une réaction chimique a lieu et modifie la prise du ciment. Le béton perd alors ses qualités de résistance. La consistance du béton, et donc sa facilité de mise en œuvre dans les coffrages, dépendent de la quantité d'eau. Plus un béton est liquide, plus il est facile à travailler. Mais un tel matériau présente une plus faible résistance une fois sec. Il est donc nécessaire de définir la teneur en eau selon l'usage du béton, et d'obtenir le juste équilibre pour que le matériau soit résistant et néanmoins maniable. En général, le béton mis en œuvre est plutôt sec, mais il est vibré au coulage pour lui permettre de remplir correctement le coffrage, et pour expulser l'air emprisonné lors du malaxage.

#### **5. Adjuvants :**

On entend par adjuvant un produit qui, ajouté au béton en faible quantité, permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci.

Lors du malaxage, on ajoute parfois des adjuvants au béton ce qui permet de modifier les propriétés du matériau. Il est ainsi possible de rendre des bétons étanches, pour construire des ouvrages souterrains ou des piscines ; on peut retarder ou accélérer le temps de prise du ciment dans le béton.

Des adjuvants sont également utilisés à des fins architecturales. Par exemple, au cours du malaxage, on peut ajouter des pigments aux bétons ou aux mortiers pour colorer les ouvrages. Des durcisseurs de surfaces, des particules de quartz sont incorporés pour obtenir des dalles en béton supportant des charges roulantes importantes, en usine par exemple.

Le béton peut être rendu poreux et fortement perméable, pour des applications en lit filtrant, ou sous les chaussées de route, pour empêcher l'eau de pluie de stagner sur les voies de circulation. Pour obtenir des massifs de béton lourd, utilisés comme lest, on peut incorporer des particules d'acier. Le béton obtenu peut avoir une densité allant jusqu'à  $4 \text{ t/m}^3$ , alors que la masse volumique d'un

béton courant non armé est de  $2,4 \text{ t/m}^3$ , selon la nature des composants .Le béton comprenant des particules de plomb contribue à stopper les rayonnements ; on l'emploie en milieu nucléaire. Le béton lourd possède également de très bonnes propriétés d'isolation phonique.

### **III-PREPARATION DU BETON:**

#### **1. Malaxage :**

On mélange les composants manuellement, à la pelle, ou au moyen d'engins mécaniques, tels qu'une bétonnière. Pour des grands travaux, le béton est fabriqué dans une centrale qui mélange automatiquement les constituants selon une composition programmée à l'avance. La production peut atteindre plus de  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'objectif est de mélanger suffisamment les composants pour obtenir une pâte homogène, au sein de laquelle les éléments les plus fins, sable et ciment, comblent les vides laissés par l'agglomération des granulats ; on doit également envelopper complètement les graviers pour obtenir, une fois sec, un matériau constitutif d'une roche.

#### **2. Coulage :**

Le béton peut être transporté jusqu'au chantier par des toupies, bétonnières montées sur camion. Une pompe à béton achemine le matériau en hauteur ou sur des sites difficilement accessibles aux camions. Sur les gros chantiers, le pompage du béton permet des cadences beaucoup plus importantes que si l'on emploie des bennes amenées par grue sur le lieu du coulage. Le béton peut également être projeté au moyen de compresseurs pneumatiques. Ce matériau, qui ne nécessite pas de coffrage, est utilisé lors de la construction de piscines, ou pour conforter des talus de terre instables risquant de s'écrouler.

#### **3. Vibration :**

Une fois coulé dans un coffrage, le béton est vibré à l'aide d'aiguilles ou par des vibreurs électriques montés directement sur le coffrage. L'air expulsé durant cette phase provient des cavités entre les graviers, qui se remplissent de la pâte fine de ciment et de sable. La vibration permet un mélange efficace et améliore le durcissement.

#### **4. Durcissement :**

La température ambiante a une grande influence sur le durcissement ou prise du béton. Par temps de gel, il peut être nécessaire de chauffer l'eau, parfois même les granulats, avant de malaxer et de couvrir le matériau pour retenir la chaleur dégagée par les réactions exothermiques lors de la prise du ciment. Par

temps très chaud, au contraire, on doit arroser le béton et le garder à l'ombre, afin que l'eau nécessaire à la prise ne s'évapore pas et provoque un retrait, c'est-à-dire une diminution de volume de la pièce. Ce phénomène engendre des fissures dans le béton. Plus le béton est maintenu humide sur une longue période, plus sa résistance sera importante. La prise a lieu en quelques heures.

### **5. Décoffrage :**

Pour les pièces préfabriquées et les éléments non porteurs, il est possible de décoffrer quelques heures seulement après le coulage. En général, par temps doux, on coule le béton le soir pour le décoffrer le lendemain matin. Les éléments porteurs, comme les poutres ou les planchers, doivent rester plusieurs jours dans leur coffrage : le béton doit durcir suffisamment pour supporter leur propre poids, ainsi que les charges qui y seront appliquées.

1 m<sup>3</sup> de béton ordinaire contient approximativement 350kg de ciment, 420l, ou 590kg, de sable 0/5, 820l, ou 1180kg, de gravier 5/15 et 15/25, et de 210l d'eau, y compris celle contenue dans les granulats s'ils sont humides.

# CHAPITRE II

## LES CIMENTS

### I-GENERALITES :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et broyage d'un mélange minéral (calcaire+argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement, d'où le nom de liants hydrauliques .Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

### II-LES DIFFERENTES PROPRIETES DES CIMENTS :

Les ciments ne sont pas des matériaux purs mais sont constitués de plusieurs constituants dont la nature et les propriétés permettent de composer les divers types de ciments qui ont des propriétés différentes. On peut citer :

1. Soit des propriétés hydrauliques, qu'ils forment par réaction avec l'eau, des composés hydrates stables très peu solubles dans l'eau, présentant une forte adhérence entre eux et les granulats, et créant ainsi progressivement une cohésion croissante des pâtes, des mortiers et des bétons .Parfois, pour se déclencher, ces propriétés hydrauliques nécessitent l'intervention d'un catalyseur constitué par une base forte.
2. Soit des propriétés pouzzolaniques, qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec de la chaux, des composés hydratés, stables, analogues à ceux formés par les constituants hydrauliques au cours de leurs hydratation.
3. Soit des propriétés physiques, qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité...).Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus ou moins développé.

### III-LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES CIMENTS :

Les constituants principaux sont :

- Clinker Portland
- Laitier granulé de haut fourneau
- Cendres volantes
- Filler calcaire
- Sulfate de calcium
- Additifs

#### 1. Clinker Portland :

Le ciment Portland est un liant hydraulique qui durcit tant sous l'eau qu'à l'air. Il est obtenu en broyant très finement un mélange de calcaire et d'argile, qui



assure la prédominance dans le clinker de silicates de calcium .Le mélange forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm et s'appelle clinker ; la qualité de celui-ci détermine les principales propriétés d'un ciment, résistance, durée, stabilité dans les différentes conditions d'exploitation.

Pour régler le temps de prise du ciment, on ajoute au clinker pendant le broyage du gypse en quantité équivalente à 1.5 à 3.5% de la masse de ciment. Le ciment Portland peut être mis sur le marché sans apport supplémentaire ou avec des adjuvants minéraux actifs dont la masse peut atteindre 15% de la masse totale du ciment .La qualité d'un clinker dépend de sa composition chimique et minéralogique .Pour la production du clinker à ciment Portland on utilise le calcaire et l'argile .Le calcaire est composé principalement de deux oxydes :CaO et  $\text{CO}_2$  ;et l'argile des diverses matières contenant surtout trois oxydes : $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .Au cours de la cuisson du mélange d'origine  $\text{CO}_2$  se trouve éliminé ; alors que les 4 oxydes restants,à savoir CaO, $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,forment les minéraux du clinker.

Alors, les 4 principaux constituants du clinker sont :

.Le silicate tricalcique :  $\text{SiO}_2$  ,3CaO ou ( $\text{C}_3\text{S}$ )

.Le silicate bicalcique :  $\text{SiO}_2$  ,2CaO ou ( $\text{C}_2\text{S}$ )

.L'aluminate tricalcique :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,3CaO ou ( $\text{C}_3\text{A}$ )

.L'alumino-ferrite tetracalcique : 4CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

### **a)traitement thermique de formation du clinker :**

100-200° : évaporation de l'eau

600-700° : préchauffage du mélange

900-1000° : décarbonatation et calcination :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

1000-1200° : formation de silicate di calcique  $\text{C}_2\text{S}$  et volatilisation des alcalins

1200-1300° : formation de  $\text{C}_3\text{A}$  et de  $\text{C}_4\text{AF}$  qui passe en phase liquide à plus ou moins 1260°

1260-1450° : formation de  $\text{C}_3\text{S}$  avec disparition de la chaux libre.

Jusqu'à un certain point, la formation de  $\text{C}_3\text{S}$  est favorisée par l'accroissement de la température de cuisson.

Mais la réaction  $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$  présente la particularité de s'inverser à haute température en formant la chaux libre qui se recombinera d'autant facilement lors du refroidissement que celui-ci est plus rapide et que les cristaux de CaO sont de plus grande taille.

### **b) influence du refroidissement :**

Rapide : fort pourcentage en verre (20%) correspondant à la vitrification du liquide interstitiel ; d'où grande résistance au broyage ; les grains de MgO cristallin sont dissous dans la phase inter vitreuse et ne donneront lieu qu'à une faible expansion au cours de l'hydratation ;  $\text{C}_2\text{S}$  se trouve essentiellement sous

sa forme bêta ; l'effusement indésirable étant empêché par la gangue de verre qui emprisonne les grains de silice.

Lente : après une cuisson modérée, le clinker manifeste une meilleure aptitude au broyage.

### **c) rôle du broyage :**

Le clinker qui se présente à la sortie du four sous la forme de grains arrondis de 0.5 à 3 cm de diamètre est ensuite broyé en présence d'une certaine quantité (2.5%) de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) régularisateur de prise.

La finesse de mouture obtenue influe considérablement sur les caractéristiques d'hydratation du ciment ; les quotients petits étant aussi les plus actifs.

La distribution granulométrique de chaque constituant du ciment après le broyage sera conditionné par sa dureté ; ainsi les matériaux les plus tendres (gypse,  $\text{CaO}$ ) sont en plus forte proportion dans la classe la plus fine et le  $\text{C}_3\text{S}$  est plus apte au broyage que le  $\text{C}_2\text{S}$  tandis que la répartition des aluminates est assez uniforme.

## **2. Laitier granulé de haut fourneau :**

C'est un résidu minéral issu de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minéral et du coke métallurgique .Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de  $1500^\circ\text{C}$  .Figé par refroidissement brusque,il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui .Il contient de la chaux,de la silice,de l'alumine et de la magnésie,des oxydes divers et du manganèse .Le laitier est un véritable ciment manifestant par lui-même des propriétés hydrauliques,grandement activées d'ailleurs par la présence du clinker .Son hydratation,qui se traduit par le développement de résistance mécanique est moins rapide que celle du Portland surtout dans sa période initiale .Elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation).

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation.

Les compositions élémentaires globales sont : [3]

$\text{CaO}$  35 à 45%

$\text{SiO}_2$  30 à 40%

$\text{Al}_2\text{O}_3$  10 à 20%

$\text{MgO}$  05 à 25%

Composition des produits formés dans le haut-fourneau :

$\text{CS}, \text{C}_2\text{S}, \text{C}_2\text{AS}, \text{C}_2\text{MS}, \text{C}_2\text{MS}_2 (2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2)$

### **3. Cendres volantes :**

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes du courant de gaz de chaudière alimentée au charbon pulvérisé.

Les cendres volantes de nature silicoalumineuse (cendres volantes siliceuses) dont la perte au feu est inférieure à 7% [3] forment une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques.

Les pouzzolanes ont la propriété de réagir avec la chaux pour donner les liants hydrauliques.

### **4. Filler calcaire :**

Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques.

Les fillers calcaires peuvent être introduits jusqu'à plus de 5% de la composition d'un ciment sans pour autant que la teneur en calcaire soit  $\geq 75\%$  en masse et qu'il y ait une teneur en argile et en matières organiques compatibles avec les exigences des normes.

### **5. Sulfate de calcium :**

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de régler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium di-hydrate  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , de l'hémihydrate (plâtre)  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre  $\text{CaSO}_4$ ) ou tout mélange de ceux-ci.

### **6. Additifs :**

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans les points cités précédemment et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment.

## **IV.LA NOMENCLATURE DES CIMENTS :**

Suivant leur composition, les ciments sont divisés en différents « types ». En Belgique, 10 ciments « courants » sont produits; leur conformité aux exigences de la norme Européenne EN197-1 est attestée par le marquage CE; certains

ciments satisfont à des exigences additionnelles imposées par les normes belges. Ils portent la marque BENOR.

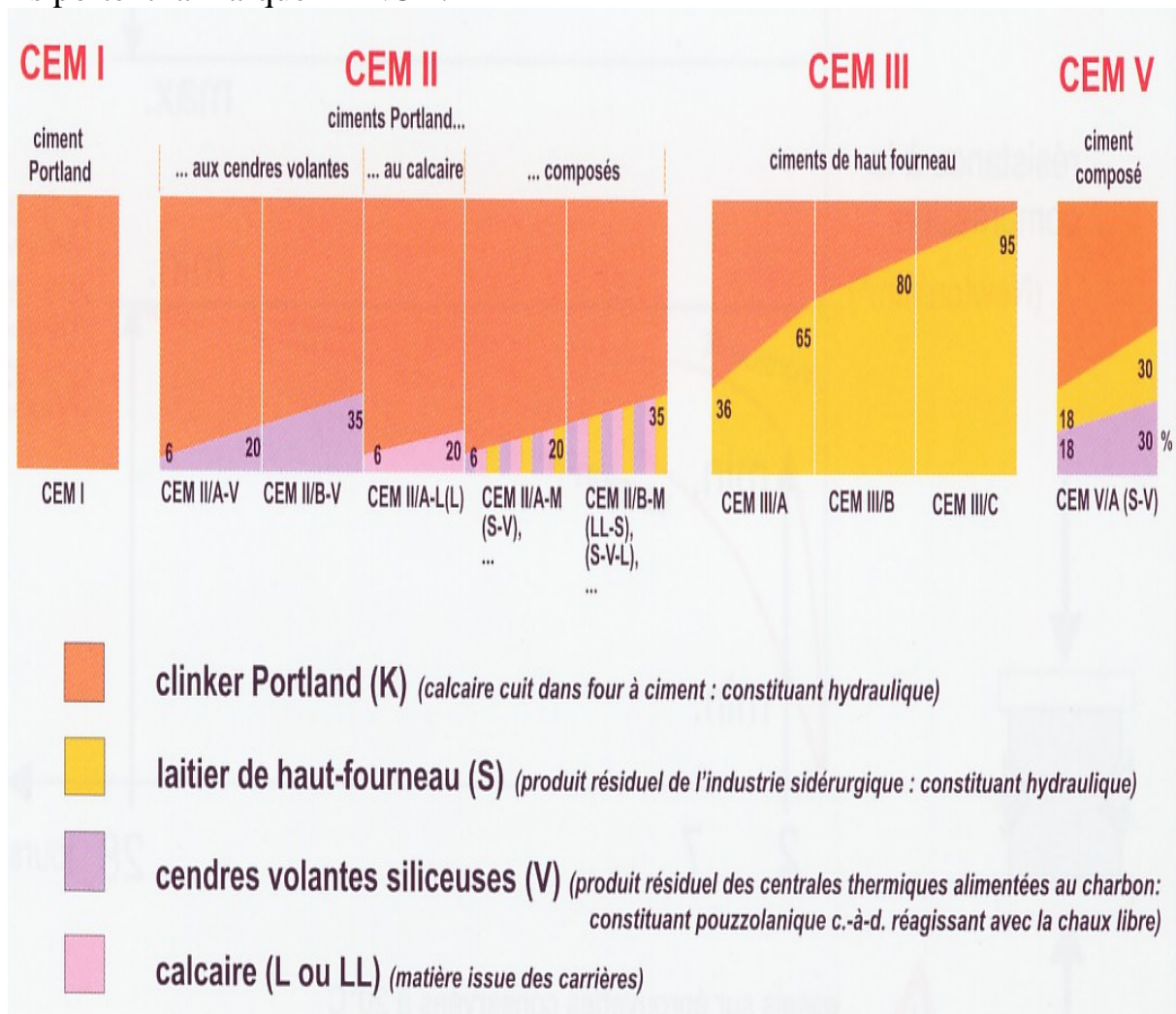


Fig.II.1 : Différents types de ciments [3]

### Remarque:

Le CEM IV -ciment pouzzolanique- ne figure pas dans l'aperçu car il n'est pas produit en Belgique. [3]

La composition et la finesse de mouture d'un ciment déterminent le développement de sa résistance. En fonction de cette évolution, les ciments sont divisés en « classes de résistance ». Celles-ci correspondent à des niveaux de performances minimales (et maximales) à 28jours. Dans chaque classe, et suivant les performances au jeune age, une distinction est faite entre la version N (normale) et la version R (rapide).

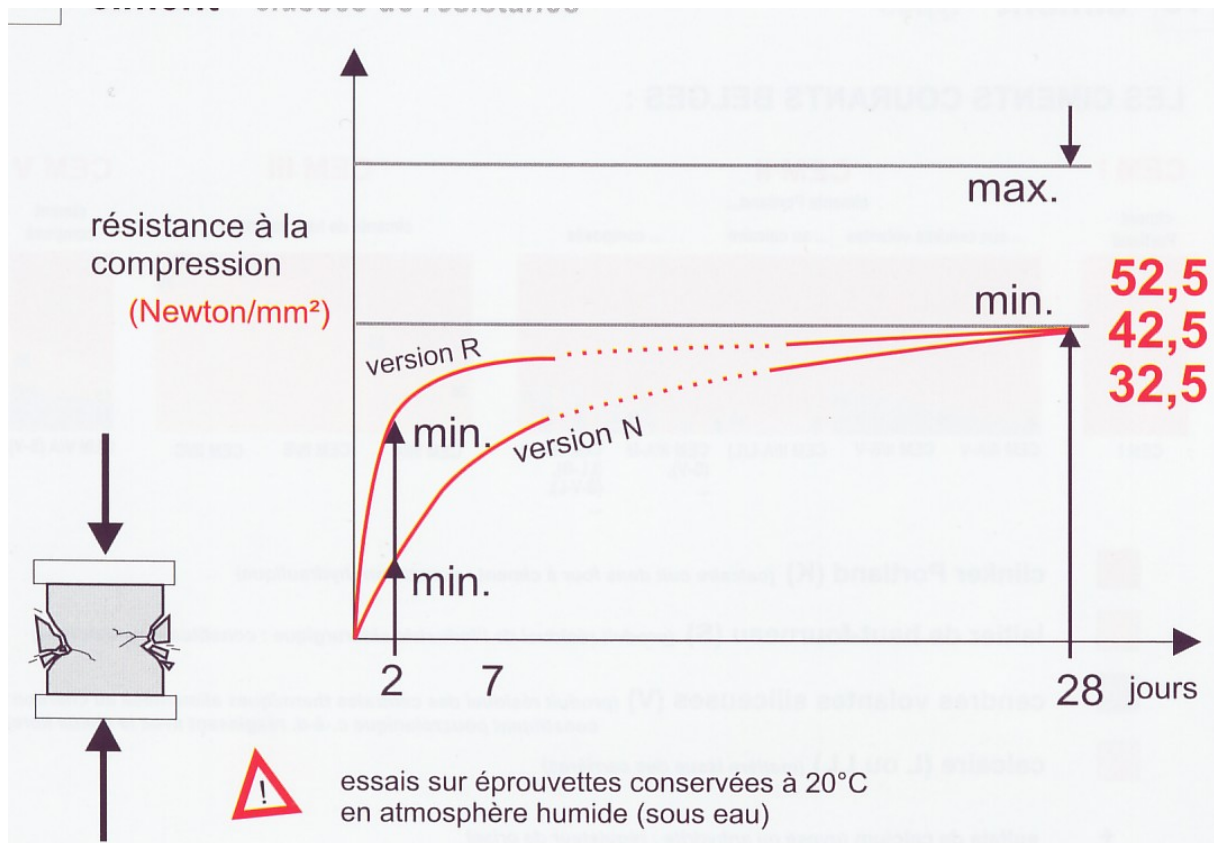


Fig.II.2 : Différents classes de résistance des ciments [3]

Quelques exemples de désignations de ciments et leur signification, conformément à la norme européenne EN 197-1

**CEM I 52,5 N** = ciment Portland - classe de résistance 52,5

**CEM II B-M (S-V-L) 32,5 N**

= ciment Portland composé contenant du laitier, des cendres volantes et du calcaire - classe de résistance 32,5

**CEM II/A-V 32,5 R**

= ciment portland aux cendres volantes - classe de résistance 32,5 - résistance élevée au jeune âge

**CEM III/A 42,5 N** = ciment de haut fourneau A - classe de résistance 42,5

**CEM V/A (S-V) 32,5 N**

= ciment composé contenant du laitier et des cendres volantes - classe de résistance 32,5

Fig.II.3 : Exemples de désignation de quelques ciments [3]

Dans les conditions normales, le choix d'un ciment se fait à partir de la classe de résistance.

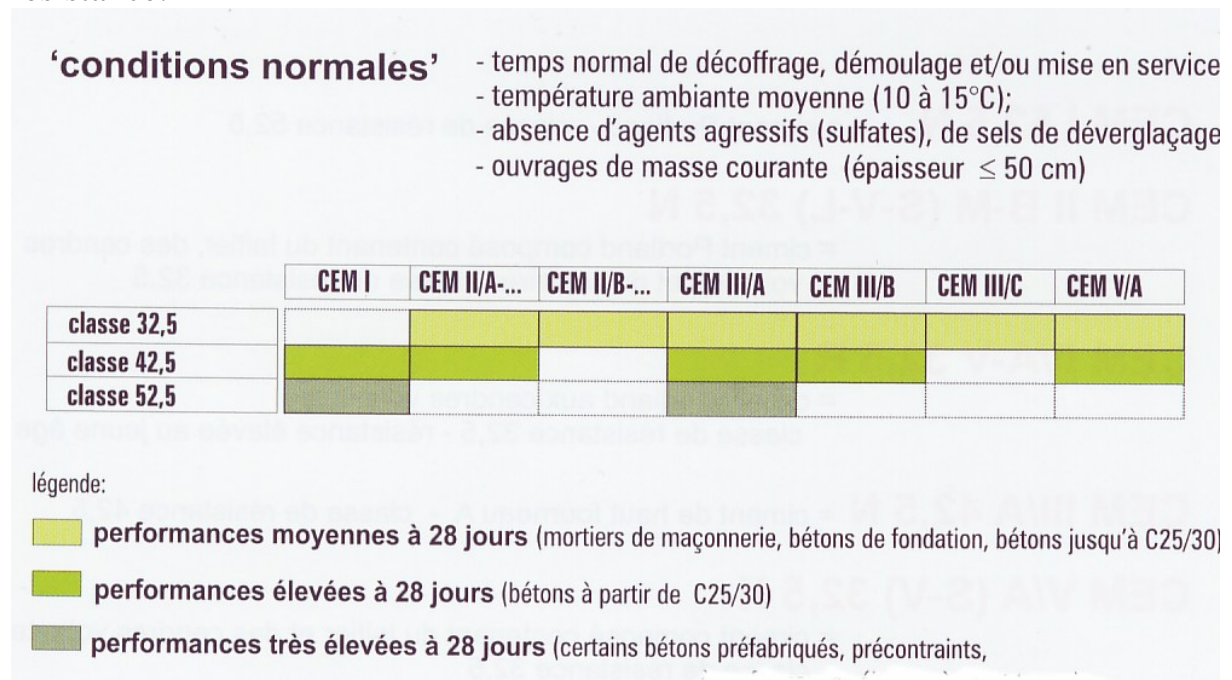


Fig.II.4 : Le choix d'un ciment dans les conditions normales [3]

Par temps froid, il est plus indiqué d'utiliser un ciment à teneur plus élevée en clinker.

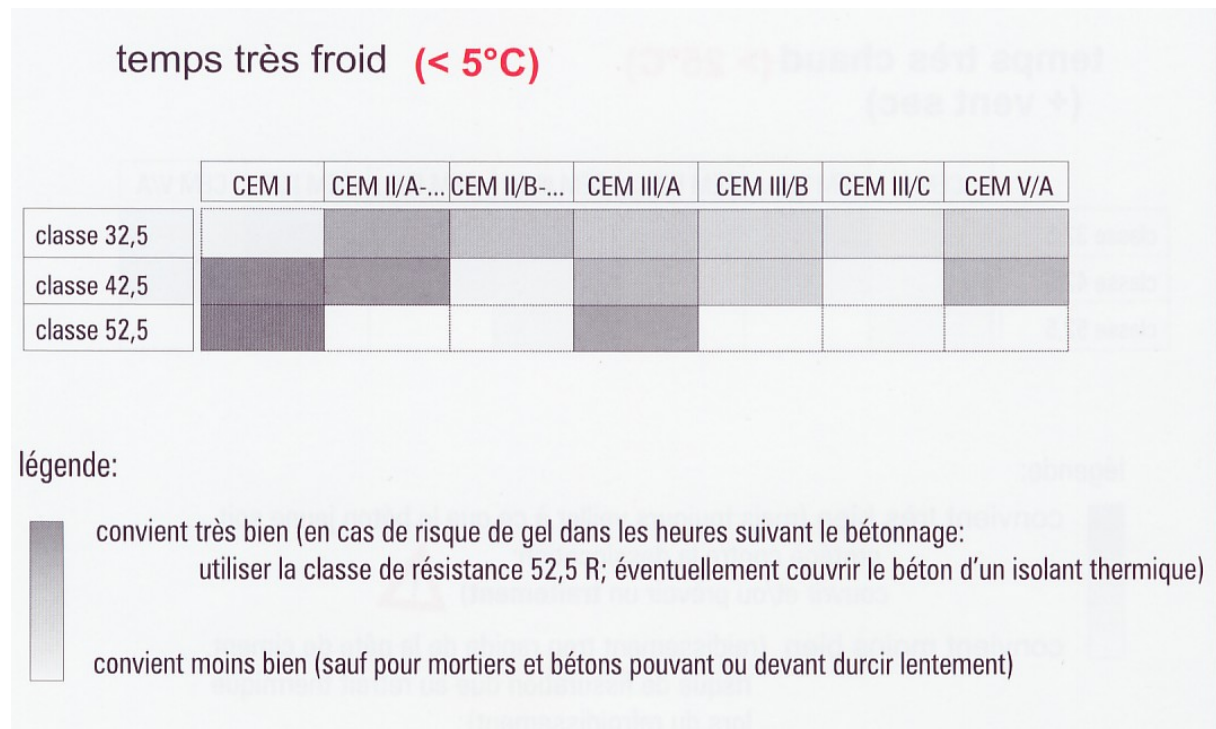


Fig.II.5 : Le choix d'un ciment dans un temps très froid [3]

Par temps chaud, il est plus indiqué d'utiliser un ciment à teneur plus élevée en laitier de haut-fourneau.

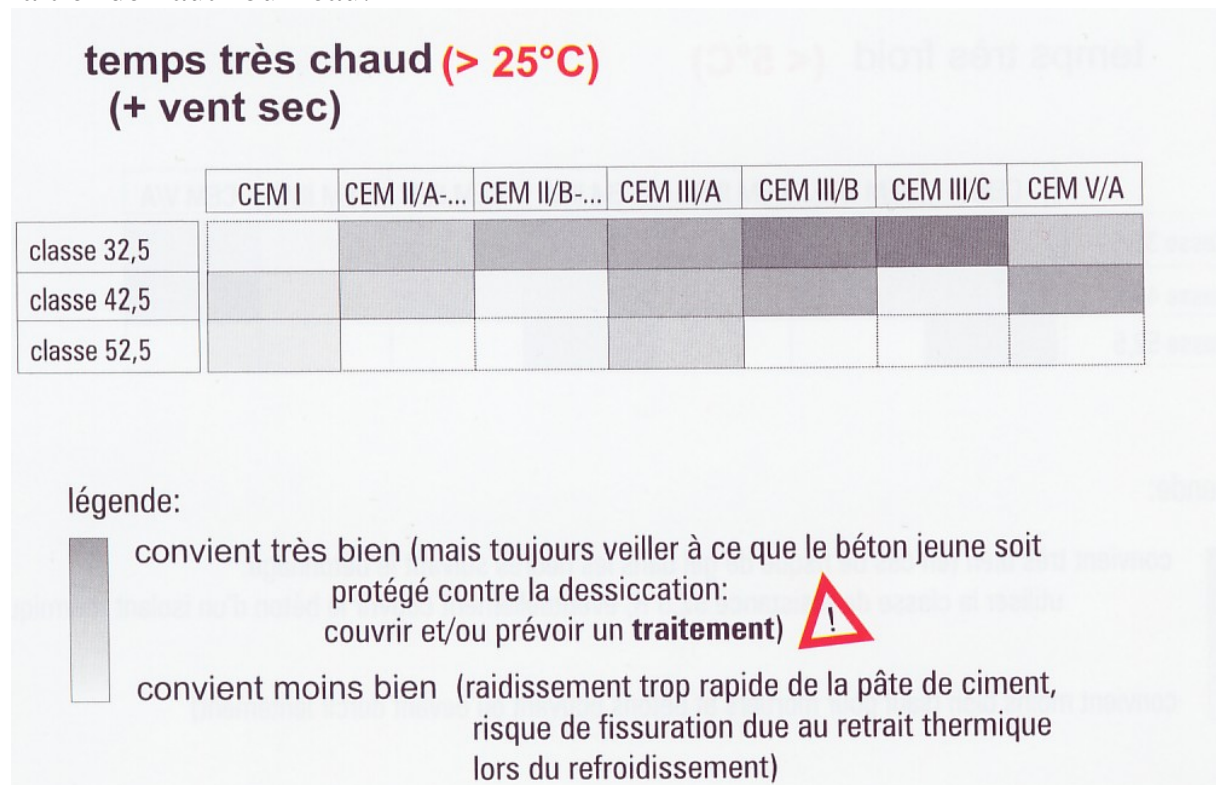


Fig.II.6 : Le choix d'un ciment dans un temps très chaud [3]

## V-FABRICATION, COMPOSITION ET DESIGNATION DES CIMENTS NORMALISES :

### 1. FABRICATION DU CIMENT PORTLAND :

On peut trouver presque partout les matières brutes nécessaires pour réaliser un ciment Portland de composition correcte et de haute qualité. Les sources de matériaux bruts destinés à la fabrication du ciment Portland doivent pouvoir fournir les deux principaux composants, calcaire (CaO) et silice (SiO<sub>2</sub>), et deux composants secondaires, alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Le calcaire provient ordinairement de la pierre à chaux, mais on peut également l'obtenir du corail, de la craie et de la marne.

La silice provient du sable ou de schistes, l'alumine de sables, schistes et bauxites, et l'oxyde de fer de l'un quelconque de ces matériaux suivant leur composition, ainsi que de sous-produits d'autres industries. Comme il est économique d'utiliser les matériaux disponibles, on y rencontre inévitablement des composés non nécessaires ou indésirables. Ils sont mieux connus sous le

nom de composants mineurs; ce sont la magnésie (MgO), les alcalis (Na<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O), et les oligo-éléments, tels que le phosphore, le titane et le manganèse.

On analyse et on proportionne séparément des matériaux bruts appropriés de manière à obtenir des scories de ciment qui présenteront la composition désirée lorsqu'on les cuira au four. Cette composition - la même dans le monde entier - est déterminée par la considération des propriétés de cuisson et de cimentation optimales, de solidité, et de qualité parfaitement saine. Après mélange en proportions convenables, les matériaux bruts sont écrasés dans des broyeurs à boulets; on analyse le mélange brut résultant et on le mélange intimement soit en présence d'humidité, soit à sec, avant cuisson au four. La cuisson est d'une grande importance parce que les recombinaisons chimiques qui se produisent à l'état de demi-fusion doivent être complètes, faute de quoi le ciment ne serait pas sain. Dans ce processus de cuisson, l'alumine et l'oxyde de fer agissent comme fondants et améliorent la qualité de la combinaison chimique.

Les scories produites sont broyées avec du gypse (ce dernier est ajouté pour régulariser les propriétés de prise) de manière à obtenir le ciment Portland. Le broyage constitue, avec le processus de cuisson, l'un des plus importants éléments du coût de fabrication. On utilise par suite très fréquemment des adjuvants du broyage qui permettent de réduire les frais et d'améliorer le degré de finesse.

Le ciment Portland finalement obtenu est anhydre. Pour qu'il conserve son pouvoir de liaison, on doit le protéger contre l'humidité et le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

## **2. COMPOSITION ET DESIGNATION DU TYPE DE CIMENT :**

Le Comité Européen de Normalisation (CEN) a publié une série de normes sur les ciments. La composition des ciments doit être conforme au tableau II-1 [3]. On y retrouve 4 types principaux de ciment.

Le tableau II-1 précise également les dénominations normalisées au niveau européen : CEM I, CEM II, CEM III, CEM V. Certaines sont encore précisées davantage par des lettres : CEM IIA, CEM IIB,...

A cet ensemble désignant le type de ciment, viennent encore s'ajouter des indications précisant la classe de résistance ou le comportement particulier afin de mieux répondre à des exigences mécaniques, physiques ou chimiques.

### **a) exigences mécaniques :**

On définit les exigences mécaniques normalisées. On peut ajouter des exigences supplémentaires concernant des résistances mécaniques au jeune âge. Les exigences mécaniques sont définies par des résistances en compression



(selon NBN EN 196-1) de mortier normalisé utilisant ce ciment comme liant. Les exigences sont données au tableau II-2 [3]. Ce tableau permet de définir des classes de résistance normale (1<sup>ère</sup> colonne du tableau) : 32,5 ; 42,5 ; 52,5 MPa. De plus, on peut formuler des exigences sur la résistance au jeune âge en ajoutant la lettre R aux chiffres cités précédemment (2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> colonne du tableau II-3 [3]).

#### **b) exigences physiques :**

Les ciments mis sur le marché doivent avoir des temps de prise conformes aux valeurs données au tableau II-2 lorsque cette propriété est mesurée selon la norme NBN EN 196-3

#### **c) exigences chimiques :**

La qualité des ciments doit aussi être vérifiée par des essais chimiques qui vont attester de leur conformité à la norme. Le tableau II-3 définit les analyses physico-chimiques à réaliser ainsi que les exigences à atteindre.

### **3. EXIGENCES COMPLEMENTAIRES :**

Outre les exigences classiques, un responsable de la fabrication d'un élément en béton peut exiger des propriétés complémentaires, par exemple :

- 1 pour se prémunir de l'attaque des bétons par les sulfates, il demandera un ciment à haute résistance chimique aux sulfates (ciment HSR) (High Sulfate Resistance) ;
- 2 pour se prémunir de la dégradation des bétons via une attaque de certains granulats siliceux par des alcalis (Na, K), il existe un ciment à basse teneur en alcalin (ciment LA) (Low Alkali) ;
- 3 pour se prémunir d'un dégagement thermique trop important lors de l'hydratation, il exigera un ciment LH (Low Heat) ;
- 4 pour des aspects esthétiques, il pourra exiger un ciment blanc (composé de matière de base peu colorée).

On peut avoir une désignation telle que : CEM I 42,5 R HSR LA

Il s'agit d'un ciment à base de clinker, de classe de résistance 42,5 ayant une résistance élevée au jeune âge et une haute résistance aux sulfates et une faible teneur en alcali.

Tableau II-1 : dénomination et composition des ciments normalisés  
(pourcentages en masse) [3]

	Désignation	Notation abrégée	Constituants principaux				Constituants Secondaires
			Clinker K	Laitier de haut-fourneau S	Cendres volantes Siliceuses V	Calcaire L	
I	Ciment portland	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
II	Ciment portland composé	CEM II/A-M	80-94	6-20			
		CEM II/B-M	65-79	21-35			
III	Ciment de haut-fourneau 36/65	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	0-5
	Ciment de haut-fourneau 66/80	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	0-5
	Ciment de haut-fourneau 81/95	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	0-5
V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	-	0-5

- 1) Les valeurs indiquées se réfèrent au noyau du ciment, à l'exclusion des sulfates de calcium et additifs.
- 2) Les constituants secondaires peuvent être du filler ou bien un ou plusieurs des constituants principaux, sauf lorsque ceux-ci sont incorporés en tant que constituants principaux du ciment.
- 3) Outre le clinker, les ciments II contiennent de 1 à 4 constituants complémentaires. La proportion de filler est limitée à 5%.
- 4) La nature et les pourcentages des composants principaux contenus dans un ciment portland composé de type II doivent être communiqués par le producteur sur simple demande de l'utilisateur.

Tableau II-2 : exigences mécaniques et physiques. [3]

	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )				Temps de début de prise (mn)	Expansion (mm)
	Résistance au jeune age		Résistance normale			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32.5	-	≥16	≥32.5	≤52.5	≥60	≤10
32.5 R	≥10	-				
42.5	≥10	-	≥42.5	≤62.5		
42.5 R	≥10	-				
52.5	≥10	-	≥52.5	-		
52.5 R	≥10	-				

Tableau II-3 : exigences chimiques. [3]

1	2	3	4	5
Propriétés	Essai de référence	Type de ciment	Classe de résistance	Exigence
Perte au feu	NBN EN 196-2	CEM I et III	Toutes classes	≤5.0%
Résidu insoluble	NBN EN 196-2	CEM I et III	Toutes classes	≤5.0%
Sulfate (SO <sub>3</sub> )	NBN EN 196-2	CEM I, II et V	32.5 32.5 R 42.5	≤3.5%
			42.5 R 52.5 52.5 R	≤4.0%
		CEM III	Toutes classes	
Chlorures	NBN EN 196-2	Tous types	Toutes classes	≤0.10%

- 1) Les exigences sont données en pourcentages en masse.
- 2) Le ciment de haut-fourneau (CEM III/C) peut contenir un maximum de 4.5% de SO<sub>3</sub>.
- 3) Les ciments de haut-fourneau de type III (CEM III/A, B et C) peuvent contenir plus de 0.10% de chlorures mais dans ce cas la teneur réelle en chlorures doit être déclarée.

## **VI-HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND :**

### **1. Théories de base de l'hydratation du ciment :**

Les composés principaux formés dans les scories de ciment Portland et qui confèrent les propriétés de prise et de résistance sont les silicates de calcium,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  et  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Lorsqu'on les mélange avec l'eau, ces composés anhydres s'hydratent et durcissent lentement en suivant le comportement bien connu du ciment Portland. L'aluminate tricalcique  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , qui se trouve dans les scories, forme aussi un hydrate avec l'eau; bien qu'il contribue aux propriétés de prise et de durcissement hâtif, il possède des propriétés indésirables que nous étudierons ultérieurement.

L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que les réactions de ses différents constituants se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et que celles-ci peuvent s'interférer (exemple : couplage thermique des réactions).

Comme le cas se présente pour la plupart des réactions chimiques, le taux d'hydratation, et par suite le gain de résistance, augmente en même temps que la température. On utilise souvent, spécialement par temps très chaud, un adjuvant retardateur pour modifier la durée de prise. Les adjuvants accélérateurs non seulement affectent la durée de prise du béton, mais aussi servent principalement à augmenter la vitesse de gain de résistance en accroissant la vitesse d'hydratation.

### **2. Théorie de la prise et du durcissement :**

Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température.

La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début du durcissement.

Deux théories cherchent à expliquer le phénomène de la prise:

-La théorie cristalloïdale de LECHATELIER, 1887.

-La théorie colloïdale de MICHAELIS, 1893.

#### **a)La théorie cristalloïdale :**

##### **La prise :**

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau.

La solution devient saturée et des sels hydratés cristallisent.

Comme la solubilité des sels hydratés est beaucoup plus faible que celle des cristaux anhydres, les sels hydratés précipitent sous forme de cristaux à partir de la solution sursaturée.

La solution restante, peut dissoudre de nouvelles particules anhydres.

### **Le durcissement :**

Après la prise, commence un phénomène de durcissement mécanique qui se développe par multiplication et par adhérence.

La nucléation et la croissance des cristaux sont fonction du degré de dissolution des phases anhydres (plus ça se dissout, et plus ça précipite et se cristallise).

### **b) La théorie colloïdale :**

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau. Les grains de ciment augmentent de volume (gonflement) et il y a apparition d'une solution très concentrée en chaux. La solution de chaux agit sur les silicates et donne naissance à un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) insoluble.

Cette masse gélatineuse augmente peu à peu de volume par absorption de la chaux. Le C-S-H devient dense et imperméable. La masse gélatineuse enferme les grains de ciment qui continuent à s'hydrater par succion de l'eau contenue dans le gel.

Le gel s'appauvrit en eau et ses résistances augmentent (explication de la prise sous l'eau). Le gel constitue une masse protectrice, durcissable et nourricière pour les grains de ciment.

### **3. Combinaisons hydratées des constituants des ciments portlands :**

- Quand le ciment portland réagit avec l'eau, il y a dégagement de chaleur qui peut être mesurée par le calorimètre à conduction thermique (isotherme).

- Donc, le dégagement de chaleur et ainsi l'évolution de l'hydratation pourront être suivis dans le temps.

Existence de trois pics - trois maximums de dégagement de chaleur ;

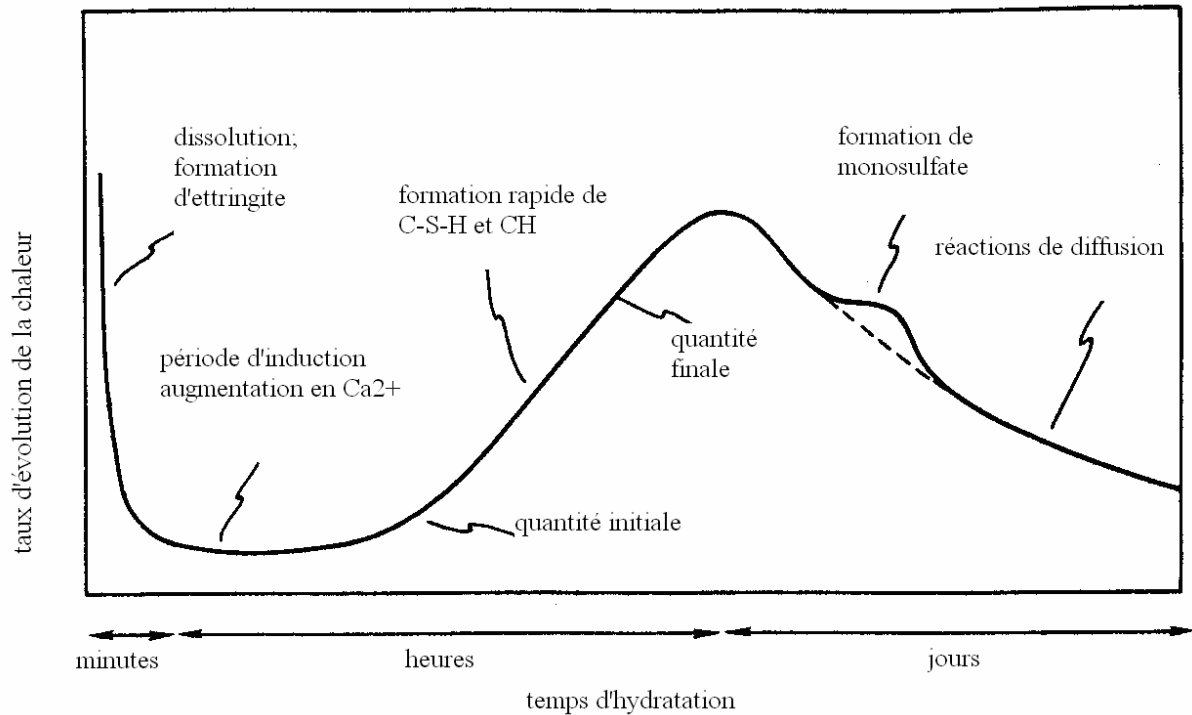


Fig.II.7 : Dégagement de chaleur au cours du temps [20]

### **Premier pic :**

C'est le plus haut, mais il est de courte durée. Il est suivi d'une « période dormante » dans laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul).

Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte.

Les phénomènes physiques et chimiques régissant cette phase (période dormante) sont du point de vue pratique très importants, car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton. Pour un rapport E/C = 0,5, on devra placer le béton dans la structure au plus tard au milieu de la "période dormante".

### **Deuxième pic :**

La « période dormante » prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur et de la prise du ciment. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20 °C) entre 9 heures et 10 heures.

### **Troisième pic :**

Ce ne sont pas tous les ciments qui présentent un troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre.

Pour comprendre les réactions qui se passent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances, il faut connaître :

- l'effet de l'hydratation de chaque phase du ciment sur la chaleur d'hydratation;
- les raisons des variations considérables du dégagement de chaleur dans le temps;
- le processus d'agglomération des produits d'hydratation pour remplir les espaces;
- la nature des liens entre les produits d'hydratation dans la pâte durcie.

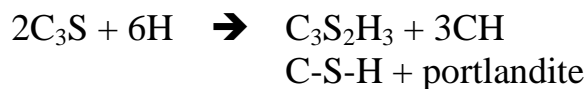
Notons bien que les réactions d'hydratation de toutes les phases de ciment Portland se passent en même temps et contribuent avec une intensité différente au dégagement de chaleur du ciment.

### ■ Hydratation du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S :

Le C<sub>3</sub>S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée.

La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à 1 année.

### Produits d'hydratation du C<sub>3</sub>S:



Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH).

### Silicate de calcium hydraté (C-S-H) :

La formule du C-S-H, donnée dans l'équation (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>) est approximative, car le produit est très peu cristallin, et il existe plusieurs variétés de C-S-H. Le C-S-H est le produit d'hydratation qui développe la résistance de la pâte de ciment.

Une partie des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance.

### Hydroxyde de calcium ou portlandite (CH) :

La portlandite participe aux résistances à très jeune âge.

## Cinétique de l'hydratation du $C_3S$ :

L'évolution de la réaction d'hydratation du  $C_3S$  est facilement contrôlable par calorimétrie à conduction.

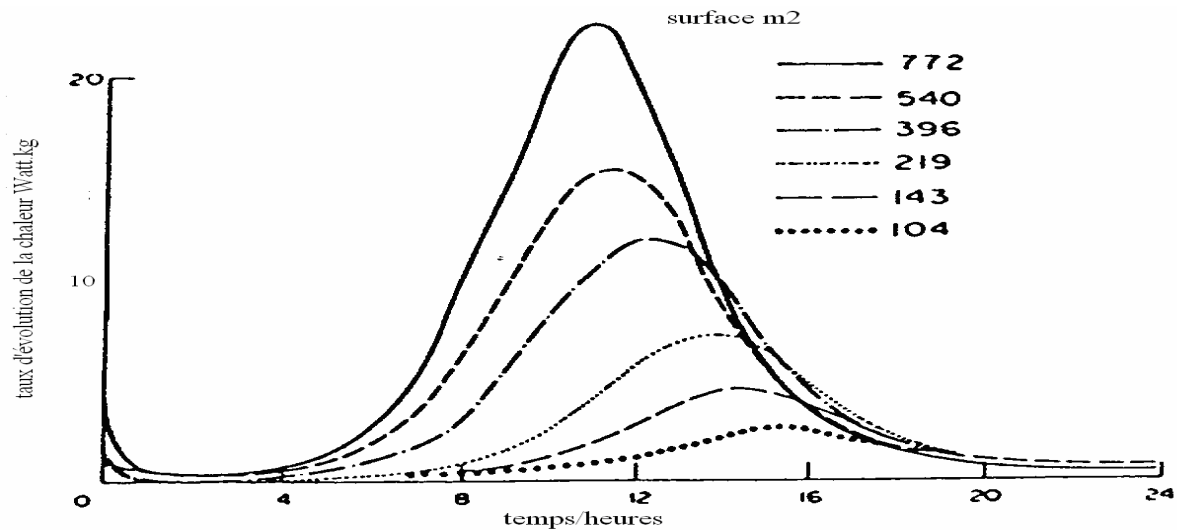


Fig.II.8: Hydratation de pâtes  $C_3S$  dans un calorimètre de la conduction; effet de région de la surface [20]

Comme pour le ciment portland, il y a un pic initial suivi par une "période dormante" qui se termine par l'apparition d'un pic majeur. Si nous comparons les deux courbes calorimétriques, nous remarquerons une relation entre les seconds pics du  $C_3S$  et du ciment. La différence peut s'expliquer par la présence dans le ciment de sulfates et d'alcalis. Ces derniers accélèrent d'ailleurs l'hydratation du  $C_3S$ .

L'intensité du 2ème pic de la courbe calorimétrique du ciment est surtout influencée par le  $C_3S$ .

## Mécanisme d'hydratation du $C_3S$ :

Deux mécanismes d'hydratation du  $C_3S$  sont proposés :

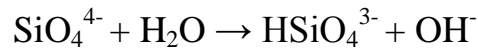
- L'hydratation à partir de la solution,
- L'hydratation « topochemique ».



### a) L'hydratation à partir de la solution :

Ce mécanisme est basé sur le principe de la formation de cristaux d'hydrates qui précipitent à partir de la phase dissoute.

La solution produite étant sursaturée en ions formant les produits d'hydratation, les produits d'hydratation précipitent alors. La vitesse de mise en solution du C<sub>3</sub>S dépendra de la formation et de l'augmentation de volume de ces cristaux.



### b) L'hydratation-topochimique :

Le fait que la silice est en général très peu soluble et présente en quantité importante dans le C-S-H, pousse à penser que le C-S-H se forme très près de la surface du cristal.

Le C-S-H se forme sur la surface du grain tandis que le CH est précipité à partir de la solution.

### Origine de la « période dormante » :

L'existence de la « phase dormante » est très intéressante dans la mesure où dans les réactions à l'état solide l'existence d'une phase d'accélération après une période de décélération est rare.

Il existe plusieurs théories à l'origine de la « période dormante ». Nous allons présenter les deux plus importantes.

**Théorie n°1:** Formation de deux couches de perméabilité différente.

Selon Stein et Stevels (1964), il y a d'abord formation d'une première couche de C<sub>3</sub>SH<sub>n</sub> imperméable, c'est le début de la « période dormante ».

Puis, la formation du C-S-H, plus perméable à l'eau termine cette période.

**Théorie n°2:** Rupture de la couche protectrice par l'effet de pression osmotique.

Dans ce mécanisme (Powers, 1961) il y a d'abord formation d'une couche qui permet le passage de Ca<sup>2+</sup> dans la solution et l'eau dans l'autre sens. La formation de C-S-H derrière cette couche va créer une pression qui provoquera la rupture de cette dernière.

### ■ Hydratation du silicate bicalcique $C_2S$ :



C-S-H + portlandite

### Produits d'hydratation:

Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH).

La formule du C-S-H donnée dans l'équation ( $C_3S_2H_3$ ) est approximative. La quantité de CH produite dans ce cas est plus faible d'un tiers que dans le cas du  $C_3S$ . La vitesse d'hydratation de b- $C_2S$  est beaucoup plus faible que celle du  $C_3S$ .

La faible quantité de CH va favoriser le développement de meilleures résistances que dans le cas du  $C_3S$ . Le b- $C_2S$  va surtout participer au développement des résistances après 28 jours.

Comme c'est dans le cas du  $C_3S$ , une partie des ions  $SO_4^{2-}$  provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance.

### ■ Hydratation de l'aluminate tricalcique $C_3A$ :

Le  $C_3A$  réagit avec l'eau pour former des produits cristallins de différents rapports C/A.



Les produits d'hydratation ( $C_4AH_{13} + C_2AH_8$ ) sont métastables par rapport à l'hydrogrenat ( $C_3AH_6$ ). À température plus élevée (30 °C), ils se transforment en  $C_3AH_6$ .

La chaleur d'hydratation du  $C_3A$  est suffisante pour transformer une petite quantité d'hydrates en  $C_3AH_6$ . La présence de chaux, comme dans le cas de l'hydratation du  $C_3S$  dans la pâte de ciment, favorise la formation de  $C_4AH_{13}$  et l'inhibition de  $C_6AH_6$ .

La formation de ces hydrates va très vite provoquer la solidification de la pâte de ciment.

Pour éviter cette "prise éclair", on ajoute du sulfate de calcium qui va jouer le rôle de retardateur de prise.

En présence de sulfate de calcium, le produit de l'hydratation est le trisulfoaluminate hexacalcique, appelé ettringite.

La formule de l'ettringite est souvent écrite comme ceci :

### Ettringite

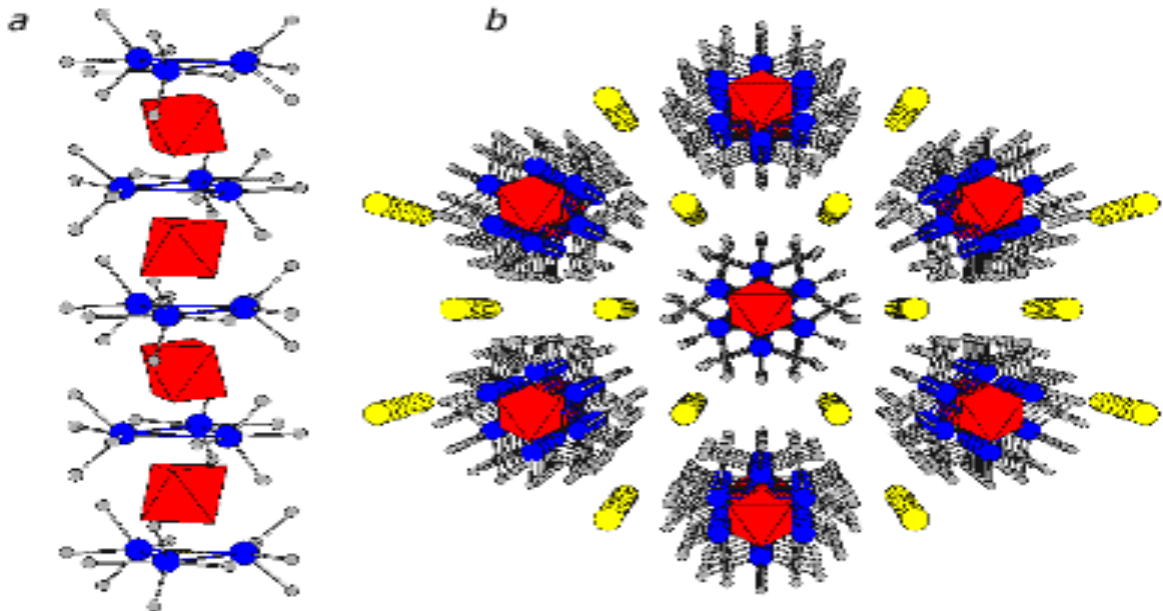


Fig.II.9: La structure du cristal d'ettringite [20]

La structure du cristal d'ettringite est construite de :

- (a) colonnes de  $(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6^{3-}$  octahedra (rouge),  $\text{Ca}^{2+}$  (bleu), et  $\text{H}_2\text{O}$  (gris).
- (b)  $\text{SO}_4^{2-}$  Et eau (jaune) s'est assis dans les canaux entre les colonnes.

Souvent la structure de l'ettringite incorpore différents ions, particulièrement  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ . C'est pour cela que l'on appelle aussi l'ettringite: AFt (t = trisulfate).

L'ettringite est un produit hydraté stable seulement dans le cas où le gypse est en quantité suffisante.

Quand le gypse est consommé et que le  $\text{C}_3\text{A}$  n'est pas complètement hydraté (généralement entre 8 h et 16 h dans les ciments), alors l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate tétracalcique  $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$  (Afm) (m:monosulfate).

La formule du monosulfoaluminate est souvent écrite comme ceci :  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$

Monosulfate,

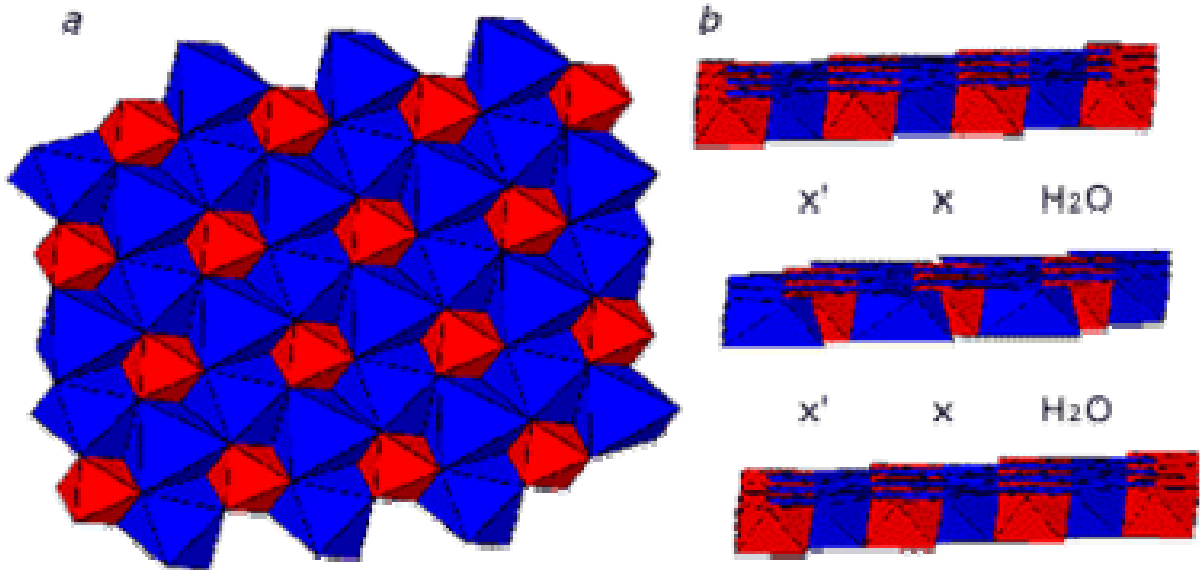


Fig.II.10: La structure du cristal de monosulfate [20]

La structure du cristal de monosulfate est construite au-dessus par:

- (a) draps de  $(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6^{3-}$  octahedra (rouge) et  $\text{Ca}(\text{OH})_6^{4-}$  octahedra (bleu).
- (b) anions (c'est à dire  $\text{SO}_4^{2-}$ ) et l'eau s'est assise entre les couches.

Après formation du  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$ , s'il reste encore du  $\text{C}_3\text{A}$ , alors le  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  se forme aussi.

Les deux étapes de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$  sont exothermiques.

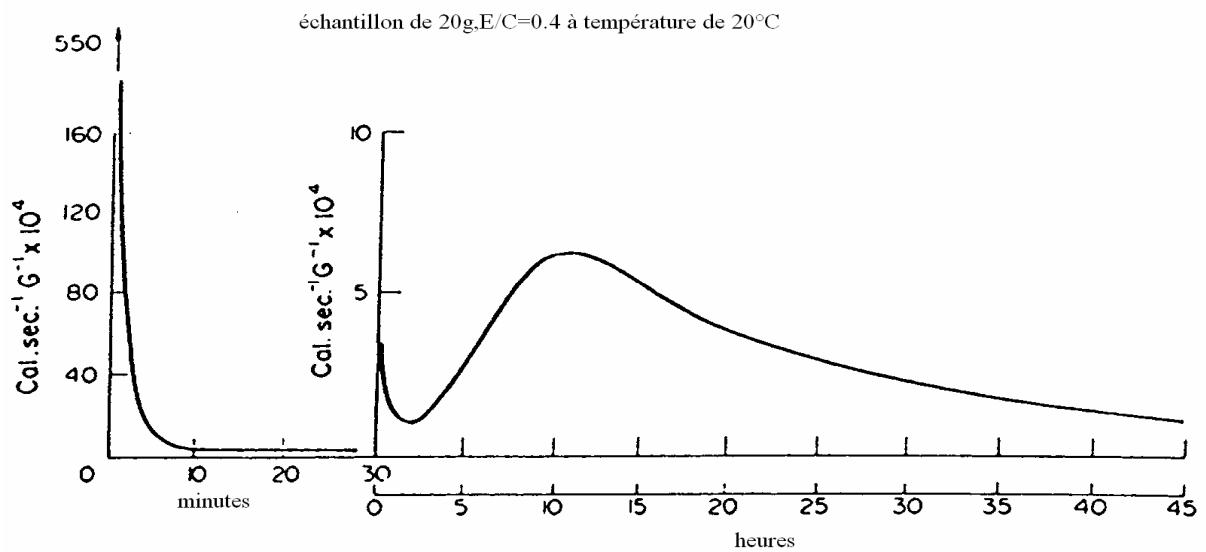


Fig.II.11: Les deux étapes de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$  [20]

## Mécanisme d'hydratation du $C_3A$ :

La formation de l'ettringite diminue l'hydratation du  $C_3A$  en formant une barrière de diffusion (« période dormante ») autour du  $C_3A$ , de façon analogue à celle qui est formée autour des grains de  $C_3S$  par le C-S-H.

Cette barrière une fois brisée lors de la formation du monosulfoaluminate, permet au  $C_3A$  de réagir plus rapidement. La courbe calorimétrique de l'hydratation du  $C_3A$  est semblable à celle du  $C_3S$ , quoique les réactions et le dégagement de chaleur soient différents.

Selon la teneur en gypse, l'hydratation du  $C_3A$  peut être plus ou moins retardée.

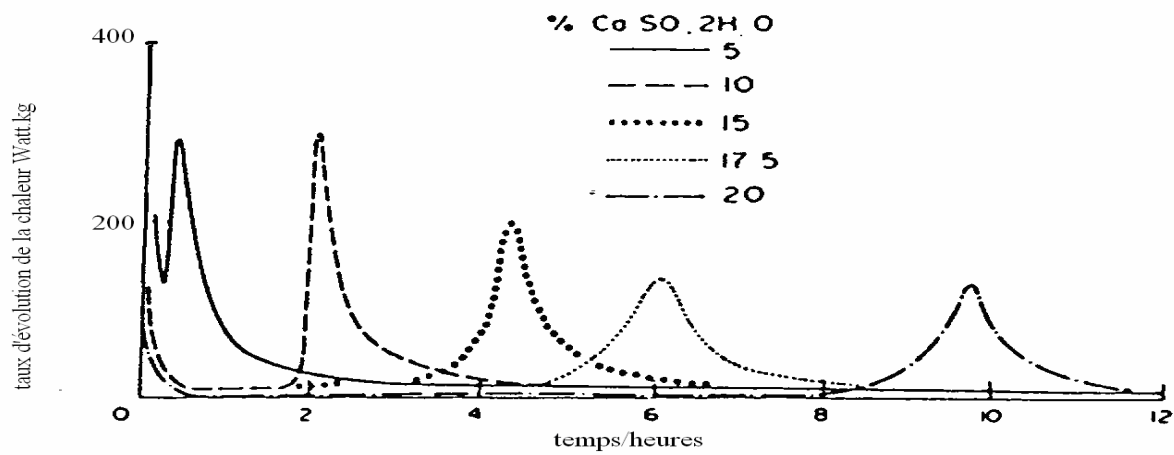


Fig.II.12: Mécanisme d'hydratation de  $C_3A$  [20]

Par ailleurs si la teneur en  $C_3A$  est supérieure à celle qui est nécessaire à la formation de l'ettringite, alors il y a apparition du 3ème pic dans la courbe calorimétrique par formation du  $C_4AH_{13}$ .

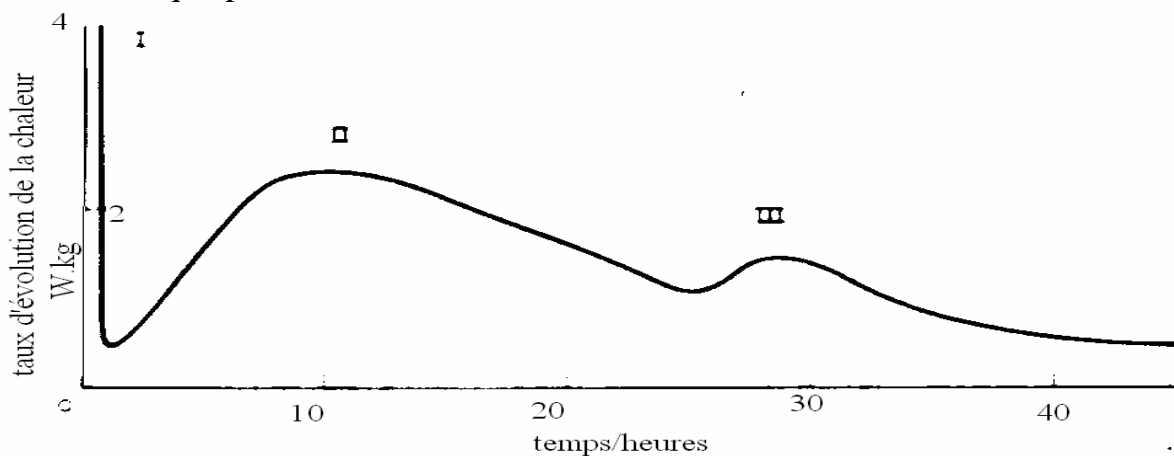


Fig.II.13: Apparition du 3ème pic dans la courbe calorimétrique [20]

## ■ Hydratation du ferroaluminate tétracalcique $C_4AF$ :

Les produits d'hydratation du ferroaluminate tétracalcique sont similaires à ceux du  $C_3A$ , avec les ions  $Al^{3+}$  partiellement remplacés par les ions  $Fe^{3+}$ .

Les réactions d'hydratation sont cependant plus lentes et entraînent moins de dégagement de chaleur.

Les ferroaluminates tétracalciques ne s'hydratent jamais assez vite, au point de causer la « prise éclair ».

En présence de chaux (comme dans le cas de l'hydratation du  $C_3S$  dans le ciment) elle s'hydrate pour former du  $C_4(A,F)H_{13}$

En présence de gypse, la phase ferrite produit de l'ettringite contenant du fer dans sa structure.

### **Remarque importante :**

Pour bien comprendre l'hydratation du ciment, il ne faut pas se baser uniquement sur l'hydratation des phases pures. Dans le ciment, quand ces phases réagissent, elles créent des interactions entre elles.

Regourd (1976) a trouvé dans la pâte hydratée un silicoaluminate. Dans le ciment, le soufre rentre dans la structure du C-S-H. L'hydratation du  $C_3S$  est accélérée par la présence de sulfates alcalins tandis que la chaux produite accélère l'hydratation du  $C_3A$  et  $C_4AF$ .

L'hydratation du  $C_3S$  contribue majoritairement à la formation du 2ème pic de la courbe calorimétrique de la figure II.7.

L'hydratation du  $C_3A$ , pour former de l'ettringite, participe aussi à la formation du 2ème pic. Si un 3ème pic apparaît, il y a alors un excès de  $C_3A$ .

A cause de sa faible chaleur d'hydratation, le  $C_4AF$  ne contribue que très peu à la formation du 2ème pic.

Les réactions qui se passent lors de la formation du 1er pic sont plus complexes, car au départ, toutes les phases réagissent rapidement avec l'eau avant que la concentration de la solution en ions sulfates soit assez importante pour influencer l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_4AF$ .

Si la quantité d'ions  $SO_4^{2-}$  en solution n'est pas suffisante, le  $C_3A$  va alors s'hydrater et donner lieu à la prise rapide, tandis que si la concentration en ions  $SO_4^{2-}$  est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise.

La « période dormante » prend fin avec une augmentation brusque de la quantité d'eau liée dans le C-S-H et dans l'ettringite.

L'enchevêtrement des produits d'hydratation entre les grains de ciment va augmenter les résistances mécaniques de la pâte et donner naissance à la prise.

## VII-INFLUENCE DU GYPSE SUR L'HYDRATATION :

La présence du gypse a un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment.

Lors de l'hydratation du ciment, les différentes phases s'hydratent différemment tout en s'influencent les unes des autres. Nous allons donc étudier l'effet du gypse sur l'hydratation de chaque phase principale et sur l'hydratation globale du ciment portland.

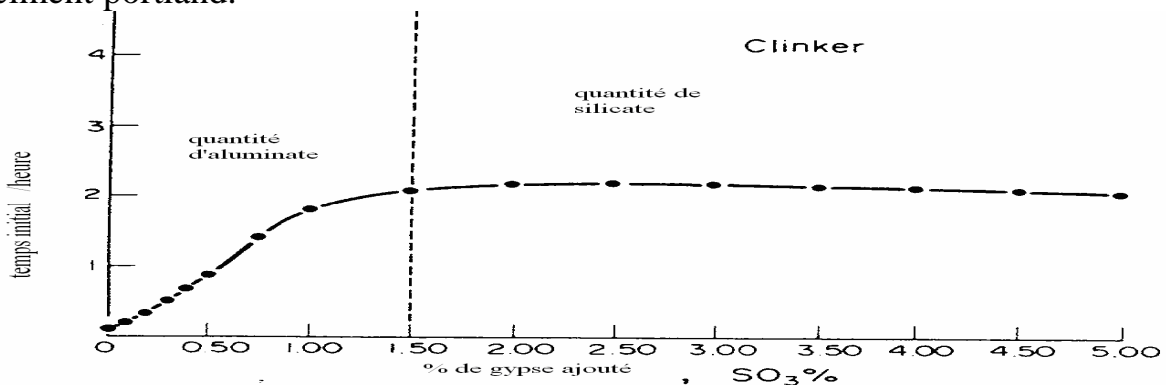


Fig.II.14: l'effet du gypse sur l'hydratation globale du ciment portland [20]

### 1• Hydratation du $C_3S$ et du $C_2S$ :

Dans le ciment hydraté, le  $CaSO_4$  a un effet sur le silicate de calcium hydraté (C-S-H).

Le  $CaSO_4$  affecte l'hydratation du  $C_3S$  dès le début de l'hydratation. La présence de gypse dans le ciment active le taux d'hydratation du  $C_3S$ .

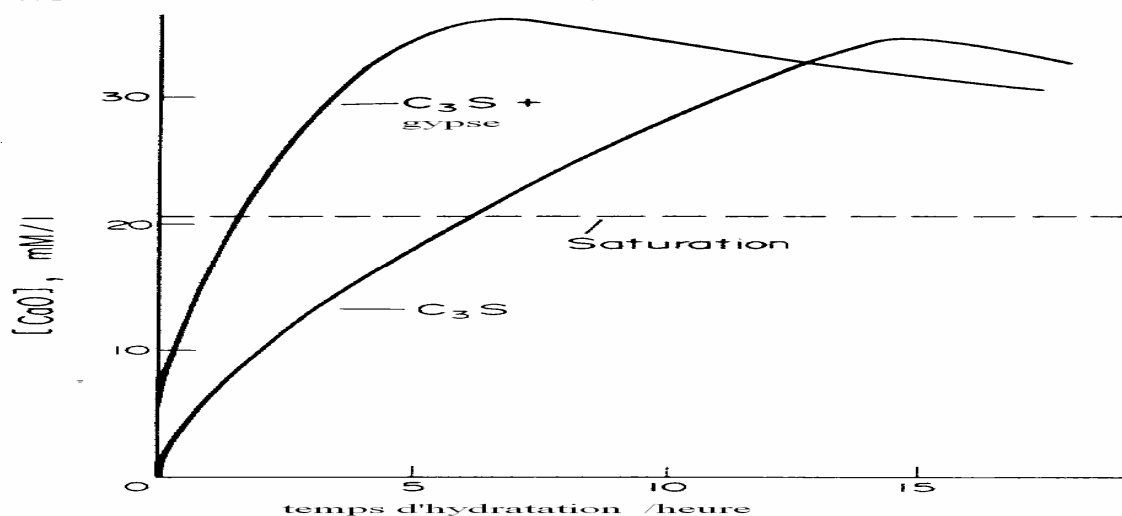


Fig.II.15 :L'influence de gypse sur l'hydratation du  $C_3S$  [20]

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, le gypse est consommé. Après 10h, il n'y a plus trace de gypse.

Sous la forme d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$ , le gypse rentre dans la structure du C-S-H. La quantité exacte d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  qui rentrent dans la structure du C-S-H n'est pas bien connue, mais elle est estimée à 80 % selon certains chercheurs (Mohan, Taylor).

Selon certains chercheurs (Odler), la liaison entre le sulfate de calcium et le C-S-H est si faible que l'on pense que le sulfate de calcium est absorbé sur la surface du gel de C-S-H.

La morphologie du C-S-H formé dans les premières minutes d'hydratation en présence de gypse est différente de la forme alvéolaire formée en son absence.

## 2• Hydratation du $\text{C}_3\text{A}$ :

Nous savons que le  $\text{C}_3\text{A}$  réagit avec l'eau en absence et en présence du sulfate de calcium selon les équations suivantes:



Ces réactions dépendent de la réactivité du  $\text{C}_3\text{A}$ , de la solubilité et de la vitesse de dissolution du sulfate de calcium utilisé.

Plus le  $\text{C}_3\text{A}$  est réactif, plus la vitesse de mise en solution et la solubilité du sulfate de calcium doivent être élevée pour que la réaction (2) soit favorisée, sinon la réaction (1) prédominera.

La réactivité du  $\text{C}_3\text{A}$  et le type de sulfate de calcium utilisé auront un effet direct sur la prise du ciment.

## VII-PRISE DU CIMENT :

La prise du ciment peut être définie comme étant l'état de la pâte de ciment quand elle perd sa plasticité.

Selon Locher, Richards et Sprung, après le mélange du ciment avec l'eau, une petite quantité de  $\text{C}_3\text{A}$ , réagit avec l'eau et le sulfate dissout. Ce processus s'arrête après quelques minutes, puis reprend après la phase dormante qui peut



durer quelques heures. Seule une petite quantité de  $C_3S$  participe à la réaction initiale.

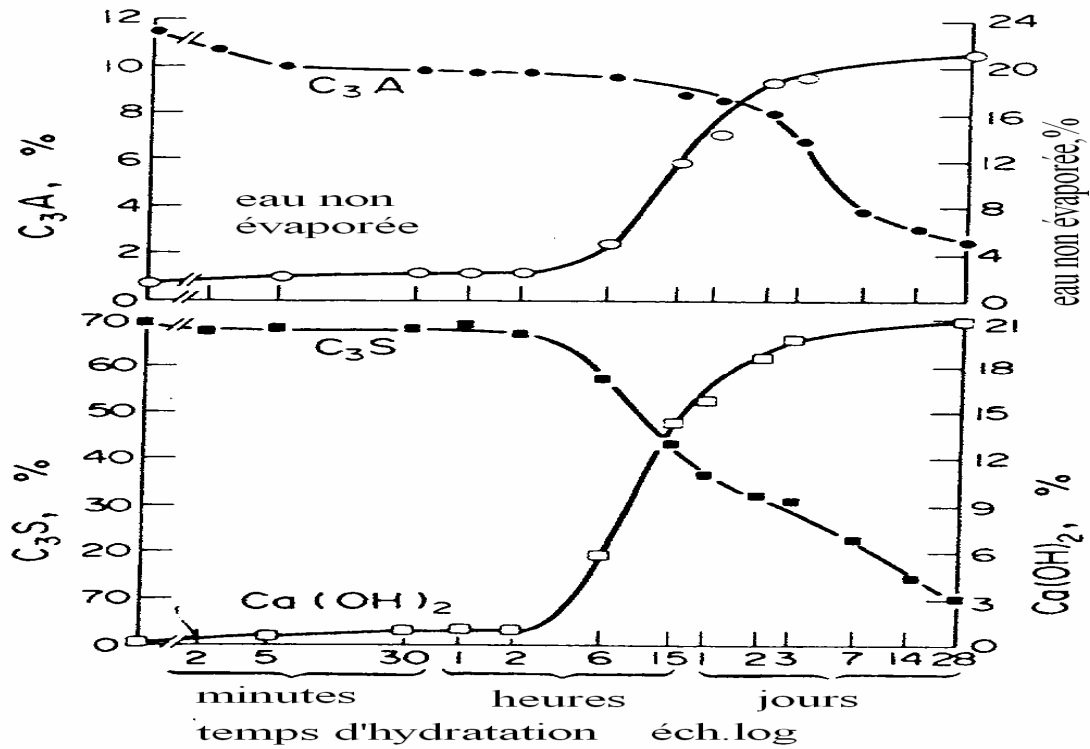


Fig.II.16 : Phénomène de prise de ciment [20]

L'addition du sulfate n'a d'effet ni sur la quantité de  $C_3A$  et de  $C_3S$  qui participent à la réaction initiale, ni sur le début de la phase dormante.

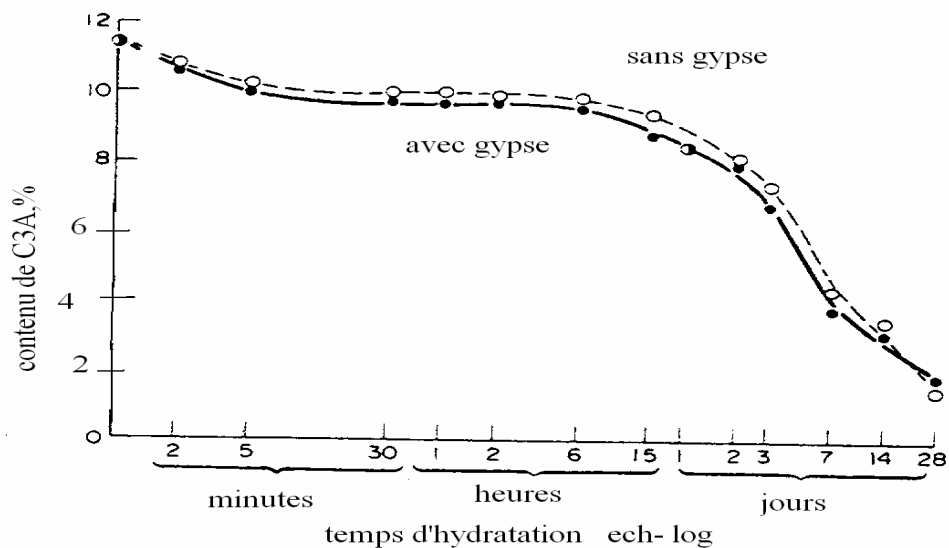


Fig. II.17: hydratation de  $C_3A$  avec et sans gypse [20]

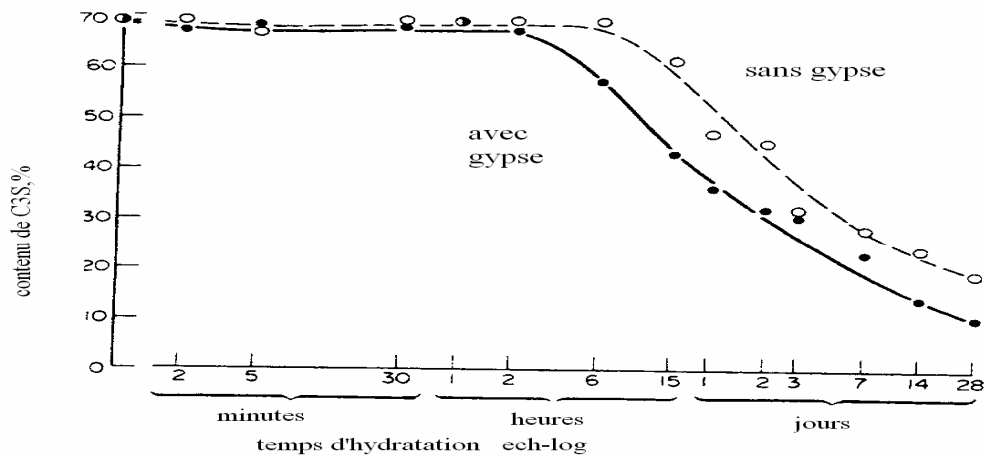


Fig. II.18: hydratation de C<sub>3</sub>S avec et sans gypse [20]

Donc l'effet retardateur du sulfate de calcium n'est pas basé sur l'inhibition des réactions chimiques, mais sur les produits de réaction avec ou sans sulfate.

Selon Bensted, le temps de *prise initiale* correspond à un niveau d'hydratation où les réactions chimiques sont assez avancées pour faire perdre une partie de sa plasticité à la pâte de ciment (surtout l'hydratation de l'alite pour former des CSH).

La perte totale de plasticité qui correspond à la *prise finale*, est expliquée par une telle formation de produits d'hydratation (C-S-H), que la mobilité de l'eau devient très difficile, à cause de la rigidité de la pâte.

Selon plusieurs chercheurs, le début de prise correspond à la fin de la période dormante, tandis que la fin de prise correspond au milieu de la période d'accélération.

### VIII-ANOMALIE DE LA PRISE :

Les anomalies dans la prise du ciment sont surtout dues à la nature des produits d'hydratation qui se forment au contact de l'eau avec le ciment. Ces produits sont surtout ceux de la réaction entre le C<sub>3</sub>A, l'eau et le sulfate. Cette réaction s'arrête après 10 minutes à 15 minutes, puis commence la phase dormante.

Pour avoir une prise normale, il faut que la quantité et le type de sulfate soient déterminés de manière à contrôler l'hydratation du C<sub>3</sub>A et ne former que de l'ettringite.



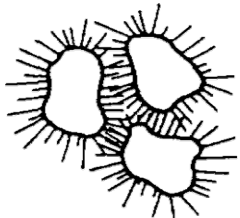
Si l'ajout de sulfate est inadéquat, il y aura formation de monosulfate.

Si par contre l'apport est trop important, il y aura précipitation du gypse secondaire. En présence de sulfates alcalins comme K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> il y aura formation

de syngénite  $[K_2.Ca(SO_4)_2.H_2O]$  sous forme de cristaux plats et allongés qui peuvent créer le même phénomène de fausse prise que le gypse secondaire.

**Cas n°1: Le  $C_3A$  n'est pas très réactif et il y a peu de sulfate en solution :**



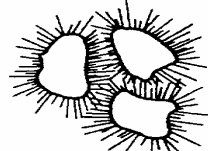
Tableau II.4 : Le  $C_3A$  n'est pas très réactif et il y a peu de sulfate en solution [20]

Clinker reactivity	Sulfate availability in solution	Hydratation time		
		10 min	1 hour	3 hours
		Ettringite recrystallization		
low	low	 ettringite coating Workable	 workable	 set

Après une courte période d'hydratation, de l'ettringite finement cristallisé se dépose sur les particules de ciment. Ces cristaux ne sont pas assez grands pour créer des ponts entre les particules. La prise est contrôlée pendant des heures.

**Cas n°2: Le  $C_3A$  est très réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution (cas où le gypse est transformé en hémihydrate dans le broyeur) :**

Tableau II.5 : Le  $C_3A$  est très réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution [20]


Clinker reactivity	Sulfate availability in solution	Hydratation time		
		10 min	1 hour	3 hours
		ettringite coating		
high	high	 Workable	 set	 set

Beaucoup d'ettringite se forme au départ. La quantité de gypse autour des particules est importante, mais insuffisante pour former des ponts entre les

particules. La quantité de particules d'ettringite est plus importante que dans le cas 1, leur enchevêtrement devient plus facile et la prise peut commencer avant le cas 1.

**Cas n°3: Le C<sub>3</sub>A est très réactif, mais il y a peu de sulfate en solution :**

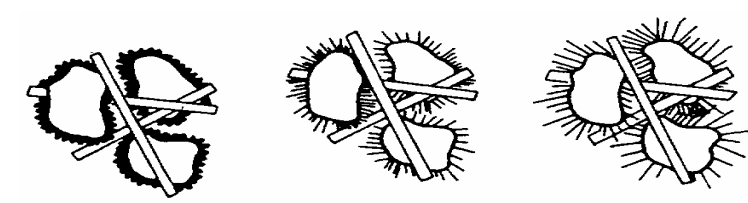
Tableau II.6 : Le C<sub>3</sub>A est très réactif, mais il y a peu de sulfate en solution [20]

Clinker reactivity	Sulfate availability in solution	Hydratation time		
		10 min	1 hour	3 hours
high	low	ettringite coating C <sub>4</sub> AH <sub>3</sub> and monosulfate in pores 		
		Set	set	set

Au début de l'hydratation peu d'ettringite se forme, tandis qu'il y a formation de monosulfate et d'aluminate tétracalcique. Cela se traduit par une prise rapide.

**Cas n°4: Le C<sub>3</sub>A est peu réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution :**



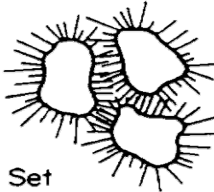


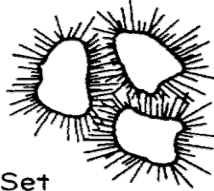
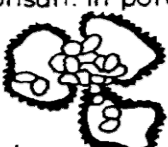

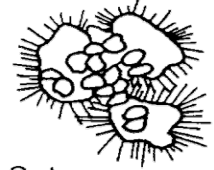

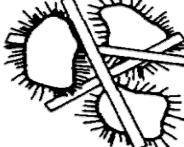
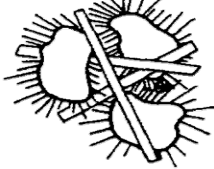
Tableau II.7 : Le C<sub>3</sub>A est peu réactif et il y a beaucoup de sulfate en solution [20]

Clinker reactivity	Sulfate availability in solution	Hydratation time		
		10 min	1 hour	3 hours
low	high	ettringite coating, secondary gypsum in pores 		
		Set	set	set

Il y a rapidement formation d'ettringite puis à cause du faible réactivité du C<sub>3</sub>A

le sulfate en solution va précipiter sous forme de gypse et donner naissance à la fausse prise.

Tableau II.8 : Diagramme de Löcher [20]

Clinker reactivity	Sulfate availability in solution	Hydration time		
		10 min	1 hour	3 hours
		Ettringite recrystallization →		
Low	Low	Ettringite coating  Workable	 Workable	 Set
High	High	Ettringite coating  Workable	 Set	 Set
High	Low	Ettringite coating, $C_4AH_3$ and Monsulf. in pores  Set	 Set	 Set
Low	High	Ettringite coating, secondary gypsum in pores  Set	 Set	 Set

## IX-REPRESENTATION TRIANGULAIRE DES CONSTITUANTS DU CIMENT :

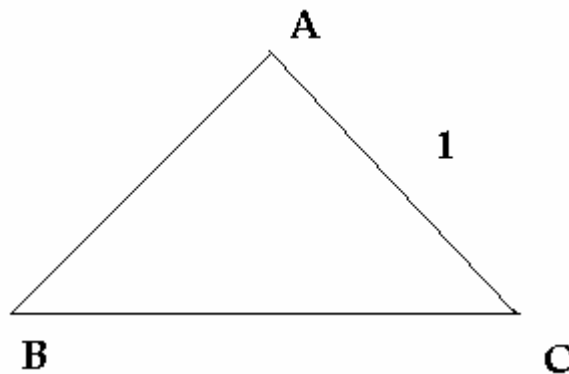
Un clinker de ciment Portland contient essentiellement 4 oxydes métalliques (principaux):

- L'oxyde de calcium  $CaO$
- L'oxyde de silicium  $SiO_2$
- L'oxyde de d'aluminium  $Al_2O_3$
- L'oxyde de fer  $Fe_2O_3$
- Si on ne considère pas l'élément fer, pour simplifier le problème, en remarquant que le raisonnement n'est pas faussé car le fer joue le même

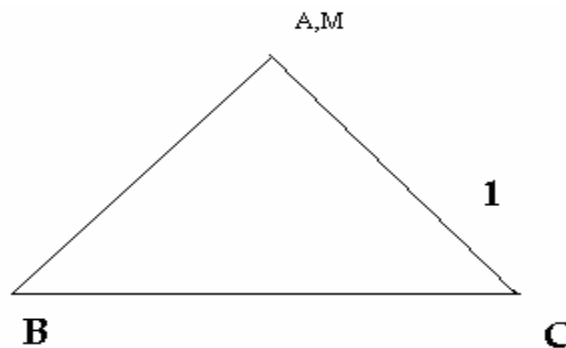
rôle que l'alumine, on a donc 3 constituants principaux: la chaux, la silice, et l'alumine.

- On convient de représenter l'ensemble de ces 3 valeurs par un point M du plan.
- Pour respecter la symétrie entre ces 3 variables, on adopte une représentation triangulaire.

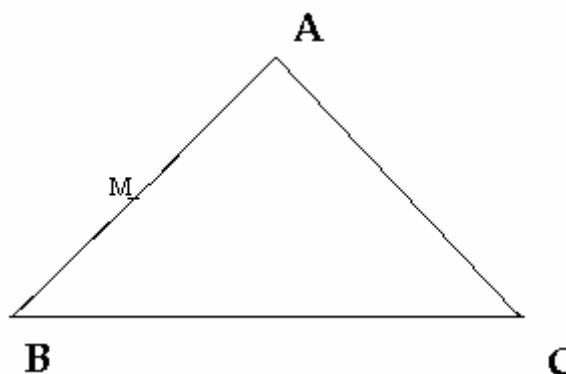
On considère un triangle équilatéral de côté unité (1).



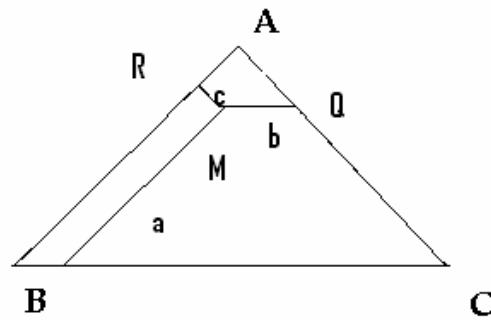
- Lorsque le clinker ne contient qu'un seul constituant, le point M sera au sommet du triangle.



- Si le clinker contient 2 constituants, le point M sera sur un côté du triangle.



- Si le clinker contient les 3 constituants, le point M sera à l'intérieur du triangle.



Nous pouvons maintenant travailler sur un diagramme triangulaire équilatérale dont chacun des sommets correspond 100% de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ce diagramme établi par Rankin en 1916 au laboratoire de Géographie du Carnegie Institute de Washington a nécessité plus de 7000 mesures.[10]

L'expérience montre que l'on obtient des ciments Portland aux performances satisfaisantes (aux points de vu temps de prise, croissance des résistances, coût de fabrication, etc.) lorsqu'on a : [10]

$$2\% < C_3A < 16\%$$

$$C_2S < 60\% \text{ et } C_3S < 70\%$$

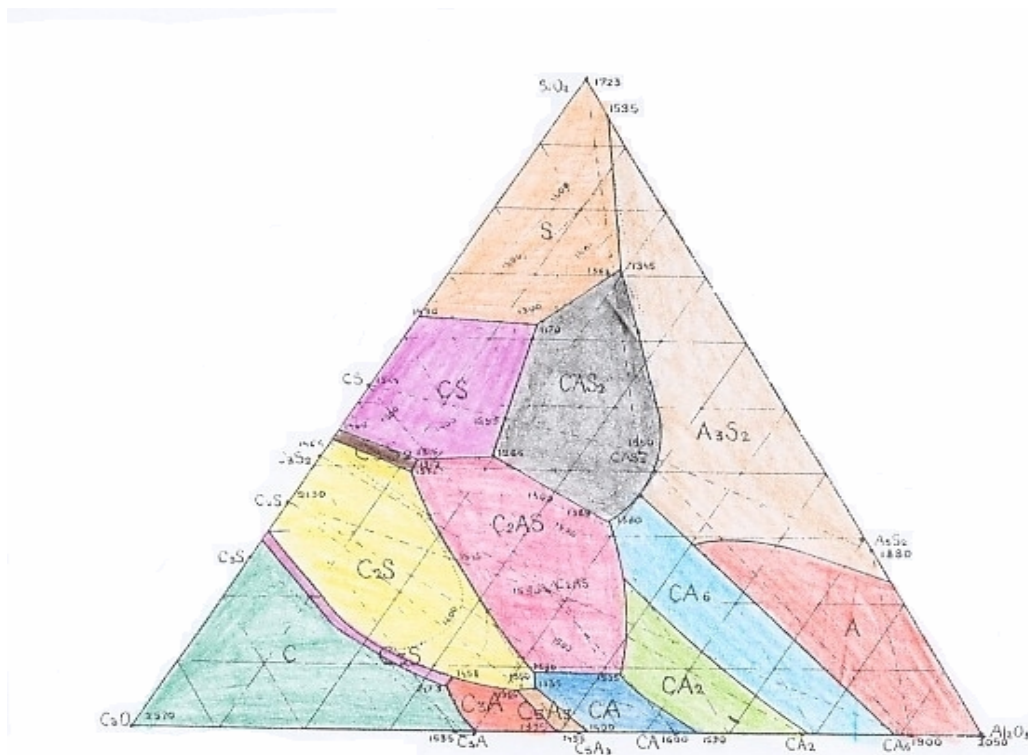


Fig.II.19 : Diagramme de Rankin (1916) [10]

D'une autre manière, le clinker est un mélange artificiel et ses oxydes peuvent être dosés en quantités optimales de manière à saturer en chaux (CaO) les oxydes acides ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Il en résulte une composition aux tolérances assez strictes, titrant environ : [23]

65 % en CaO

20 % en  $\text{SiO}_2$

10 % en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Tous les matériaux utilisés dans la fabrication du ciment pour leur potentiel hydrauliques ou pouzzolaniques peuvent aussi être représentés dans ce diagramme triangulaire.

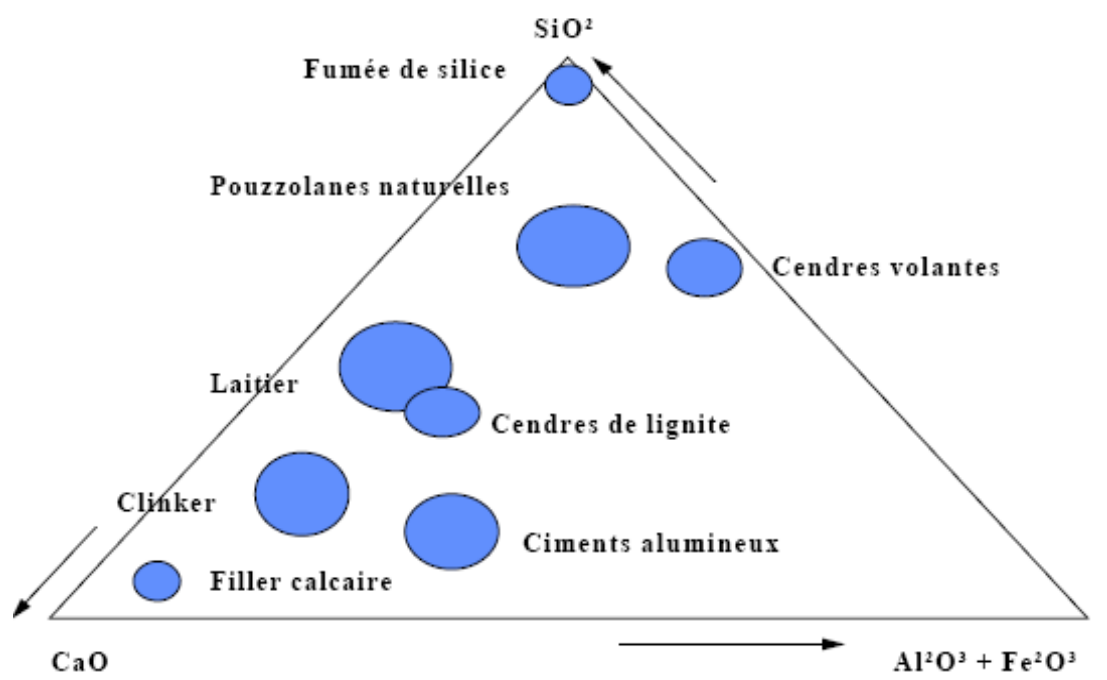


Fig.II.20 : Diagramme de Rankin à trois phases pour additions sélectionnées [23]



# CHAPITRE III

## LES COFFRAGES

### **I-INTRODUCTION :**

Les coffrages sont les formes en bois ou en métal, récupérables en tout ou partiellement, dans lesquelles on coule le béton à son emplacement définitif. Les moules sont presque toujours métalliques et servent aux moulages multiples des pièces préfabriquées. La poussée évolue de la pression hydrostatique jusqu'à une pression nulle après quelques heures ou quelques jours.

Lorsque le béton est suffisamment durci pour résister par lui-même à son poids propre et aux sollicitations extérieures, on peut décoffrer, cependant, il faut parfois encore maintenir la surface du béton humide pour que l'hydratation puisse se poursuivre convenablement (cure).

Un coffrage joue deux rôles bien distincts :

- Un rôle mécanique fixant les limites de la pièce en béton ;
- Un rôle de contact définissant l'état de surface du béton ;

### **II-CONDITIONS À REMPLIR PAR LES COFFRAGES :**

Les coffrages doivent satisfaire aux conditions suivantes :

1. être très rigides pendant la période de prise et de début du durcissement du béton sous la poussée exercée par celui-ci et lors de variations thermiques ;
2. ne pas attaquer le béton, ni être attaqués par ce dernier ;
3. être étanches au béton pour éviter toute perte de laitance ;
4. ne pas adhérer au béton, afin de permettre le démoulage, sauf dans le cas de coffrages perdus ;
5. avoir une résistance de surface suffisante pour ne pas être défoncés au cours de la mise en place des armatures et du béton, puis au cours de la vibration ;

### **III-LES DIFFERENTS TYPES DE COFFRAGES :**

La technologie est en pleine évolution ; il existe de nombreuses variétés de coffrages : il vont du traditionnel au particulier, peuvent être simples ou complexes, fixes ou mobiles.

#### **a) Coffrages traditionnels en pièces de bois assemblées par clouage :**

Ce coffrage est fait de pièces de bois naturel, rabotées ou non, découpées suivant les besoins, et très partiellement récupérables, c'est le système le plus ancien, utilisé depuis le début du siècle. Les pièces de bois sont assemblées par clouage, ligatures de fils d'acier et éventuellement des tiges filetées. Ce type de coffrage est particulièrement adapté à la réalisation de pièces de forme

compliquée. L'aspect de surface est à l'image des planches non rabotées les plus souvent utilisées : il est rugueux et irrégulier.



Fig.III-1 : Coffrage traditionnel en bois [3]

Les coffrages traditionnels sont de plus en plus souvent remplacés par des systèmes de coffrages industriels. Ceux-ci sont réglables et moins déformables, ils demandent moins de main d'œuvre et d'étaieage; ils entraînent moins de déchets et peuvent être réutilisés.

#### **b) Coffrages en contreplaqué :**

Les éléments contreplaqués en bois résultent de l'assemblage de feuilles de bois sous presse et à haute température au moyen de colles spéciales qui permettent d'obtenir des panneaux de grandes dimensions, présentant, après traitement, une surface lisse et durcie. Ils sont très stables en présence d'eau à cause d'un traitement hydrofuge et du système de fabrication. Ils peuvent être réutilisés un grand nombre de fois. Ils sont employés dans les voiles pour ouvrages aériens, tels que les murs et les planchers.



Fig.III-2 : Coffrage de mur au moyen d'éléments en bois contreplaqué [3]

### c) Coffrages métalliques :

Les coffrages métalliques sont des moules articulés réalisés en acier ou en alliage à base d'aluminium et de magnésium (pour éviter la corrosion de l'aluminium par le ciment). Ils sont constitués de panneaux séparés généralement raidis, assemblés sur chantier pour former des ensembles parfois supportés par une charpente rigide. Leur mise en place est rapide. Ils peuvent être vibrés par l'extérieur. L'aspect de surface est adaptable aisément.

On peut également trouver des coffrages métalliques pour la fabrication de dalles de plancher alvéolées.

On peut utiliser ces coffrages dans des différents domaines tels que :

- les grands parements et les éléments de forme standardisée permettant leurs utilisations successives, répétées suffisamment pour amortir leur coût.
- les petites pièces en grand nombre.



Fig.III-3 : Coffrages métalliques [3]

### d) Coffrages spéciaux :

- Coffrages grilles, dans le cadre de la mise en place du béton projeté.
- Coffrages chauffants, pour éviter le gel et accélérer, la vitesse de durcissement, en incorporant dans le coffrage des tuyaux d'eau chaude.
- Coffrages gonflables, pour divers éléments, dont les canalisations en béton exécutées in situ.
- Coffrages essorants, qui permettent le départ de l'air et l'excès d'eau de la peau de béton, permettant l'obtention d'une couche de surface de meilleure qualité.

### e) Coffrages mobiles :

Lorsque l'ensemble des éléments en béton est important, on travaille par étapes ou progressivement en continu, pour des raisons d'économie de coffrages, de limitation des poussées du béton frais, de bon remplissage des coffrages.

Lors de la progression par étapes, le coffrage est démonté après durcissement suffisant du béton et est reconstruit ou déplacé. Les joints de reprise doivent contenir des barres d'attente pour assurer la continuité de la transmission des efforts de traction et être maintenus rugueux et irréguliers pour assurer la meilleure continuité ; ils constituent cependant souvent une source de défauts mécaniques et esthétiques.

La progression en continu est intéressante pour les pièces très élancées à section constante ou peu variable. Dans ce procédé, il n'y a évidemment pas de joints de reprise. On distingue les pièces verticales et les éléments horizontaux :

- pour les pièces verticales (silos, noyaux d'immeubles à étages multiples, cheminées, piles de pont, tours de refroidissement, murs,...), le coffrage est le plus souvent hissé en prenant appui sur les barres d'armatures ou sur des tiges filetées noyées dans le béton. La vitesse de progression est adaptée à la vitesse de durcissement du béton ;
- pour les pièces horizontales (murs de soutènement, mur de sécurité routière,...), le coffrage est porté et entraîné par un véhicule sur rails, chenilles,... La vitesse du béton à consistance sèche, qui nécessite alors un serrage ultra puissant.



Fig. III-4 : Coffrage à progression verticale continue [3]

## f) Coffrages perdus :

Les coffrages perdus ou les coffrages non récupérés restent incorporés dans la construction après le durcissement du béton. Les éléments en béton préfabriqué sont les coffrages perdus les plus utilisés. Les formes en matière synthétique servent d'isolation thermique et/ou rendent la construction plus légère.

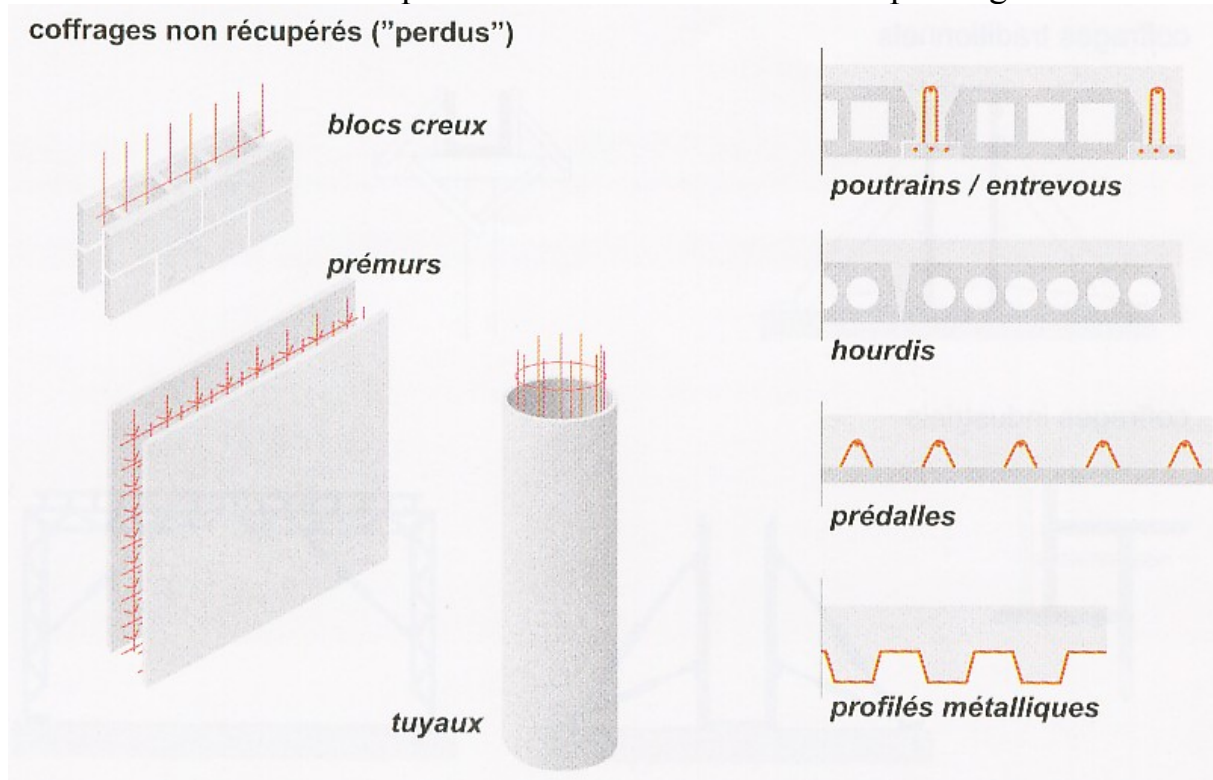


Fig. III-5 : Coffrage perdu [3]

## g) Coffrages glissants :

Lorsqu'un mur a une certaine hauteur, on peut le réaliser par la technique du coffrage glissant.

Ce procédé permet un bétonnage en continu, à l'aide d'un coffrage spécial qui prend appui sur les couches inférieures de béton dont la prise est suffisamment avancée.

Principe d'un coffrage glissant vertical. Pendant le coulage du béton, les parois du coffrage montent lentement dans un mouvement continu. Il n'y a donc pas de joints de reprise.

Dans le cas d'un coffrage glissant, la vitesse de bétonnage peut atteindre 6m par 24h. Les exigences en termes de rythme d'approvisionnement et d'ouvrabilité du béton sont toutefois très strictes.

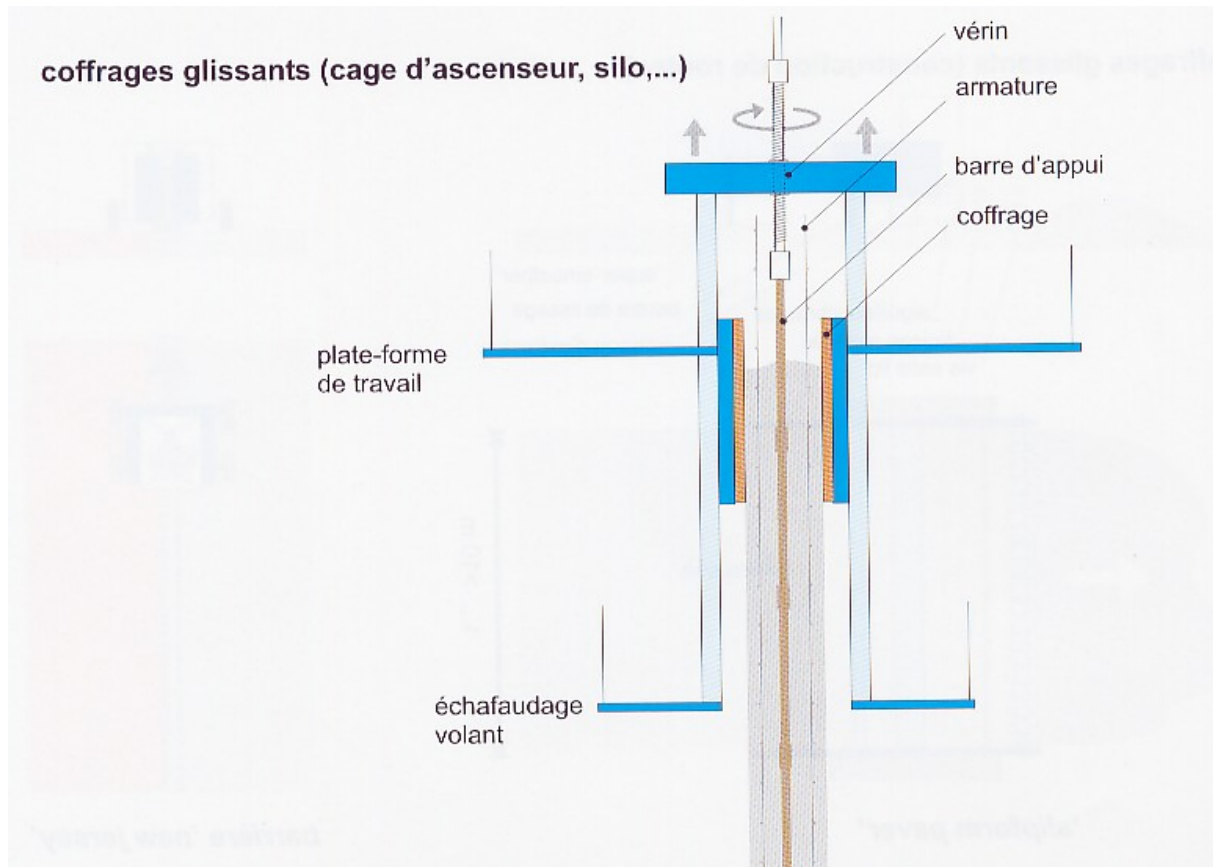


Fig. III-6 : Coffrage glissant [3]

#### IV-PRESCRIPTIONS GENERALES RELATIVES AUX COFFRAGES :

##### 1. Résistance des coffrages :

Les coffrages, étaonnages et échafaudages doivent être tels que les contraintes qui s'y produisent sous l'action des sollicitations qu'ils auront à supporter pendant l'exécution du travail jusqu'au décoffrage ou au décintrement, ne dépassent pas les contraintes de sécurité des coffrages. Il y a lieu de considérer les sollicitations de poids mort du béton et du coffrage, de poussée du béton frais notamment lors de la vibration, de chocs lors du coulage du béton, de circulation du personnel et des engins éventuels, de stockage de matériels et matériaux, de l'effet du vent,...

##### 2. Rigidité des coffrages et contre-flèches :

Les déformations que peuvent subir les coffrages ne peuvent dépasser celles généralement adoptées pour les constructions permanentes pour éviter les fissurations des pièces en béton.

Il faut aussi prévoir des contre-flèches suffisantes, en tenant compte de la déformation des coffrages lors du bétonnage et aussi de la contre-flèche nécessaire lors de la mise en charge de la construction.

Des dispositions doivent être prises pour que le coffrage n'empêche pas le retrait du béton, ce qui créerait des fissures avant même le décoffrage. Il faut aussi évidemment concevoir des formes de pièces peu susceptibles aux fissures de retrait.

### **3. Etanchéité des coffrages :**

Les coffrages doivent présenter une étanchéité suffisante pour éviter toute perte de laitance susceptible de se produire lors du coulage et surtout lors de la vibration.

Les pertes de laitance provoquent la formation de nids de cailloux et la chute de résistance du béton.

L'étanchéité entre les éléments du coffrage et entre le coffrage et les parties d'ouvrage déjà coulées peut être assurée par des bondes adhésives ou mieux par des cordons compressibles.

L'humidification des planches empêche que le coffrage n'absorbe l'eau de gâchage. De même, elle fait gonfler le bois avant le coulage, ce qui réduit le risque de fuite de laitance et de déformation des planches pendant le coulage.

### **4. Ouvertures de contrôle et de serrage :**

Lorsque les pièces de grande hauteur telles que les voiles et les colonnes sont coffrées en une fois, on laisse dans les parois latérales des coffrages des ouvertures de dimensions suffisantes permettant la vibration des couches inférieures.

Les ouvertures, dont l'espacement tant en hauteur qu'horizontalement ne doivent dépasser 1m, ne sont à fermer que lorsque le bétonnage arrive à leur niveau.

### **5. Sécurité du personnel sur le plan de travail :**

Les éléments de coffrage doivent être équipés de dispositifs nécessaires à la sécurité de la main d'œuvre pendant les diverses opérations du cycle de bétonnage (manutention et stockage).

Ces dispositifs (passerelles, béquilles, vérins, etc.) non seulement assurent la sécurité sur le plan de travail mais ils améliorent les rendements.

## 6. Mise en place des coffrages :

La mise en place des coffrages doit être suffisamment précise pour que l'ouvrage réalisé ait les dimensions prévues avec les tolérances suivantes :

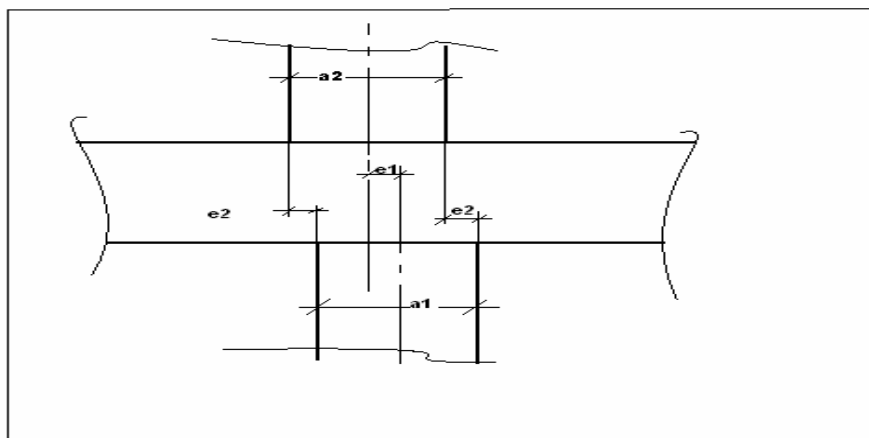
-tolérance relative à un niveau :

La tolérance admise sur la distance entre deux murs est de  $\pm 2\text{cm}$ . [21]

Cette tolérance est de  $\pm 1\text{cm}$  pour les épaisseurs des murs. [21]

-l'écart d'implantation des parois à parements verticaux ayant même plan axial :

L'écart d'implantation  $e_1$  maximal mesuré horizontalement entre la trace sur leur plancher commun des plans axiaux de deux murs superposés ne doit pas dépasser  $1/15$  de l'épaisseur de mur le moins épais, avec un maximum de  $3\text{cm}$ . [21]



$$\begin{aligned} a &= \text{Min}(a_1, a_2) \\ e_2 &\leq 2\text{cm} \\ e_1 &\leq a/15 \\ e_1 &\leq 3\text{cm} \end{aligned}$$

Fig. III-7 : l'écart d'implantation des parois à parements verticaux [21]

En outre l'écart maximal  $e_2$  mesuré horizontalement entre les traces des plans des parements des murs de part et d'autre d'un plancher ne doit pas dépasser  $2\text{cm}$ . (Figure III-7)

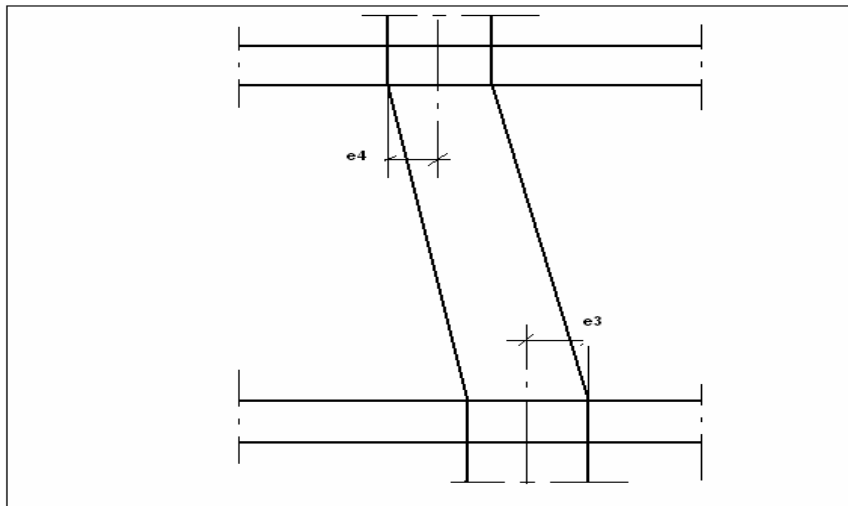
-cumul des écarts sur la hauteur d'un mur :

Aucun point du plan axial d'un mur ne doit s'écarter de plus de  $6\text{cm}$  (distance mesurée horizontalement) de son tracé théorique sur plan. [21]

-écart sur la verticalité du parement d'un mur sur une hauteur d'étage :

Cet écart ne peut dépasser  $2\text{cm}$ . (Figure III-8)





$$(e_3, e_4) \leq 3\text{cm}$$

Fig. III-8 : l'écart sur la verticalité du parement d'un mur [21]

### V-PRODUITS ANTI-ADHERANTS :

La pâte de ciment est, par définition, une colle pour les granulats ; elle adhère également très bien à l'acier. Il faut donc utiliser des produits anti-adhérent, qui vont permettre à la fois d'obtenir le fini de surface désiré et de récupérer le coffrage en évitant qu'il ne soit trop altéré.

On distingue les huiles minérales et végétales, brutes ou en émulsion, éventuellement adjuvantées par un agent tensioactif réduisant le bullage ; elles sont appliquées au chiffon ou par pulvérisation, à la brosse pour les émulsions. Si l'aspect du parement décoffré ne présente pas d'importance au point de vue esthétique, on peut utiliser n'importe quel type d'huile ; si par contre le parement doit être propre ou si l'on utilise du ciment blanc, il faut employer des huiles purifiées et en quantités judicieuses.

### VI-DELAIS DE DECOFFRAGE :

Le décoffrage ne peut être réalisé que si le béton a atteint une résistance suffisante pour pouvoir résister aux sollicitations de poids propre ; de façon à limiter les risques de déformations différées excessives.

En fonction de la résistance caractéristique prescrite pour le béton et de la résistance minimale requise au moment du décoffrage, il est possible d'évaluer le délai de décoffrage, tenant compte du type de ciment utilisé et de la température réelle de durcissement du béton.

Les produits de décoffrage empêchent que le béton n'adhère au coffrage. Les barres d'armature doivent rester affranchies de tout produit de décoffrage. Les coffrages seront donc traités avant la mise en place des armatures.

# CHAPITRE IV

## ACTON DU BÉTON FRAIS SUR LES COFFRAGES

### I-INTRODUCTION :

Le comportement rhéologique du béton frais une fois mis en œuvre dans le coffrage est très peu connu. La première question qui se pose concerne le niveau de pression qu'exerce le béton frais sur le coffrage. Rares sont les résultats expérimentaux sur le profil de pression que l'on peut trouver dans la littérature.

Par ailleurs la poussée du béton frais sur les coffrages horizontaux n'a pas à être prise en compte ; le béton n'intervenant dans ce cas qu'avec son poids propre. Mais cette poussée est très importante dans le cas des coffrages pour éléments verticaux tels que les murs et les poteaux.

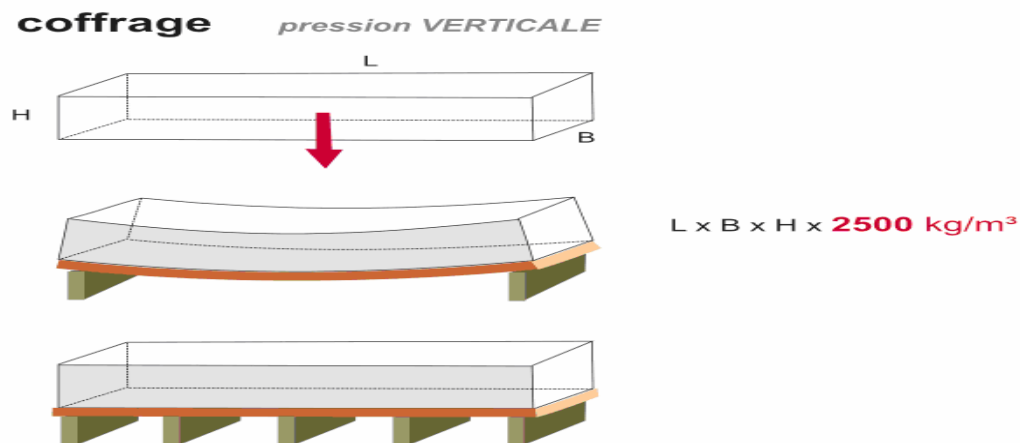


Fig.IV.1 : Pression verticale exerçant sur le coffrage [3]

Le poids volumique moyen du béton est de l'ordre de  $25 \text{ KN/m}^3$ . La masse des coffrages varie de  $150$  à  $750 \text{ N/m}^3$ . Des conditions inhabituelles peuvent justifier la prise en compte de surcharges plus ou moins fortes, cependant dans tous les cas une investigation aussi approfondie que possible devra être faite pour connaître au mieux les moyens d'exécution qui seront effectivement adoptés sur le chantier.

## coffrage *pression HORIZONTALE*

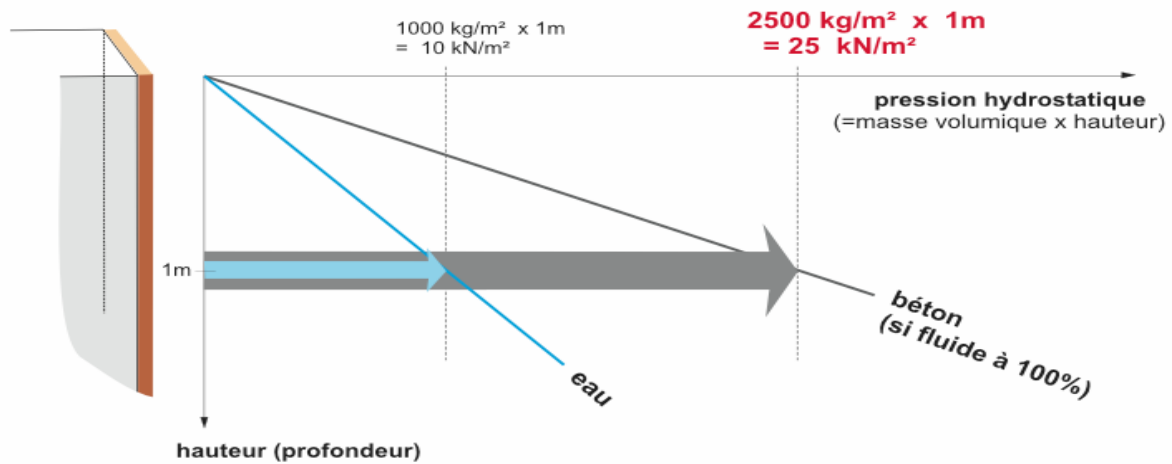


Fig.IV.2 : Pression horizontale exerçant sur le coffrage [3]

Le béton frais agit temporairement quasi comme un liquide sur les coffrages verticaux, produisant une pression qui est proche de la normale aux parois des coffrages. Cette pression latérale se rapproche d'autant plus de la pression hydrostatique pure que le béton est déversé sur une plus grande hauteur pendant la période précédant le début de sa prise.

La poussée du béton frais sur son coffrage dépend d'un certain nombre de facteurs dont les effets sont plus aux moins importants.

Les paramètres dont dépend cette pression sont :

- les caractéristiques du béton : sa composition, sa masse volumique, son ouvrabilité et sa température,
- les caractéristiques du coffrage : les dimensions, la rigidité, la rugosité et l'étanchéité
- la méthode de mise en oeuvre : la vitesse de bétonnage, la méthode de vibration, la hauteur de béton frais.

Une autre question, concerne l'évolution de cette pression au cours du temps du fait que le béton arrive progressivement à s'auto-porter en se durcissant.

Les essais mécaniques permettant le suivi de la maturation des matériaux cimentaires sont classés en deux grandes catégories :

- ❖ Les essais destructifs : suivi de l'évolution de la résistance du mélange à la pénétration d'une aiguille (essai Vicat) ou d'une bille (Kelly ball) sous une charge donnée.
- ❖ Les essais non destructifs : mesure de l'évolution de la conductivité électrique du matériau, mesure de la résistance à la propagation d'une onde de choc à travers le matériau, etc.

## **II-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE :**

### **1-Profil de pression :**

La forme du profil de pression initiale est essentiellement fonction des frottements entre les divers constituants du mélange et des frottements de ceux-ci avec la paroi du coffrage.

En ce qui concerne les pâtes de ciment, le décalage du profil de pression par rapport à celui hydrostatique est certainement dû à la maturation du mélange au cours du coulage. Le degré de mobilisation des forces de frottement dépend de la concentration granulaire du mélange et des pressions de contact entre les grains.

- Rodin : il a été le 1<sup>er</sup> à proposer un modèle très simple qui ne tient compte que d'une seule variable qui est la vitesse de bétonnage. Il suppose que le profil de pression est hydrostatique sur une hauteur  $h_{\max}$  et qu'au-delà la pression reste inférieure à  $P_{\max}$ . La hauteur de la partie hydrostatique  $h_{\max}$  et la pression maximale  $P_{\max}$  croissent ainsi avec la vitesse de bétonnage.
- Gardner a étudié l'influence d'un certain nombre de paramètres comme la vitesse de bétonnage, les dimensions du coffrage, la température du béton, la consistance du béton et également l'utilisation ou non d'un superplastifiant sur le profil initial de la poussée du béton :

Gardner a émis les remarques suivantes :

- Une vitesse de bétonnage plus rapide provoque une poussée supérieure étant donné que le béton dispose de moins de temps pour se structurer,
- Une diminution de la taille de la plus petite dimension du coffrage réduit la poussée,
- La poussée est beaucoup plus forte à une plus faible température puisque l'hydratation se trouve inhibée.
- Un béton plus fluide exerce une plus forte pression.

Une courbe enveloppe type de la pression latérale mesurée et la contrainte de cisaillement du mur est présentée sur la figure IV.3.

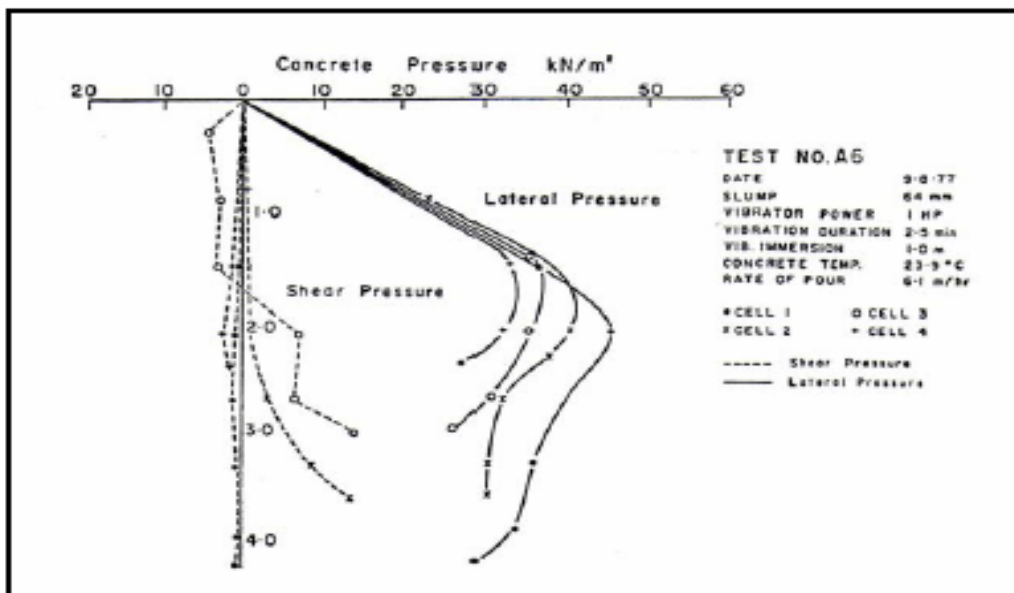


Fig.IV.3 : Profil type de la poussée du béton frais selon Gardner [19].

- Khan [19] a réalisé des mesures de poussée d'un béton ordinaire frais sur un certain coffrage donné.

La figure IV.4 montre que :

- L'enveloppe de la courbe de pression reste très proche d'un profil hydrostatique sur une hauteur, qu'on notera  $h_{\max}$ , d'environ 1-2m,
- La pression maximale  $P_{\max}$  ne se trouve pas systématiquement en pied de coffrage.

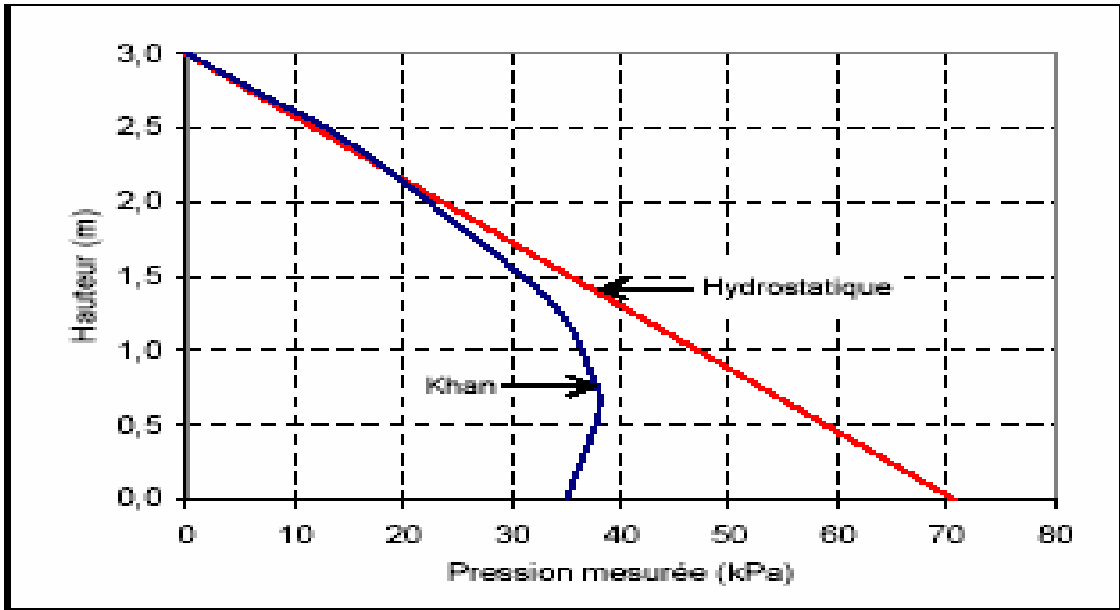


Fig.IV.4 : Profil type de la poussée du béton frais (Khan [19]).

- La figure IV.5 indique pour une distribution granulaire donnée l'influence du rapport ( $V_p/V_g$ ) sur la pression exercée par le mélange rapportée à celle de la pâte témoin ayant le même rapport E/C, notée ( $P_{\text{mélange}}/P_{\text{pâte}}$ ). (d'après S.Amziane).

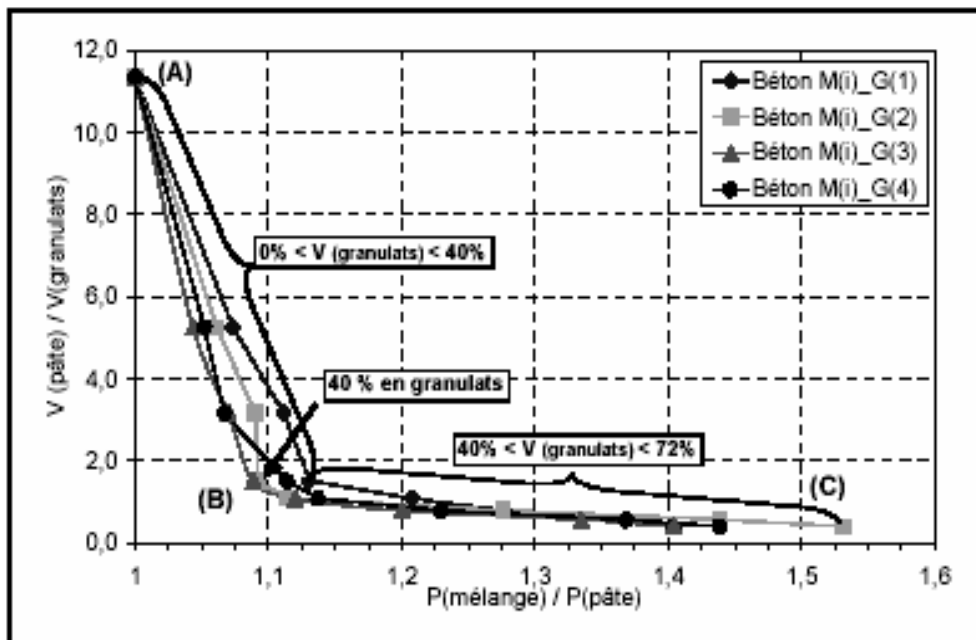


Fig.IV.5 : Influence de la phase granulaire sur la poussée mesurée à 1,60 mètre de profondeur (d'après S.Amziane) [19]

$V_p$  : Volume de la pâte

$V_g$  : Volume des granulats

Cette figure met en évidence l'existence d'un certain seuil  $(V_p/V_g)_{\text{critique}}$  où se produit un changement de pente des droites  $(V_p/V_g)$  en fonction de la pression relative  $(P_{\text{mélange}}/P_{\text{pâte}})$  :

- L'intervalle (AB) tel que  $1,5 < (V_p/V_g) < 11,35$ , soit une concentration volumique où le rapport  $(P_{\text{mélange}}/P_{\text{pâte}})$  ne varie que très faiblement, entre 1,0 et 1,15 ;
  - L'intervalle (BC) tel que  $0,387 < (V_p/V_g) < 1,15$ , soit une concentration volumique comprise entre 40% et 72%, avec une variation sensible du rapport  $(P_{\text{mélange}}/P_{\text{pâte}})$  entre 1,15 et 1,55.
- Des études menées par M. Barrioulet [19] sur l'influence de la concentration en granulats sur l'écoulement du béton frais ont apporté les remarques suivantes :
- Tant que la concentration en granulats reste inférieure à 40%, le comportement du béton frais est essentiellement fonction de la masse volumique des granulats. Une augmentation de la proportion en granulats freine l'écoulement sauf dans le cas où les granulats sont plus denses que la pâte et ont une concentration inférieure à 15-25% suivant la nature du granulat.
  - Lorsque la concentration en granulats atteint 40%, les granulats interviennent dans l'écoulement suivant un processus essentiellement frottant.
- Pour un mélange donné, l'amplitude des frottements intergranulaires et des frottements grain/paroi est directement proportionnelle au niveau de la force normale (loi de Coulomb).

Dans un coffrage, l'intensité de cette force normale est déterminée par la hauteur du coffrage ou plus précisément par le poids mort du matériau situé au-dessus du point considéré. Les chercheurs ont distingué alors deux cas de part et d'autre d'une hauteur critique notée  $h_{\text{critique}}$  (figure IV.6).

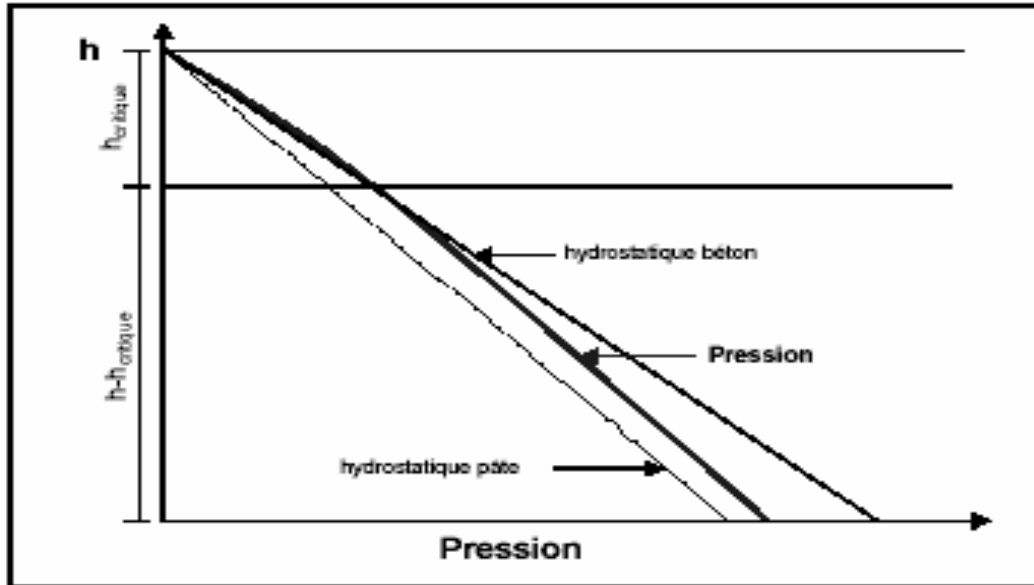


Fig.IV.6 : Répartition des pressions d'un béton sur un coffrage [19]

- Pour une hauteur  $h \leq h_{\text{critique}}$ , le poids des couches supérieures n'est pas suffisant pour mobiliser de fortes forces de frottement. On a par conséquent un profil de pression proche d'un profil hydrostatique d'un fluide de même densité que le béton.
- Pour une hauteur  $h > h_{\text{critique}}$ , les forces de frottement deviennent progressivement non négligeables. La capacité des granulats à se mouvoir horizontalement et verticalement diminue jusqu'à atteindre un seuil de blocage.

## 2-Formulations empiriques :

Le premier modèle de calcul du profil de pression initiale trouvé dans la littérature est celui de Rodin. C'est un modèle très simple car il ne tient compte que d'une seule variable qui est vitesse de bétonnage. Il suppose que le profil de pression est hydrostatique sur une hauteur  $h_{\text{max}}$  et qu'au-delà la pression reste inférieure à  $P_{\text{max}}$ . Les valeurs de  $h_{\text{max}}$  et  $P_{\text{max}}$  sont déterminées par des relations suivantes :

$$h_{\text{max}} = 1,63V^{1/3}$$

$$p_{\text{max}} = 23.5h_{\text{max}}$$

$h_{\text{max}}$  : est la hauteur où la pression est maximale (en mètre),

$V$  : est la vitesse de bétonnage (en m/h),

$P_{\text{max}}$  : la pression maximale (en kN/m<sup>2</sup>).



La hauteur de la partie hydrostatique  $h_{\max}$  et la pression maximale  $P_{\max}$  croissent ainsi avec la vitesse de bétonnage. Le profil de pression se déduit des relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{La pression hydrostatique pour } h < h_{\max} \\ P(h) = (1 - (h - h_{\max})/3V)P_{\max} \text{ pour } h > h_{\max} \end{array} \right.$$

Ces formules ne sont valables que dans le cas où la vibration interne est utilisée, les proportions volumiques en ciment/sable/gravier du béton sont de 1/2/4, l'affaissement au cône est de 15 cm et la température est de 21°C.

Ce modèle ne s'utilise donc pas dans le cas des bétons fluides. De plus, on sait que la vitesse de bétonnage n'est pas le seul paramètre dont dépend la pression du béton sur les coffrages.

En 1958, la commission 347 de l'ACI (American Concrete Institute) a proposé un modèle permettant de déterminer la courbe enveloppe de la pression d'un béton contre une paroi coffrante. Ce modèle est basé sur des résultats expérimentaux qu'ils ont recensés dans la littérature. Le modèle ACI rend compte de deux paramètres : vitesse de bétonnage et température du béton. A la différence de Rodin, elle suppose que la pression reste continuellement égale à  $P_{\max}$  au-delà de  $h_{\max}$ . Selon qu'il s'agisse d'un mur ou d'un poteau,  $P_{\max}$  est calculée de la manière suivante :

• Pour les murs :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\max} = \min\{23,5h ; 95,8 ; 7,19 + (785V/(17,78+T))\}, \text{kN/m}^2 \text{ pour } V < 2,14\text{m/h} \\ P_{\max} = \min\{23,5h ; 95,8 ; 7,19 + (1155+244V)/(17,78+T)\}, \text{kN/m}^2 \\ \text{pour } 2,14 < V < 3\text{m/h} \end{array} \right.$$

• Pour les poteaux :

$$P_{\max} = \min\{23,5h ; 143,7 ; 7,19 + (785V/(17,78+T))\}, \text{kN/m}^2$$

$P_{\max}$  : est la valeur limite de la pression exprimée en  $\text{kN/m}^2$ ,

$V$  : est la vitesse de bétonnage en  $\text{m/h}$  et  $T$  la température en °C.

Ces formules sont applicables si les conditions suivantes sont satisfaites : [19]

- . La masse volumique du béton est de 2,4  $\text{t/m}^3$ ,
- . L'affaissement au cône est inférieur à 10 cm,
- . Le béton est mis en œuvre par couche d'épaisseur inférieure à 60 cm,
- . La profondeur d'immersion du vibreur n'excède pas 1,25 m.

La figure IV.7 montre l'influence de la vitesse de bétonnage (1, 2, 3 et 4 m/h) sur le profil de pression obtenu avec les modèles de Rodin et de l'ACI en considérant une colonne de 3 m de haut. On remarque que les valeurs de  $h_{max}$  et  $P_{max}$  croissent lorsqu'on augmente la vitesse de coulage. Les deux modèles donnent des valeurs de  $h_{max}$  et  $P_{max}$  très proches sauf pour une vitesse de 1m/h.

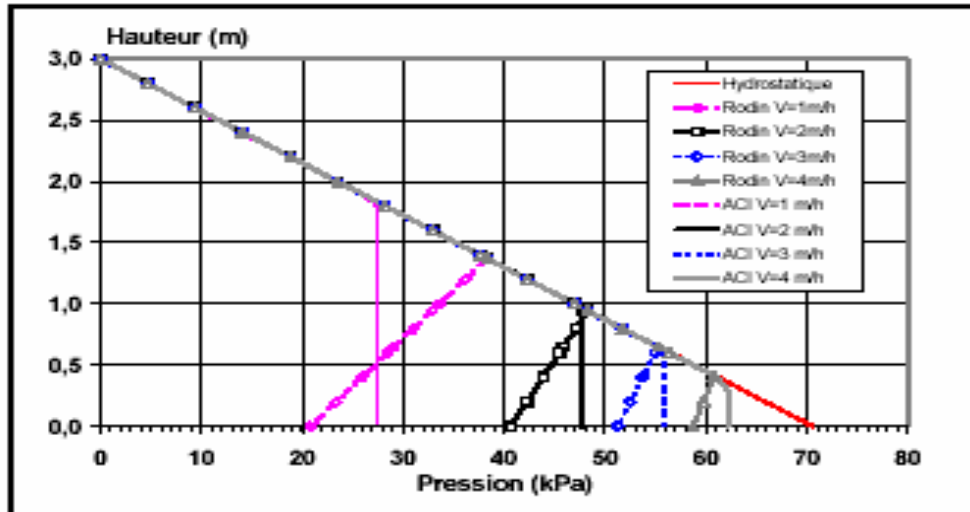


Fig.IV.7 : Comparatif entre le modèle de Rodin et celui du ACI pour différentes valeurs de vitesse de bétonnage (H=3 m et T=20°C). [19]

Un modèle qui tient compte à la fois des caractéristiques du béton mis en œuvre et de celles du coffrage a été proposé par une association anglaise CIRIA (Civil Industries Research and Information Association). Le modèle a été publié dans le CIRIA-report 108 et permet de déterminer  $P_{max}$  et  $V_{adm}$  qui correspondent à la vitesse de coulage admissible :

$$P_{max} = \min \begin{cases} G (C_1(V)^{1/2} + C_2 \cdot K_T (H - C_1(V)^{1/2})) \\ G \cdot H \end{cases}$$

$$V_{adm} = \left[ \frac{[2 \cdot P / G - C_2^2 \cdot K_T^2 - C_2 K_T (C_2^2 \cdot K_T^2 + 4(H - P / G))^{1/2}] / 2 \cdot C_1}{2} \right]^2 \quad \text{en m/h}$$

G : densité du béton en  $kg/m^3$

V : vitesse de bétonnage en m/h,

H : hauteur de la banche en m,

$C_1$  : coefficient de la section transversale égal à 1 (murs) ou 1,5 (poteaux),

$C_2$  : coefficient de l'adjuvant égal à 0,30 (BO) et 0,45 (béton avec retardateur),

T : température en °C,

P : pression admissible pour un coffrage donné,

$K_T$  : coefficient de température égale à  $K_T = (36/T + 16)^2$

Le champ de validité de ce modèle est le suivant :

- . La température est comprise entre 5 et 30°C,
- .  $P_{\max}$  doit être inférieure ou égale à 90 kN/m<sup>2</sup> pour les murs et 166 kN/m<sup>2</sup> pour les poteaux.

Une comparaison entre les trois modèles empiriques étudiés ci-dessous est présentée sur la figure IV.8. On rappelle que seul le modèle proposé par la CIRIA tient compte de la hauteur du coffrage. Les formulations sont testées à partir des données suivantes :

Un béton normal de densité égale à 2,3 et à une température de 20°C coulé avec une vitesse de 3 m/h. [19]

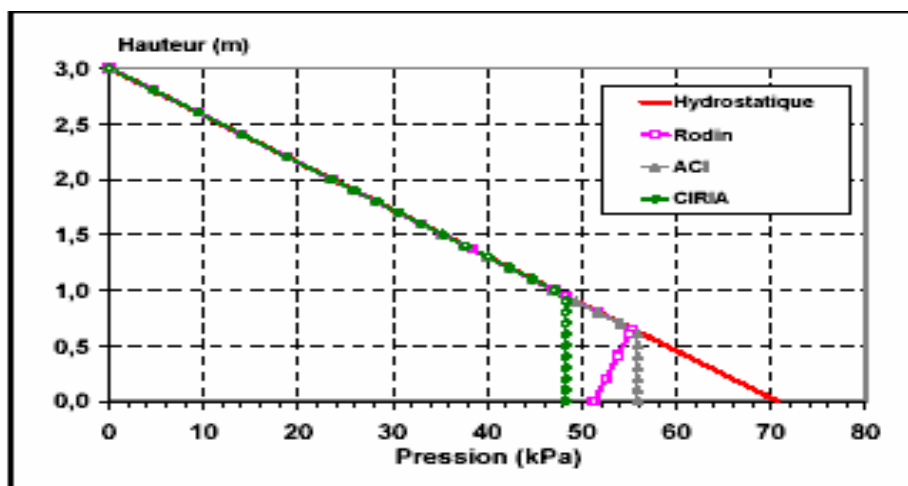


Fig.IV.8 : Comparatifs des différents modèles empiriques (H=3m ; V=3 m/h et T=20°C). [19]

On note que, dans le cas étudié, les modèles de Rodin et du CIRIA donnent approximativement les mêmes valeurs de  $P_{\max}$  et de  $h_{\max}$ . Le modèle proposé par l'ACI fournit des valeurs inférieures de  $P_{\max}$  et de  $h_{\max}$ .

En analysant l'influence de la vitesse de bétonnage sur la valeur de la pression maximale  $P_{\max}$  (figure IV.9), on peut émettre les remarques suivantes :

- La pression maximale mesurée se rapproche progressivement de la pression hydrostatique d'un fluide de même densité lorsque l'on augmente la vitesse de bétonnage,

- La vitesse de coulage nécessaire obtenue avec le modèle du CIRIA pour atteindre la pression hydrostatique est plus élevée que celle calculée avec le modèle de l'ACI,
- Par rapport aux murs, la vitesse de coulage nécessaire pour atteindre la pression hydrostatique est plus grande pour les colonnes. Cela s'explique par le fait qu'une diminution de la taille du coffrage réduit la poussée et il faut pour cela augmenter la vitesse de coulage si l'on veut garder la même pression.

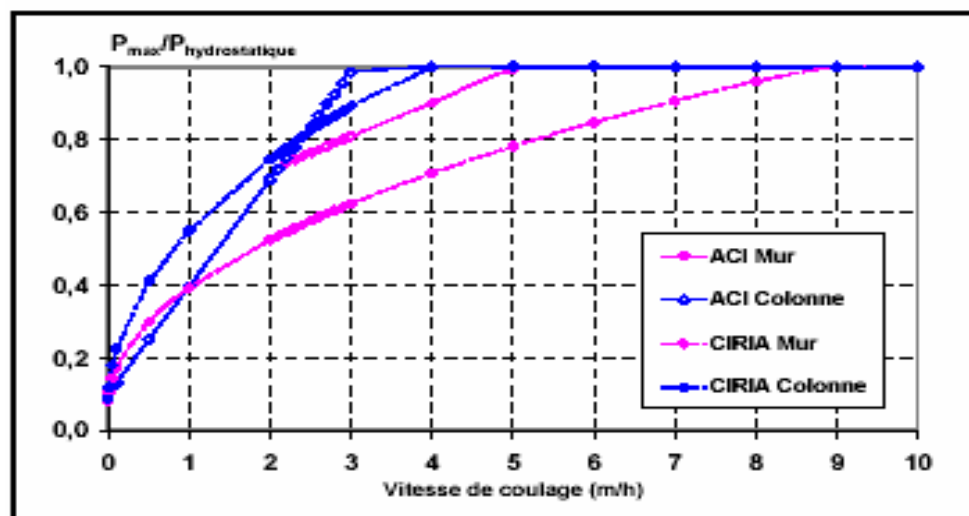


Fig.IV.9 : Influence de la vitesse de bétonnage sur le rapport  $P_{max}/P_{hydrostatique}$  (Hauteur du coffrage=3m, T=20°C, densité du béton=2,3). [19]

Il s'avère que ces modèles empiriques sont plus ou moins satisfaisants pour les bétons ordinaires mais ne sont pas adaptés pour les nouveaux types de béton. Un grand nombre d'études sur la mise en œuvre d'un modèle de calcul de la poussée, qui tient compte à la fois des caractéristiques intrinsèques des matériaux et de celles du coffrage, sont actuellement en cours. Les directions qui peuvent être prises sont au nombre de deux, l'une partant des théories émises sur la poussée des terres sur les ouvrages de soutènement et l'autre issue des théories sur les milieux granulaires ensilés.

### III-ANALYSE :

Les études précédentes ont mis en évidence des facteurs de réduction qui peuvent être récapitulés sur la figure IV.10.

Ces facteurs de réduction transformant la ligne droite théorique en une courbe, ne sont valables que pour un béton normal \_ plus précisément un béton à base de granulats et de sable courants, de ciment portland, mais sans adjuvant. [3]

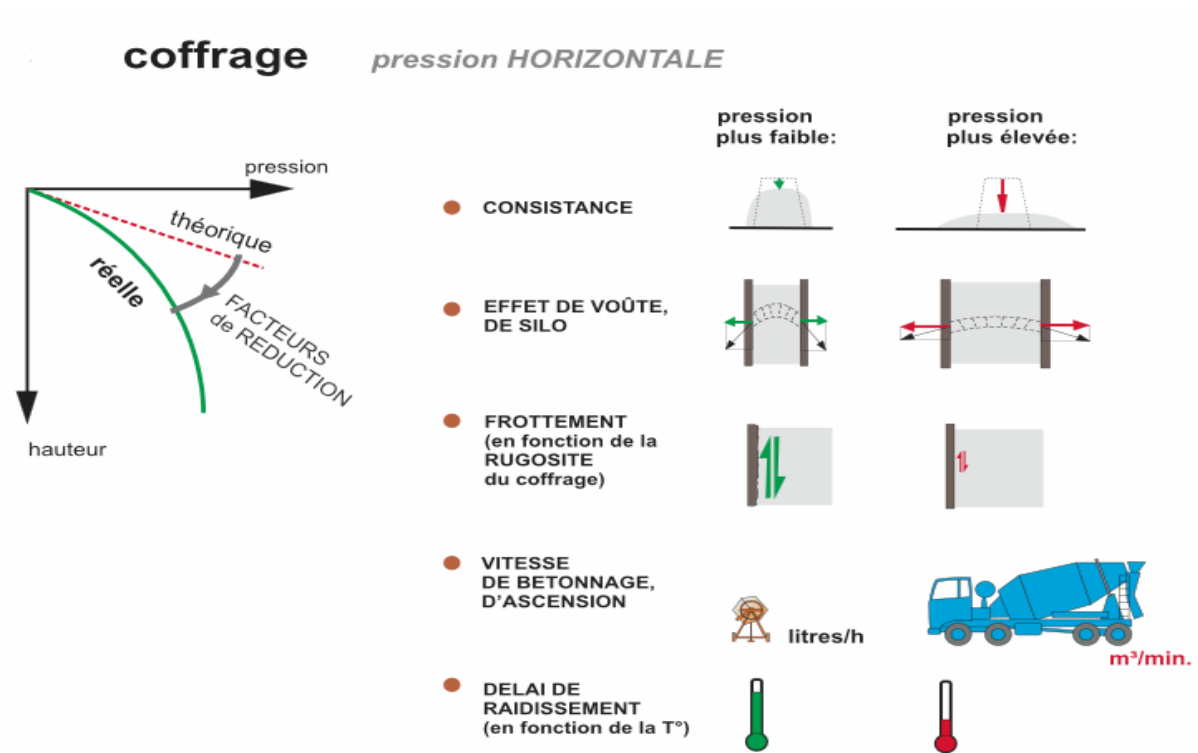


Fig.IV.10 : Facteurs de réduction pour pression horizontale [3]

### 1. Consistance du béton -eau de gâchage- densité :

La densité du béton est le premier facteur dont la poussée dépend, c'est-à-dire la granulométrie utilisée, le poids spécifique des agrégats, le dosage en ciment et aussi la quantité d'eau de gâchage utilisée, cette dernière qui dépend de la consistance recherchée.

### 2. Angle de frottement interne- cohésion :

Le béton frais, de consistance plus ou moins molle, se comporte derrière son coffrage comme un complexe grenu plus ou moins cohérent ou pulvérulent, ce comportement mettant en jeu l'angle de frottement interne. L'intervention de la cohésion qui est tout de même faible est négligeable, ce qui ne sacrifie pas la sécurité.

### 3. Mode de mise en œuvre : coulage- damage- vibration :

Avant de commencer le bétonnage d'une pièce, le responsable devra vérifier le coffrage (dimension, solidité, étanchéité, propreté, humidification des parois à l'eau ou enduction d'huile de démoulage) et s'assurer que la distance des armatures aux parois est partout respectée. Il établira préalablement un plan de

bétonnage en fonction des dimensions et des formes de la pièce, du débit de la bétonnière, des joints de reprise à respecter et des dispositions du ferrailage.

#### **a) béton coulé mou :**

C'est là évidemment un procédé à déconseiller dans la plupart des cas, mais il y a certaines pièces où il n'est pratiquement pas possible de l'éviter. Pour un dosage riche en ciment gras, la pâte sera très liquide, il y aura tendance à la mise en jeu derrière la paroi d'une poussée hydrostatique. D'autre part, ce béton peut comporter comme se comporterait derrière un mur de soutènement un terrain noyé, alors, il y a deux poussées à considérer :

La première est celle de l'eau qui occupe les vides du terrain et celle du terrain, la deuxième est celle du terrain lui-même noyé.

#### **b) béton plastique « terre humide » piqué ou damé :**

Dans ce cas, il faut considérer un terrain mouillé et non noyé.

#### **c) béton vibré :**

Lors du malaxage du béton, des bulles d'air se trouvent piégées dans le mélange. L'idée consiste alors à vibrer le mélange de telle sorte qu'il perd sa viscosité et sa cohésion et ainsi pouvoir extraire autant que possible une grande quantité de ces bulles d'air. La vibration a pour objectif d'avoir un béton d'une résistance et d'une durabilité accrues par l'augmentation de la compacité.

On distingue :

- La vibration interne ou pervibration qui consiste à plonger une aiguille vibrant cylindrique dans le béton.
- La vibration externe où le vibreur est fixé à l'extérieur du coffrage, et dans ce cas le coffrage et le béton sont vibrés en même temps. Ce type de vibration est utilisé notamment en préfabrication et lorsque la forme ou l'épaisseur de l'ouvrage ne permet pas l'utilisation d'une aiguille vibrante.
- La vibration superficielle qui s'exécute à l'aide de taloches, de règles vibrantes et de surfaceuses qui sont employées sur de grandes surfaces : panneaux préfabriqués, dalles, chaussées.

Une attention particulière doit être apportée à la vibration, de façon à éviter une déshomogénéisation et une ségrégation du mélange. Cela concerne à la fois la durée de la vibration et la manière de vibrer (distance entre les points de vibration, épaisseur des couches de béton à vibrer, etc.).

#### **4. Vitesse du bétonnage et temps de prise du béton :**

La vitesse d'ascension du béton ou vitesse de bétonnage dans son coffrage ainsi que la durée de prise du ciment sont des paramètres importants puisque les couches de béton coulées depuis une durée égale ou supérieure au temps de prise se trouvent solidifiées.

Pour le temps de prise ; les liants hydrauliques (ciment) sont de la même classe des chaux hydrauliques à prise très lente .A prendre en considération l'influence de la température car le froid ralentit la prise, la chaleur l'accélère ; par conséquent les poussées pourront être plus fortes par temps froid.

#### **5. Nature des coffrages –angle de glissement :**

Cette influence est nulle, au moins théoriquement pour le béton liquide .Dans les autres cas, les poussées sont légèrement plus élevées en coffrage métalliques, alors, l'influence de la nature des parois est de peu d'importance.

#### **6. Dimensions du coffrage en place, effet de silo :**

Vis-à-vis des dimensions en plan du béton coulé, pour une hauteur du coffrage très faible, les poussées à considérer sont celles qui existent derrière un mur de soutènement ou une paroi de réservoir .Mais, dans le cas de pièces de faibles dimensions horizontales vis-à-vis de leur hauteur, il y aura à considérer « l'effet de silo » selon lequel la poussée horizontale croît en profondeur vers un maximum indépendant de cette profondeur.

Tous ces facteurs provoquent des sollicitations importantes sur les coffrages qui sont rarement connues avec précision, on peut résumer ces actions en deux catégories de charges :

- 1 La pression du béton frais est intermédiaire entre la pression hydrostatique pure et la pression de silo avec matériaux secs de même granulométrie et de même composition.
- 2 La pression croît rapidement et atteint un maximum pour une certaine hauteur de béton, ce maximum est atteint au bout d'un temps inférieur à

celui du début de la prise .Dès que cette dernière s'amorce, la pression décroît.

- 3 La pression est d'autant plus proche de la pression hydrostatique que le mélange est plus riche en ciment.
- 4 La pression maximum diminue en sens inverse de la température (pour les ciments courants).Ceci peut s'expliquer par le fait que la chaleur accélère les réactions d'hydratation du ciment et diminue ainsi son temps de prise.
- 5 La fluidité du béton, liée au rapport E/C de la masse de ciment d'eau et à la granulométrie, a une influence importante sur la valeur de la pression.
- 6 Le frottement augmente d'autant plus que la pression est maximale .La pression est aussi liée à l'effet du paroi (qui dépend des dimensions de la section horizontale du coffrage), au ferrailage et au mode de compactage.



# CHAPITRE V

## REGLEMENTATION

### NORMES ACTUELLES :

Les normes de calcul de pression du béton frais sur un coffrage sont très différentes d'un pays à un autre.

En Algérie, la norme utilisée est la norme M13

Coffrage : -M13.1→NFP 93 301  
-M13.2→NFP 93 501

Echafaudage :-NFP 93 311  
-NFP 93 312

Barrières et fils de sécurité : M13.3  
→ 93 311  
→ 93 312

L'ancienne version de la norme française (NFP 93-350) préconise de dimensionner les coffrages de manière à résister à des pressions hydrostatiques. Elle s'énonce textuellement comme suit : « les banches sont conçues pour résister dans le domaine élastique aux efforts dus à la mise en place d'un béton courant de masse volumique  $2400 \text{ kg/m}^3$ . La pression est considérée hydrostatique, elle n'est jamais prise inférieure à  $7200 \text{ daN/m}^2$  au pied d'une banche de 3 m de hauteur. [19]

En 1994, cette norme a été réactualisée au vu des diverses observations expérimentales affirmant une réduction de la poussée par rapport à la pression hydrostatique en pied de banche. La nouvelle norme (NF P 18-451) est plus réaliste du fait qu'elle rend compte à la fois de la consistance du béton, des dimensions du coffrage et de la vitesse de bétonnage.

La poussée dimensionnante est la plus faible des valeurs entre la pression hydrostatique ( $p_1$ ), les pressions qui tiennent compte de l'effet de voûte/ ou d'arc ( $p_2$ ) et de la prise du béton ( $p_3$ ).

La pression de calcul est donc la plus faible des valeurs suivantes :

$$P = \text{Min} \{P_1, P_2, P_3\}$$

où

$$P_1 = \text{Min} \{ \gamma h, 150 \text{ kPa} \} \text{ avec } \gamma = 25 \text{ kN/m}^3, \text{ (figure V.1)}$$

$p_2$  et  $p_3$  sont déduites des courbes suivantes (Figure V.2,3).

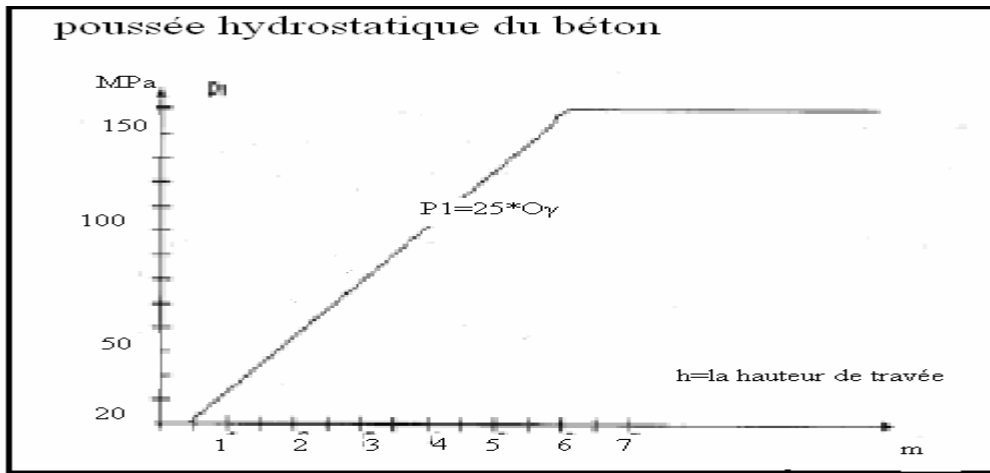


Fig.V.1 : Poussée hydrostatique du béton [19]

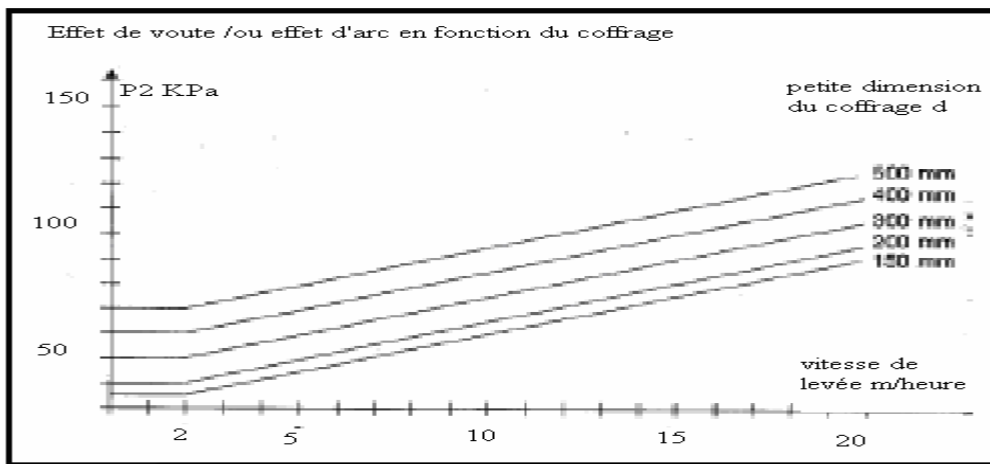


Fig.V.2 : Effet de voûte ou effet d'arc en fonction de la petite dimension du coffrage d [19]

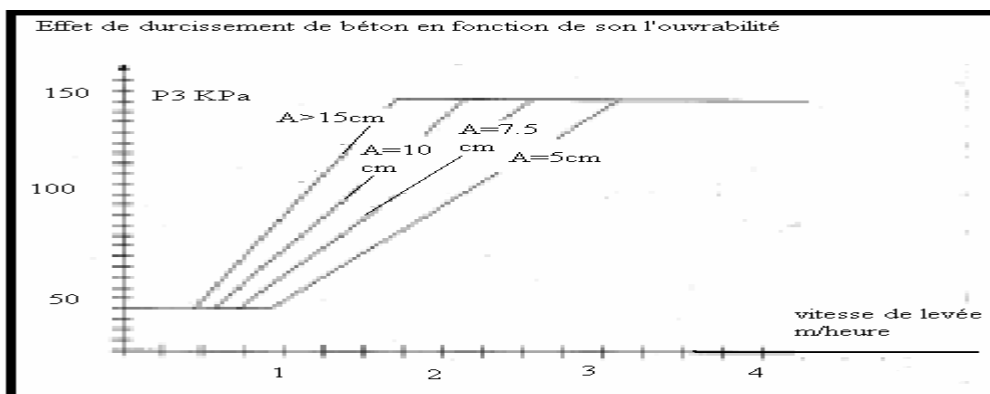


Fig.V.3 : Effet de durcissement en fonction de l'affaissement de l'ouvrabilité [19]

On peut calculer cette pression par la même méthode mais par des valeurs plus proches. Les tableaux ci-après donnent les valeurs limites  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  arrondis à 5  $N/m^2$  près (une plus grande précision serait illusoire)

**a) l'effet de la hauteur H (en m) de la levée de béton :  $P_1$**

Tableau V-1 : les valeurs limites de  $P_1$  [21]

H (m)	1	2	3	4	5	$\geq 6$
$P_1$ ( $N/m^2$ )	25	50	75	100	125	150

**b) l'effet d'arc :**

Cet effet ne se manifeste que lorsque les trois conditions sont simultanément vérifiées :

- l'épaisseur minimal « d » de la paroi est au plus égale à 50cm
- l'affaissement du béton est au plus égale à 80mm
- il n'y a pas de vibration externe (par le coffrage)

La valeur  $P_2$  dépend de la vitesse R de remplissage de coffrage, exprimée en mètre vertical par heure.

Dans le cas d'une mise en place du béton au moyen d'une benne effectuant des rotations successives, la vitesse R s'évalue comme suit :

Soit :  $V(m^3)$  le volume du béton à couler

$v (m^3)$  le volume de la benne

n le nombre de bennes nécessaires (c'est-à-dire le nombre entier immédiatement supérieur à  $V/v$ )

t la durée d'un cycle complet en minute

h la hauteur verticale à bétonner en m

$$R=60h/t(n-1) \quad m/h$$

Le tableau ci-après donne les valeurs de  $P_2$  en  $N/m^2$  en fonction de l'épaisseur « d » de la paroi et de la vitesse R.

Tableau V-2 : les valeurs limites de  $P_2$  [21]

	d (cm)	R (m/h)											
		1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	$\geq 40$
$P_2$	15	35	35	40	45	45	50	55	60	75	90	120	150
	20	40	40	45	50	50	55	60	65	80	95	125	150
	30	50	50	55	60	60	65	70	75	90	105	135	150
	40	60	60	65	70	70	75	80	85	100	115	145	150
	50	70	70	75	80	80	85	90	95	110	125	150	150

**c) effet de durcissement du béton  $P_3$  :**

Le tableau ci-après donne les valeurs de  $P_3$  en  $N/m^2$  en fonction de l'affaissement du béton, de la température interne de ce dernier, et de la vitesse de remplissage R.

Tableau V-3 : les valeurs limites de  $P_3$  [21]

Affaissement En (mm) (1)	Température Du béton En ( $^{\circ}C$ )	R (m/h)									
		1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	$\geq 8$
50	5	50	70	95	115	135	150	150	150	150	150
	10	40	55	70	85	100	135	150	150	150	150
	15	40	45	55	65	75	100	125	150	150	150
	20	35	40	45	50	55	70	90	105	125	150
75	5	60	85	110	140	150	150	150	150	150	150
	10	50	65	85	105	125	150	150	150	150	150
	15	40	50	65	80	95	125	150	150	150	150
	20	35	40	50	60	70	90	115	135	150	150
100 à 150	5	70	100	130	150	150	150	150	150	150	150
	10	55	75	100	120	150	150	150	150	150	150
	15	45	60	75	90	110	150	150	150	150	150
	20	35	45	55	70	80	110	130	150	150	150

(1) selon norme NF P 18-451

## Remarques :

1-il n'est pas normalement nécessaire de prendre une marge complémentaire pour tenir compte d'un effet d'impact à la mise en place du béton.

2-pour certains adjuvants (à base de résines mélanines ou de cendres volantes pulvérisées) il convient de prendre  $P=P_1$ , quelque soit d, R ou H.

3-les bétons pompés donnent lieu à de grandes vitesses R, dont il faut tenir compte.

De même si le béton est mis en place par un tube plongeur dont l'extrémité est immergée dans le béton frais, il y a accroissement des pressions sur les coffrages.

Pour les poteaux, l'introduction du béton sous pression par la base entraîne une augmentation de 50% par rapport à la pression hydrostatique.

4-la poussée est d'autant plus grande que le délai qui s'écoule entre la fabrication et la mise en œuvre du béton (transport plus temps d'attente)est lui-même plus court.

La norme allemande DIN 18218 parue en 1980 présente une série d'équations permettant de déterminer la pression latérale limite  $P_{max}$  et la vitesse de coulage admissible  $V_{adm}$  dans le cas de l'utilisation d'une vibration interne. Ces équations tiennent compte de la vitesse de bétonnage, et de la température du béton. Cette dernière doit être comprise entre 5 et 30°C. [19]

$$P_{max}=G.C_2.K_T(0,48.V+0,74)$$

$$V_{adm}=(2,08.P/(G.C_2.K_T))-1,54$$

G : densité du béton en  $kg/m^3$

V : vitesse de bétonnage en m/h,

$C_2$  : coefficient de l'adjuvant égal à 0,30 (BO) et 0,45 (béton avec retardateur),

P : pression admissible pour un coffrage donné,

$K_T$  : coefficient de température

$$K_T=(145-3T).10^{-2}$$

T : température en °C,

# CHAPITRE VI

## APPLICATIONS

### I-INTRODUCTION :

Un coffrage est un moule qui est constitué de différents éléments tels que : la peau, le fond de moule, les joints et la tige.

Le principal rôle de cette tige est de diminuer la pression du béton frais (emplacement au niveau des valeurs max) ainsi que les raidisseurs de coffrage.

### II-CALCUL DE LA PRESSION LATÉRALE DU BÉTON FRAIS :

#### PARTIE N°1 :

#### 1. Coffrages murs :

ACI a développé des formules reliant la pression maximum latérale du béton frais à la vitesse de remplissage et à la température. Ces formules basées sur des résultats expérimentaux permettent de définir aisément un diagramme de pression sur les coffrages.

Soit P : la pression latérale maximum, en kPa

R : la vitesse de remplissage, en m/h

T : la température du béton dans le coffrage, en °C

H : la hauteur maximum du béton frais dans le coffrage, en m

Pour des « coffrages murs » dont  $R \leq 2,1$  m/h :

$$P = 7,33 + (144R / (3,2 + 0,18T)) \quad (\text{kPa})$$

Avec un maximum absolu correspondant à la plus petite des deux valeurs suivantes : - 98 (kPa)

-  $24.H$  (kPa) (pression hydrostatique).

Si  $R > 2,1$  m/h, on utilisera la formule :

$$P = 7,33 + [(212 + 44,9R) / (3,2 + 0,18T)] \quad (\text{kPa})$$

Avec un maximum défini de la même manière que  $R \leq 2,1$  m/h.

Le tableau VI.1, établi d'après ces deux formules, donne, pour diverses vitesses de remplissage R et diverses températures T, les pressions latérales maxima à envisager.

Tableau VI.1 : Pression latérale pour les coffrages murs [3].

Pression latérale du béton frais P (en kPa)							
T (°C)	5	10	15	20	25	30	35
R (m/h)							
0,25	16,12	14,54	13,44	12,63	12,01	11,52	11,12
0,50	24,92	21,76	19,55	17,94	16,70	15,71	14,92
0,75	33,72	28,97	25,67	23,24	21,38	19,91	18,72
1,00	42,52	36,19	31,78	28,55	26,07	24,10	22,51
1,25	51,32	43,40	37,90	33,85	30,75	28,30	26,31
1,50	60,12	50,62	44,01	39,16	35,44	32,49	30,11
1,75	68,92	57,83	50,13	44,46	40,12	36,69	33,91
2,00	77,72	65,05	56,24	49,77	44,81	40,88	37,70
2,25	83,69	69,94	60,39	53,37	47,99	43,73	40,28
2,50	86,43	72,19	62,39	55,02	49,44	45,04	41,46
2,75	89,17	74,46	64,20	56,67	50,90	46,34	42,65
3,00	91,90	76,68	66,10	58,32	52,36	47,65	43,83

La pression maximum  $P_{max}$  à considérer est la plus petite des trois valeurs suivantes (en kPa) :

- valeur donnée dans le tableau ;
- $24.H$  (pression hydrostatique) (en m/h) ;
- 98 (en kPa).

Pour déterminer le diagramme des pressions sur le coffrage, on considère que le béton agit comme un fluide de poids volumique de  $24 \text{ kN/m}^3$ , en limitant la pression à la valeur donnée dans le tableau VI.1, le diagramme de pressions sera donc généralement trapézoïdal.

## 2. Coffrages colonnes :

Dans beaucoup de constructions, le volume des colonnes est assez petit pour permettre le remplissage complet des coffrages en un temps relativement court, inférieur au temps de prise du béton.

Dans ce cas, la vibration est fréquemment appliquée sur toute la hauteur du coffrage et la pression maximum qui en résulte est plus importante que pour les « coffrages murs » et est donnée par la relation :

$$P=7,33+(144R/(3,2+0,18T)) \text{ (kPa)}$$

Avec un maximum absolu correspondant à la plus petite des deux valeurs suivantes : - 144 (kPa)  
 - 24.H (kPa) (pression hydrostatique).

Cette formule expérimentale peut être utilisée pour déterminer la pression maximum sur tout coffrage dont la plus grande dimension horizontale est inférieure ou égale à 1,8 m.

Le tableau VI.2 suivant donne la valeur de la pression P à considérer pour différentes conditions de température et de vitesse de remplissage.

Tableau VI.2 : Pression latérale pour les coffrages colonnes [3].

Pression latérale du béton frais P (en kPa)							
T (°C)	5	10	15	20	25	30	35
R (m/h)							
0,50	24,92	21,76	19,55	17,4	16,70	15,71	14,92
1,00	42,52	36,19	31,78	28,5	26,07	24,10	22,51
1,50	60,12	50,62	44,01	39,6	35,44	32,49	30,11
2,00	77,72	65,05	56,24	49,7	44,81	40,88	37,70
2,50	95,31	79,48	68,47	60,38	54,18	49,27	45,30
3,00	112,91	93,91	80,70	70,99	63,55	57,66	52,89
3,50	130,51	108,34	92,93	81,60	72,92	66,05	60,49
4,00	147,00	122,77	105,16	92,21	82,29	74,44	69,08
4,50		137,20	117,39	102,82	91,66	82,83	75,68
5,00		147,00	129,61	113,43	101,03	91,22	83,27
5,50			141,84	124,04	110,40	99,61	90,87
6,00			147,00	134,65	119,77	108,00	98,46
6,50				145,26	129,14	116,39	106,06
7,00				147,00	138,51	124,78	113,65
7,50					147,00	133,17	121,25
8,00						141,56	128,84
8,50						147,00	136,44
9,00							144,03
9,50							147,00

La pression maximum  $P_{\max}$  à considérer est la plus petite des trois valeurs suivantes (en kPa) :

- 144 (kPa) ;
- 24.H (kPa) (pression hydrostatique) ;
- valeur donnée dans le tableau.

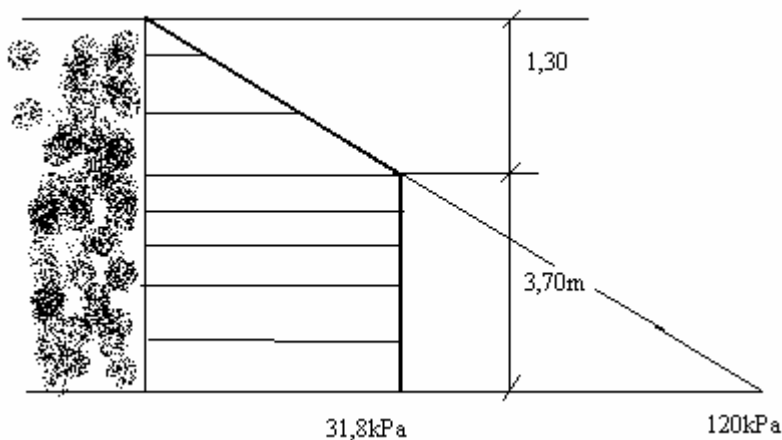


## Exemples :

On considère pour ces trois applications que la masse volumique du béton est de  $24\text{kN/m}^3$ .

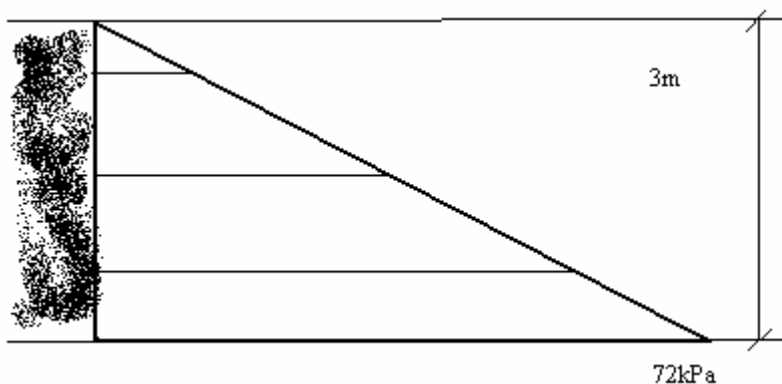
- Un mur de hauteur doit être bétonné avec une vitesse de remplissage  $R=1\text{m/h}$  quand la température est de  $15^\circ\text{C}$ .

D'après le tableau VI.2 précédant, la pression maximum à envisager est de  $31,78\text{ kPa}$ . Le diagramme de pression sera triangulaire sur une hauteur  $h=31,78/24=1,3\text{m}$  ; sur les  $3,7\text{m}$  restant, la pression sera limitée à  $31,78\text{kPa}$ .



- Bétonnage d'un mur de 3m de hauteur avec  $R=2\text{m/h}$  et une température de  $5^\circ\text{C}$ .

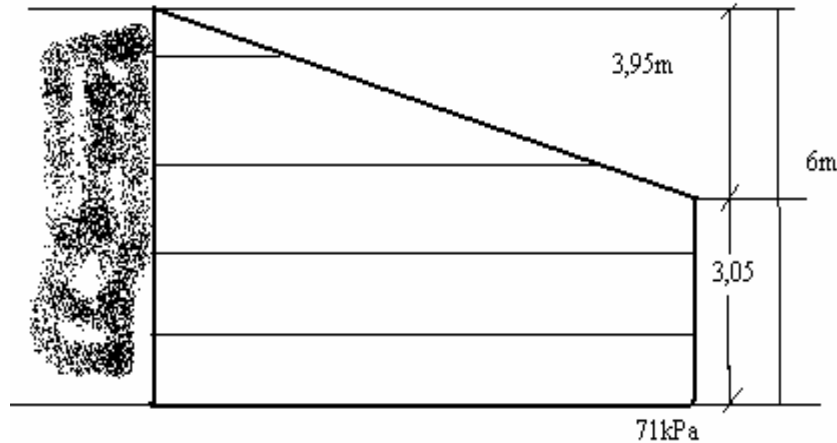
D'après le tableau VI.2,  $P_{\text{max}} = 77,72\text{ kPa} > 3 \times 24 = 72\text{ kPa}$  (condition de maximum correspondant à la pression hydrostatique). Le diagramme des pressions se présente alors comme suit :



- Bétonnage d'une colonne de 6m de hauteur à une vitesse de 3m/h et à une température de 20°C.

La pression maximum  $P_{max}$  sera atteinte à une profondeur égale  $h=70,99/24=2,95m$ .

Le diagramme des pressions se présente donc comme suit :



## **PARTIE N°2:**

Dans cette partie nous nous proposons de faire une comparaison entre les différentes normes : pour cela on considèrera par exemple deux cas :

- ➔ Une hauteur de bétonnage faible : 3m
- ➔ Une hauteur relativement élevée : 7m

La température ambiante sera supposée de 20°C

La masse volumique du béton considéré sera supposée de 2500Kg/m<sup>3</sup>

La vitesse de bétonnage est de 10m/h

Les épaisseurs de coffrage à considérer seront variées : 10 20 25 30 35 (en cm)

## Rappels :

Tableau VI.3 Formulation de la poussée des bétons par la norme Allemande [3].

Norme	Formulation de la pression du béton
<p>DIN 18218 (Allemagne, 1980)</p> <p>G : densité du béton en kg/m<sup>3</sup> V : vitesse de bétonnage en m/h, C<sub>2</sub> : coefficient de l'adjuvant P : pression admissible pour un coffrage donné, K<sub>T</sub> : coefficient de température T : température en °C,</p>	<p><math>P_{\max} = G \cdot C_2 \cdot K_T (0,48 \cdot V + 0,74)</math> [kN/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>K_T = (145 - 3T) \cdot 10^{-2}</math> C<sub>2</sub> égal à 0,30 (BO) et 0,45 (béton avec retardateur),</p> <p><math>V_{\text{adm}} = (2,08 \cdot P / (G \cdot C_2 \cdot K_T)) - 1,54</math> [m/h]</p>

Tableau VI.: Formulation de la poussée des bétons par la norme CIRIA [3].

Norme	Formulation de la pression du béton
<p>IRI-report (Grande Bretagne, 1985)</p> <p>: densité du béton en kg/m<sup>3</sup>  vitesse de bétonnage en m/h,  : hauteur de la banche en m  <sub>1</sub> : coefficient de la section transversale  <sub>2</sub> : coefficient de l'adjuvant  : température en °C,  : pression admissible pour un coffrage  onné,  <sub>T</sub> : coefficient de température égale à</p>	$P_{\max} = \min \begin{cases} G (C_1(V)^{1/2} + C_2 \cdot K_T (H - C_1(V)^{1/2})) \\ G \cdot H \end{cases}$ <p>C<sub>1</sub> égal à 1 (murs) ou 1,5 (poteaux),  C<sub>2</sub> égal à 0,30 (BO) et 0,45 (béton avec retardateur),  K<sub>T</sub> = (36/T + 16)<sup>2</sup></p> $V_{\text{adm}} = \left[ \frac{2 \cdot P/G - C_2^2 \cdot K_T^2 - C_2 K_T (C_2^2 \cdot K_T^2 + 4(H - P/G))^{1/2}}{2 \cdot C_1} \right]^2$

➤ **LA NORME FRANCAISE NF P 18-451 :**

$$P = \text{Min} \{P_1, P_2, P_3\}$$

Où

$$P_1 = \text{Min} \{\gamma h, 150 \text{ kPa}\} \text{ avec } \gamma = 25 \text{ kN/m}^3,$$

- H=3m

a) l'effet de la hauteur H (en m) de la levée de béton :  $P_1$

$$H=3\text{m} \rightarrow P_1 = \gamma H = 25 \cdot 3 = 75 \text{ kN/m}^2$$

b) l'effet d'arc :

d (cm)	<b><u>R=10m/h</u></b>
10	55
20	65
25	70
30	75
35	80

c) effet de durcissement du béton  $P_3$  :

Pour R=10m/h, T=10°C,  $P_3=150 \text{ N/m}^2$

$P_3=150 \text{ N/m}^2$  quelque soit H car  $P_3=f(T,R)$

$$P = \text{Min} \{P_1, P_2, P_3\}$$

Alors : P=55kPa pour d=10cm

P=65kPa pour d=20cm

P=70kPa pour d=25cm

P=75kPa pour d=30cm

P=75kPa pour d=35cm

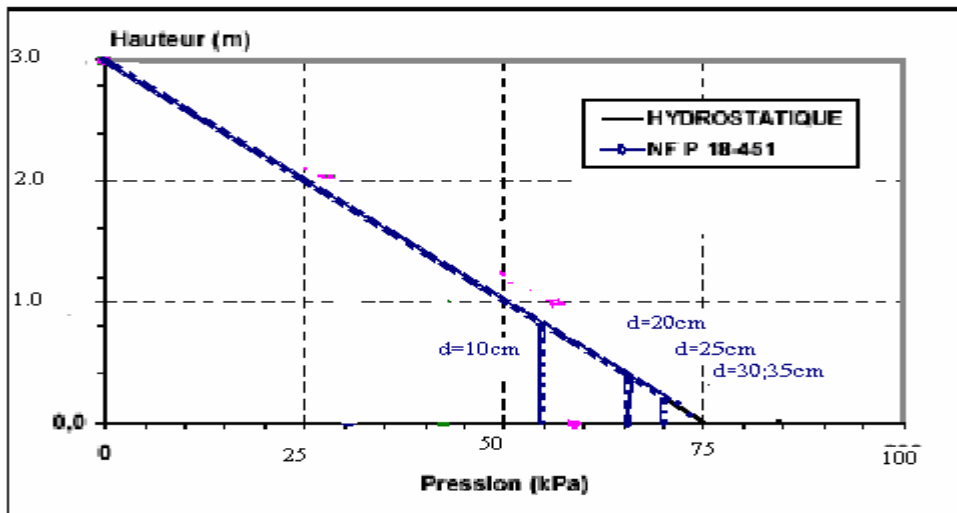


Fig.VI.1 : Représentation de la norme NF P 18-451 pour différentes épaisseurs pour H=3m

On remarque d'après la figure VI.1 que chaque épaisseur à son  $h_{\max}$  .

- H=7m

a) l'effet de la hauteur H (en m) de la levée de béton :  $P_1$

$$H=7m \rightarrow P_1 = \text{Min} \{ \gamma h, 150 \text{ kPa} \} = 150 \text{ kN/m}^2$$

b) l'effet d'arc :

d (cm)	<u>R=10m/h</u>
10	55
20	65
25	70
30	75
35	80

c) effet de durcissement du béton  $P_3$  :

Pour  $R=10\text{m/h}$ ,  $T=10^\circ\text{C}$ ,  $P_3=150\text{N/m}^2$   
 $P_3=150\text{N/m}^2$  quelque soit H car  $P_3=f(T,R)$   
 $P=\text{Min} \{ P_1, P_2, P_3 \}$

Alors : P=55kPa pour d=10cm  
P=65kPa pour d=20cm  
P=70kPa pour d=25cm  
P=75kPa pour d=30cm  
P=75kPa pour d=35cm

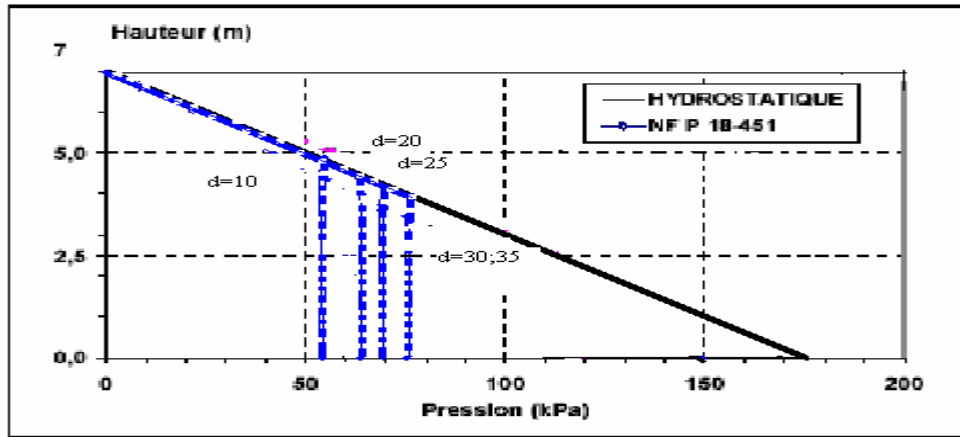


Fig.VI.2 : Représentation de la norme NF P 18-451 pour différentes épaisseurs pour H=7 m

On remarque d'après la figure VI.2 que  $h_{max}$  est compris entre 3 et 4,5m avec une épaisseur qui varie entre 10 et 35cm selon la norme française NF P 18 451.

➤ **LA NORME ALLEMANDE DIN 18218 :**

$$P_{max} = G \cdot C_2 \cdot K_T (0,48 \cdot V + 0,74)$$

- H=3m

$$P_{max} = 2500 \cdot 0,3 \cdot (145 - 3 \cdot 20) \cdot 10^{-2} \cdot (0,48 \cdot 10 + 0,74)$$

$$P_{max} = 35,31 \text{ kPa}$$

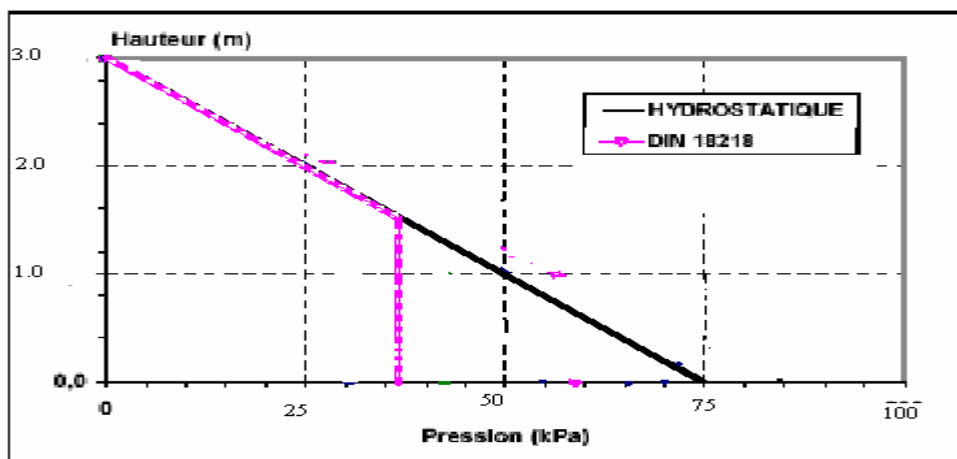


Fig.VI.3 : Représentation de la norme DIN 18218 pour H=3m

D'après la figure VI.3, on constate que  $h_{\max}$  est compris entre 1,2 et 1,6m.

- $H=7\text{m}$

$$P_{\max} = 2500 \cdot 0,3 \cdot (145 - 3 \cdot 20) \cdot 10^{-2} \cdot (0,48 \cdot 10 + 0,74)$$

$$P_{\max} = 35,31 \text{ kPa}$$

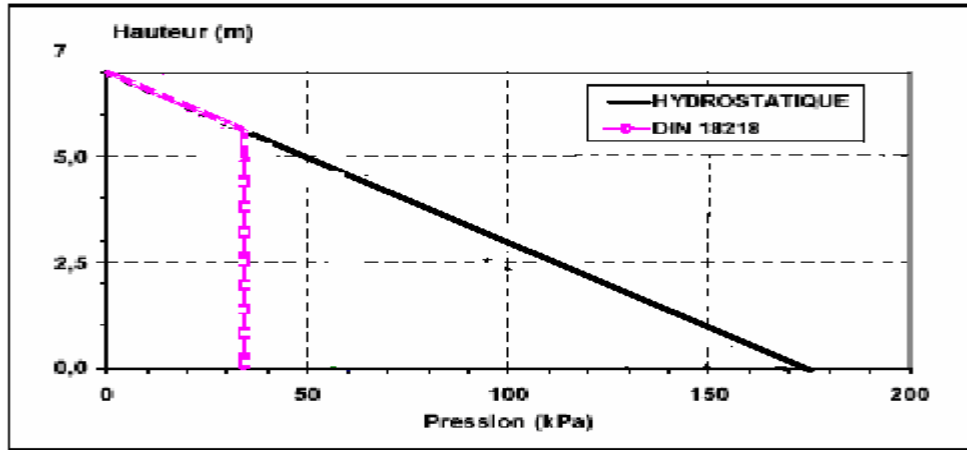


Fig.VI.4 : Représentation de la norme DIN 18218 pour  $H=7\text{m}$

D'après la figure VI.4 on observe que  $h_{\max}$  est entre 5 et 6m avec  $P_{\max}$  qui égale à constante 35,31kPa d'après la norme Allemande DIN 18218.

➤ **LA NORME CIRIA :**

$$P_{\max} = \min \begin{cases} G (C_1(V)^{1/2} + C_2 \cdot K_T (H - C_1(V)^{1/2})) \\ G \cdot H \end{cases}$$

- $H=3\text{m}$

$$P_{\max 1} = G (C_1(V)^{1/2} + C_2 \cdot K_T (H - C_1(V)^{1/2}))$$

$$P_{\max 1} = 2500 \cdot (1 \cdot 10^{1/2} + 0,3 \cdot (36/16 + 20)^2 \cdot (3 - 1 \cdot 10^{1/2}))$$

$$P_{\max 1} = 77,8 \text{ kPa}$$

$$P_{\max 2} = G \cdot H = 2500 \cdot 3 = 75 \text{ kPa}$$

$$\text{Alors } P = \min \{ 77,8, 75 \text{ kPa} \} = 75 \text{ kPa}$$

L'allure de profil de pression est la même d'une pression hydrostatique.



- $H=7\text{m}$

$$P_{\max 1} = G (C_1(V)^{1/2} + C_2 \cdot K_T (H - C_1(V)^{1/2}))$$

$$P_{\max 1} = 2500 \cdot (1 \cdot 10^{1/2} + 0,3 \cdot (36/16 + 20)^2 \cdot (7 - 1 \cdot 10^{1/2}))$$

$$P_{\max 1} = 107\text{kPa}$$

$$P_{\max 2} = G \cdot H = 2500 \cdot 7 = 175\text{kPa}$$

Alors  $P_{\max 2} = 150\text{kPa}$

$$P = \min\{107, 150\text{kPa}\} = 107\text{kPa}$$

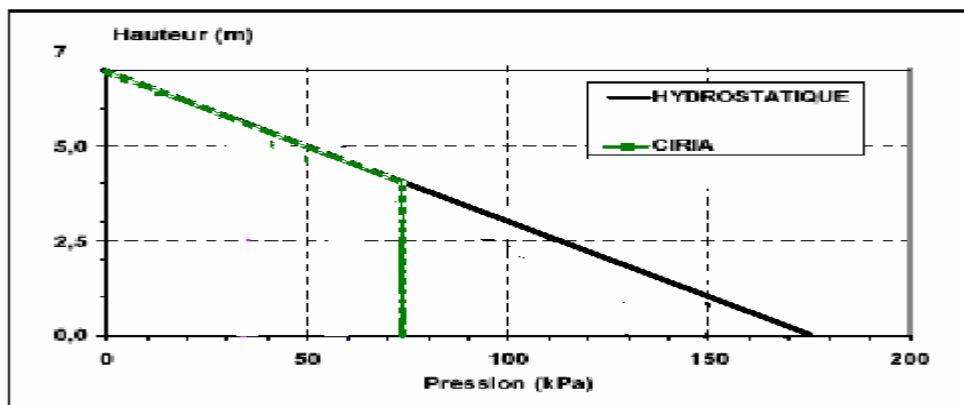


Fig.VI.5 : Représentation de la norme CIRIA pour  $H=7\text{m}$

Pour ce qui concerne la norme de CIRIA présentée sur la figure VI.5  $h_{\max}$  est entre 3 et 4m avec  $P_{\max}$  qui égale à 75kPa.

Vié a mené une étude comparative sur les formulations empiriques et les normes existantes de calcul des poussées du béton sur un coffrage. Le coffrage considéré mesure 7,5 m de hauteur et 200 mm d'épaisseur. Le béton présente une masse volumique de  $2,3 \text{ t/m}^3$  et contient 1,2% de fumée de silice. La vitesse de bétonnage est de 10m/h et la température est considérée égale à  $17^\circ\text{C}$ . La figure VI.6 montre une comparaison entre les trois normes.

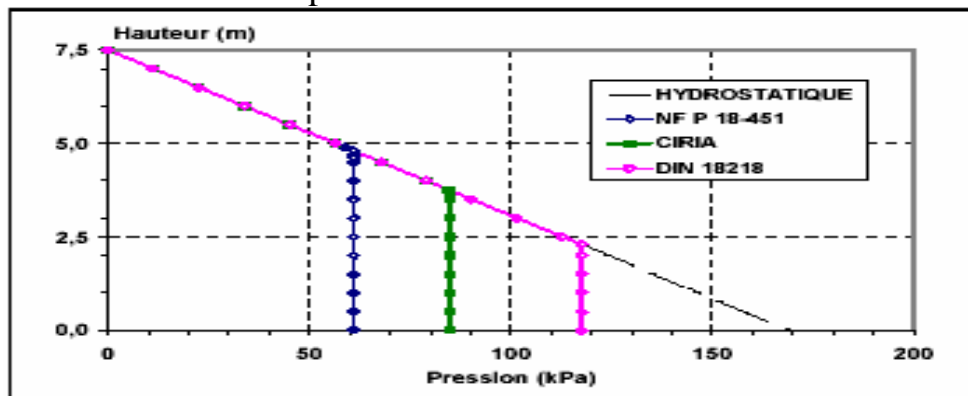


Fig.VI.6 : Comparaison des différentes normes de détermination du profil initial

On observe sur la figure VI.6 que les trois normes donnent une forte dispersion des valeurs que ce soit la hauteur sur laquelle la pression reste hydrostatique où sur la valeur maximale à prendre en compte pour dimensionner les coffrages. Néanmoins, on remarque que la pression reste hydrostatique sur une hauteur  $h_m=2,5$  m.

Mis à part le problème de calcul des poussées pour le dimensionnement des coffrages, il n'existe pas, à ce jour, de données sur l'évolution de cette pression au cours du temps. Or ce qui importe essentiellement dans la pratique est de savoir avec précision le temps à partir duquel on peut enlever les coffrages en toute sécurité. Pour une rotation optimale des coffrages, l'opération de décoffrage doit se dérouler le plus tôt possible et dès que la résistance du béton le permet. Ce qui nous amène à étudier l'ensemble des phénomènes qui se déroulent lors de la maturation du béton.

### **III-RECOMMANDATIONS ET REMARQUES GENERALES :**

#### **1-Mise en place du béton dans un coffrage ou sous eau :**

Il y a lieu de prendre des précautions, par exemple limiter la chute du béton frais à un maximum de 1m.

Dans le cas contraire, il y a risque :

- De provoquer la ségrégation ;
- De déformer ou d'ouvrir le coffrage ;
- De déplacer les écarteurs et/ou les armatures.

Le fait de déverser le béton depuis la partie supérieure d'un coffrage haut et mini d'un réseau d'armatures denses, va entraîner le risque de création de nids de gravier au fond du coffrage. Les premières quantités de béton vont voir leur mortier coller aux armatures, de sorte que le béton qui arrivera au fond du moule aura perdu une partie de mortier et formera un béton caverneux.

La ségrégation peut être évitée en conduisant le béton par une goutte ou par un tuyau de telle sorte que les armatures ne retiendront pas de mortier lors du déversement du béton.

#### **2-Bétonnage sous eau :**

Le bétonnage sous eau nécessite de résoudre deux problèmes : le premier concerne la formulation et le deuxième le transport jusqu'à l'endroit prévu sous eau.

La formulation doit être adoptée pour :

- Que le béton ne se délave pas dans l'eau (surtout s'il y a des mouvements relatifs entre l'eau et le béton) ;
- Que le béton soit fluide pour s'écouler en place sans ségrégation et se compactant de lui-même (béton auto-compactant).

Dans ce cas, l'utilisation des bétons spéciaux est recommandée.

Le béton est amené sur place via des bacs à ouverture automatique, via une trémie à bouchon ou d'autres techniques spéciales.

### **3-Serrage du béton :**

L'objectif du serrage ou du compactage du béton est d'augmenter sa compacité en expulsant l'air occlus introduit lors du malaxage, du transport ou du déversement dans le coffrage ( $\pm 15$  à  $20\%$  qu'il faut ramener à  $1$  ou  $2\%$ , sauf si la formule contient des entraîneurs d'air).

Ensuite, la consistance du béton peut être telle qu'il ne contourne pas les divers « obstacles » positionnés dans le coffrage (armature, écarteur, coin à 2 et à 3 dimensions, etc.).

L'air occlus ne remonte pas ou l'enrobage des armatures n'est pas correct à cause des caractéristiques rhéologiques du béton.

La « déformation » d'un béton frais se heurte aux forces de friction et de cohésion du matériau. Si le béton est « sec », il y a lieu d'y ajouter les forces capillaires. Cette résistance à la déformation est caractérisée par les propriétés rhéologiques du béton, comme la viscosité, le seuil de cisaillement.

Pour déformer un béton frais, il faut vaincre un seuil de cisaillement en appliquant une sollicitation mécanique à vitesse (ou fréquence) adaptée à la situation.

### **4-Eléments constituant un coffrage :**

Un coffrage traditionnel est constitué d'une poutre, tirant en acier à béton, contre-fiche, ancrage, double longrine, planche bétonnée dans le support et dispositif de serrage.

### **IV-CONCLUSION :**

Le béton frais a tendance à déformer les coffrages. Ces déformations peuvent entraîner la rupture et l'effondrement du coffrage.

Le délais de décoffrages est de :

Quelques heures en fabrication ;

Quelques jours en traditionnel (minimum 4 jours conseillé) ;

Quelques semaines ou quelques mois en travaux de fondations.

La vitesse de bétonnage doit être régulière, elle intervient de deux façons :

- Les couches successives de béton frais doivent être parfaitement liées et correspondre à des intervalles de fabrication rapprochée.

La vibration crée cette liaison en pénétrant dans la couche précédente sur environ la moitié de la hauteur.

- La durée de bétonnage c'est-à-dire le temps qui sépare les instants entre les quels ont été, bétonnés les deux points extrêmes qui seront décoffrés en même temps doit rester négligeable devant la durée précédant ce décoffrage.

Exemple : Un décoffrage après 48 heures est déconseillé si le bétonnage a duré 5 ou 6 heures mais ne pose pas de problème s'il a duré 2 heures environ.

# CONCLUSION

L'ingénierie des bétons a acquis depuis ces dernières années un grand nombre de connaissances sur la microstructure, le comportement rhéologique et la maturation des matériaux à base de ciment. Toutefois, leur application à une prédiction de la poussée latérale d'un béton frais sur le coffrage reste encore très délicate.

Des chercheurs ont ainsi développé des formulations empiriques de calcul de la pression.

Compte tenu du nombre de paramètres mis en jeu, ces formules ne s'appliquent qu'à des cas très particuliers. Les rares travaux expérimentaux qui ont été faites sur la mesure de la pression du béton sur les coffrages, permettent néanmoins de dire que :

- La poussée latérale (horizontale) initiale du béton sur un coffrage n'évolue pas linéairement avec la hauteur du coffrage. La poussée est égale à la pression hydrostatique sur une hauteur d'environ 2,5 mètres et y est inférieure en pied de coffrage.
- La formulation du mélange, le procédé de mise en œuvre et de serrage du mélange, les conditions hygrométriques et climatiques environnantes, les caractéristiques du coffrage sont les paramètres qui conditionnent le comportement du matériau et en particulier sa poussée sur un coffrage.
- L'influence due à l'augmentation de la hauteur de pâte sur le temps d'annulation de la pression interstitielle est moins sensible.
- La vibration du mélange lors de la mise en œuvre permet une diminution plus rapide des pressions.
- Concernant la poussée, les profils des pressions interstitielle et latérale sont hydrostatiques de l'état initial jusqu'à leurs annulations. Pendant cette période, la cinétique d'évolution des deux types de pression est parfaitement identique. Une fois que la pression latérale est nulle la pression interstitielle passe en état dépressionnaire.
- Pour un mélange de pâte pure de ciment, les pressions initiales sont égales aux pressions hydrostatiques d'un liquide de même densité.

- Dans le cas d'un mélange de pâte et de granulats, le profil de pression est hydrostatique tant que l'on ne dépasse pas un certain seuil de concentration granulaire et une certaine hauteur de coffrage. En effet, au-delà de ces seuils, les phénomènes de frottement et d'enchevêtrement des grains ne sont plus négligeables et les pressions deviennent inférieures aux pressions hydrostatiques.
- La diminution des pressions au jeune âge trouve essentiellement son origine dans les processus physico-chimiques liés aux réactions d'hydratation du ciment. L'ensemble de ces processus donne naissance à des contraintes internes dans le matériau (succion). Cela se traduit, avant la prise du ciment, par des déformations de retrait et de baisse de la pression totale.
- La diminution des pressions est d'autant plus lente que le rapport E/C est grand.
- La chute de pression est d'autant plus rapide que la hauteur de matériau est importante.

Mis à part le problème de calcul des poussées pour le dimensionnement des coffrages, il n'existe pas, à ce jour, de données sur l'évolution de cette pression au cours du temps. Or ce qui importe essentiellement dans la pratique est de savoir avec précision le temps à partir duquel on peut enlever les coffrages en toute sécurité. Pour une rotation optimale des coffrages, l'opération de décoffrage doit se dérouler le plus tôt possible et dès que la résistance du béton le permet. Ce qui nous amène à étudier l'ensemble des phénomènes qui se déroulent lors de la maturation du béton.

Bien que complexes, les normes actuelles de dimensionnement des coffrages intègrent progressivement ces paramètres dans leurs formulations.

Malheureusement, dans un souci de sécurité, les entreprises fondent actuellement encore leur calcul de dimensionnement des coffrages sur une hypothèse pénalisante (c'est-à-dire une pression équivalente à une pression hydrostatique).

Il est nécessaire alors de mettre en œuvre un programme expérimental visant à améliorer nos connaissances sur le comportement du béton au sein d'un coffrage.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] DREUX, G : « Nouveau guide du béton » .Eyrolles.1981.
- [2] KEDJOUR, N : « Propriétés et pathologie du béton » .OPU.1998.
- [3] DEGEIMBRE, R : « Technologie des bétons » .ULg.2003.
- [4] BARON, J et OLIVIER, J.P : « Les bétons bases et données pour leur formulation » .Eyrolles.1996.
- [5] VOROBIEV, V : «Matériaux de construction » .Mir.1967.
- [6] DURIEZ, M : « Nouveau traité de matériaux de construction » .Dunod.1961.
- [7] KOMAR, .A : « Matériaux et éléments de construction » .Mir.1989.
- [8] OLIVIER, E : « Technologie des matériaux de construction » .Collection Technique de la Construction.1978.
- [9] ADAM, M : «Aspects du béton » .Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.1971.
- [10] BARON, J et SAUTEREY, R : « Le béton hydraulique » .Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1982.
- [11] CORMON, P : « La fabrication du béton » .UTI.1977.
- [12] GORISSE, P : « Essai et contrôle des bétons » .Eyrolles.1978.
- [13] ADAM, M : « Guide pratique pour l'emploi des ciments » .Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics.1965.
- [14] ADAM, M : « Guide pratique pour l'emploi des ciments » .UTI-ITBTP.1982.
- [15] DEBRI, S et SKOUDARLI, A: « Elaboration d'un ciment à prise rapide » .ENP.1997.
- [16] PAPADAKIS, M: « Les industries, leurs productions, leurs nuisances » .IPN.1970.

- [17] ADAM, M : « Aspects du béton ».ITBTP.1971.
- [18] Notes de cours A.CHIKH : « La mesure des contraintes totales dans les expérimentations de parois moulées ».ENP.
- [19] ANDRIAMANANTSILAVO, Ny Riana: « Comportement des matériaux cimentaires ».Université de Bretagne Sud.2003.
- [20] Cours de l'Université de SHERBROOKE : « L'hydratation du ciment Portland ».
- [21] Notes de cours A.CHIKH : « Murs en béton banché ».ENP.
- [22] ANDRIAMANANTSILAVO, Ny Riana ; AMZIANE, Sofiane et BAUDEAU, Philippe : « Etude expérimentale sur l'évolution de la pression exercée par une pâte de ciment contre un coffrage pendant la prises ».Conférence de génie mécanique ASCE.2002.
- [23] Notes de cours A.CHIKH : « Chimie des ciments ».ENP.
- [24] AMZIANE, S et BAUDEAU, P: « Influence de la concentration et de la dimension des granulats vis-à-vis de la poussée du béton frais sur une paroi coffrante ». Université de Bretagne Sud.



# ANNEXES

## ANNEXE 1 :

### GRANDEURS CARACTERISTIQUES DES CIMENTS :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle soit sur la poudre, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF P 15 403.

Classes de résistance :

#### Caractéristiques de la poudre :

La surface spécifique Blaine : (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF P 15 442).elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$  différente suivant la classe des ciments,la surface spécifique Blaine est généralement comprise entre 2800 et 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

#### La masse volumique apparente :

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre éléments inclus).

Elle est de l'ordre de  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

#### La masse volumique absolue :

Elle représente la masse par unité de volume (vides entre les éléments exclus).elle varie de 2900 à  $3150 \text{ kg}/\text{m}^3$  suivant le type de ciment.

Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal » :

Le début de prise :

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat (aiguille de  $1\text{mm}^2$  de section pesant 300g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Les modalités de l'essai font l'objet de la norme NF P 15 431.

Les ciments de classe 35 et 45 ont à 20° un temps de prise >1h30mn.

Les ciments de classe 55 et HP ont à 20° un temps de prise >1h.

### **Les résistances caractéristiques garanties :**

En dehors des valeurs nominales des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs minimales garanties à 2,7 et 28 jours .Ces résistances sont mesurés sur « mortier normal ».

### **Le retrait :**

Le retrait mesuré à 28 jours sur mortier normal doit être <800µm pour la classe 45 et 1000µm pour les autres classes.

### **Les caractéristiques chimiques :**

Elles sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives :

- la teneur en anhydride sulfurique ( $\text{SO}_3$ ) <4%
- la teneur en magnésie ( $\text{MgO}$ ) <5%
- la teneur en ions chlore<0.05%

## **PRISE ET DURCISSEMENT DU CIMENT :**

Les réactions qui se produisent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes :

Le ciment portland contient 4 constituants principaux :

.Le silicate tricalcique :  $\text{SiO}_2$  ,3CaO ou par abréviation ( $\text{C}_3\text{S}$ )

.Le silicate bicalcique :  $\text{SiO}_2$  ,2CaO ou par abréviation ( $\text{C}_2\text{S}$ )

.L'aluminate tricalcique :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,3CaO ou par abréviation ( $\text{C}_3\text{A}$ )

.L'alumino-ferrite tetracalcique : 4CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou par abréviation ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

Ces constituants anhydres donnent en présence d'eau naissance à des silicates et des aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau .Il se forme un gel microcristallin à l'origine du phénomène dit de prise.

C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques .Le ciment durci est une véritable roche artificielle qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.

Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par 3 phases successives :

### **Phase dormante :**

La pâte de ciment (ciment+eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du liant).en fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

### **Début et fin de prise :**

Après 1 ou 2 heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur ; la fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en matériau rigide.

### **Durcissement :**

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit .La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

## **INFLUENCE DES PROPRIETES DES CIMENTS SUR LES PROPRIETES DES BETONS :**

### **Résistance à la compression :**

Il y a proportionnalité entre la résistance à la compression d'un béton conservé à 20°C et la résistance normale du ciment.

### **Type :**

Il est en relation directe avec l'environnement de l'ouvrage.

### **Temps de début de prise :**

Il influe directement sur la durée pendant laquelle un béton reste ouvrable, c'est-à-dire peut être transporté et mis en place.

### **Stabilité et teneur en oxyde de magnésium :**

Après durcissement du béton, la chaux libre (CaO) toujours présente dans les ciments risque de gonfler par réaction (expansion) c'est pourquoi la teneur en magnésie (oxyde de magnésium MgO) est limitée à 5% ==> essai de stabilité.

### **Retrait :**

Il influe sur la fissuration des bétons, mais son impact réel reste à déterminer.

### **Teneur limite en sulfates :**

Un excès d'ions sulfates peut provoquer des gonflements par réactions après prise avec l'aluminate tricalcique.

### **Teneur en chlorures :**

Les ions Cl<sup>-</sup> déclenchent le processus de corrosion des armatures du béton armé ou des câbles de précontrainte.

### **Pouzzolanicité :**

Elle rend les ciments pouzzolaniques capables de fixer la chaux, ce qui évite sa dissolution en présence d'eaux pures ou acides.

### **Remarque importante :**

Toutes ces propriétés n'excluent pas des tests supplémentaires nécessaires pour vérifier la compatibilité du ciment utilisé avec certains adjuvants, notamment les plastifiants.

### **Indice d'hydraulicité d'un ciment :**

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique.

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= \text{(fraction acide/fraction basique)} \\ &= (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO}) \end{aligned}$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice est plus élevé :

- quand on a  $\mathbf{I} < \mathbf{0.5}$  le ciment est dit basique (Portland)
- quand on a  $\mathbf{I} > \mathbf{0.5}$  le ciment est dit neutre (riche en laitier)
- quand  $\mathbf{I} \approx \mathbf{1}$  le ciment est dit acide (conventionnellement) ; ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non pas de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$\mathbf{1.40} < \text{CaO} / \text{SiO}_2 < \mathbf{1.45}$$

$$\mathbf{0.45} < \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 < \mathbf{0.50}$$

## ANNEXE 2 :

La nomenclature des différents produits utilisés :

	Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante
Eau	$H_2O$	H	Eau
Constituants Chimiques	CaO	C	Chaux
	$SiO_2$	S	Silice
	$Al_2O_3$	A	Alumine
	$Fe_2O_3$	F	Oxyde ferrique
	$Na_2O, K_2O$	N, K	Alcalis
	MgO	M	Magnésie
	$CaSO_4$	Cs	Sulfate de calcium (Anhydrite)
	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CsH_2$	Sulfate de calcium (Gypse)
Constituants hydrauliques	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	Aluminate tricalcique
	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$	Aluminoferrite tétracalcique
	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	Silicate tricalcique
	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	Silicate bicalcique
Constituants hydratés	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	$C_3S_2H_3$	Silicate de calcium hydraté (Tobermorite)
	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$	$C_4AH_{13}$	Aluminate de calcium hydraté
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	$C_3AH_6$	
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$	$C_3ACs_3H_{31}$	Sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite)
	$Ca(OH)_2$	CH	Chaux hydratée

### ANNEXE 3 :

#### Techniques de coulage du béton.

Technique	Matériels	Avantages/Inconvénients
Déversement	<ul style="list-style-type: none"><li>– Une benne à trémie servant à transporter et à vider le béton au dessus du coffrage</li><li>– Une goulotte utilisée pour limiter la hauteur de chute à 1m, de façon à éviter la ségrégation du béton,</li><li>– Une grue pour soulever la benne.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Peut conduire à une saturation des grues.</li></ul>
Injection	<ul style="list-style-type: none"><li>– Une trémie dans laquelle est versé le béton préalablement malaxé,</li><li>– Un système de pompage (à écrasement de tube flexible ou à piston)</li><li>– Un ensemble de canalisation permettant de transporter le béton jusqu'au lieu de bétonnage.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Ne nécessitant pas l'utilisation des grues,</li><li>– Pratique lorsque l'accès des bennes de distribution est difficile,</li><li>– Nécessite des conditions particulières sur la composition du béton (granulométrie, consistance, teneur en éléments fins).</li></ul>

## Les différents états de l'eau dans le béton.

Etat	Caractéristiques
Chimiquement liée	Entrant dans la composition des hydrates et faisant partie intégrante du C-S-H.
Zéolitique	Eau retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogènes.
Absorbée à la surface des solides	Eau adsorbée à la surface des solides grâce aux forces intermoléculaires de Van der Waals (adsorption physique) et des forces électrostatiques (liaisons hydrogènes).
Capillaire	<p>Eau n'ayant pas réagi avec le ciment et se trouvant dans les capillaires. Suivant la taille des pores capillaires, elles se trouve plus ou moins soumise à des forces superficielles.</p> <p>On distingue ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'eau libre : contenue dans les gros pores dont le diamètre est supérieur à 0,05 <math>\mu\text{m}</math>,</li> <li>– L'eau non libre : retenue dans les pores grâce aux forces capillaires et se situant dans les plus petits pores (0,05 <math>\mu\text{m}</math> à 0,005 <math>\mu\text{m}</math>). Son départ influe sur le retrait du matériau</li> </ul>

## ANNEXE 4 :

### DESCRIPTION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX :

Pour reproduire les phénomènes qui se déroulent dans une paroi coffrante, les chercheurs ont conçu un dispositif constitué d'une colonne tubulaire d'une hauteur de 1.30 m (figure 1), 110 mm de diamètre extérieur et d'une épaisseur de 5.3mm.

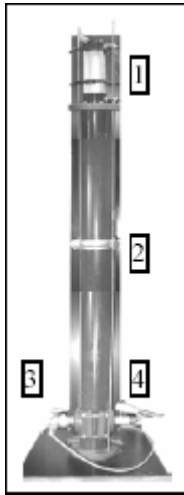


Fig.1: Vue générale du dispositif [22]

- 1- Vérin pneumatique.
- 2- Colonne tubulaire.
- 3- Capteur de pression interstitielle.
- 4- Capteur de pression latérale totale.

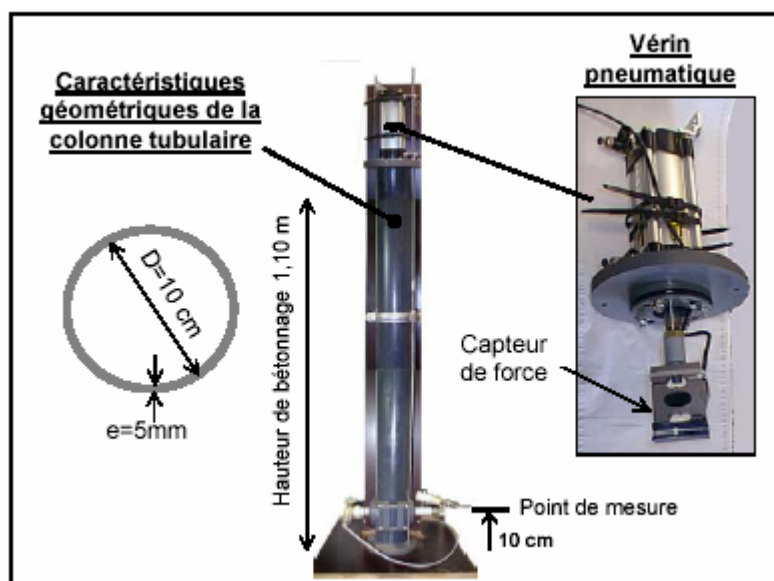


Fig.2 : Montage expérimental – Colonne tubulaire [19]



Deux types de capteurs de pression, (figures 4 et 5) spécialement conçus, sont reliés à une centrale de mesure.

### 1 Le capteur de pression latérale :

La mesure de la pression latérale se fait généralement avec un capteur de pression à membrane mis en contact direct avec le matériau.

Le principe de fonctionnement du dispositif original permettant la mesure de la pression latérale exercée par un matériau cimentaire qui fait prise, est fondé sur la mise en œuvre d'une contre pression d'air régulée.

Cette contre-pression est continuellement équilibrée à la pression exercée par le matériau.

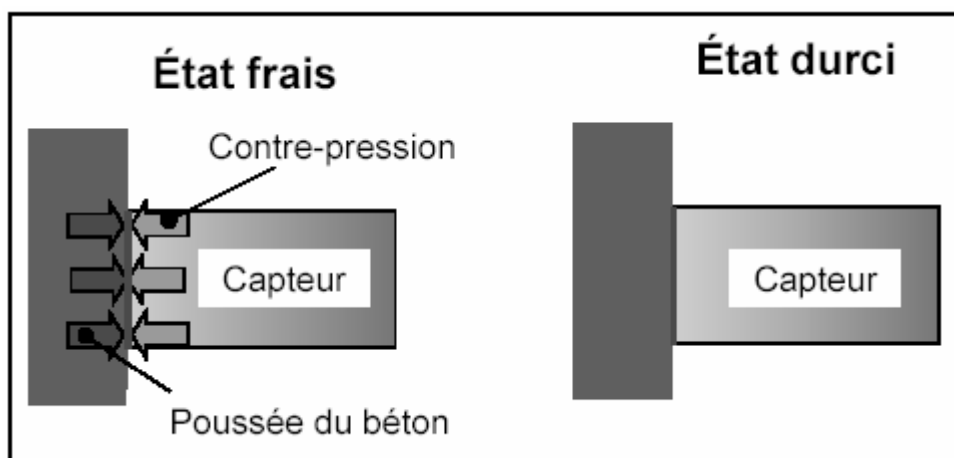


Fig.3 : Principe de mesure de la pression latérale totale [19]

Le dispositif est composé de deux cellules interconnectées (figure 4). La première cellule (1) est équipée d'un capteur de pression (2) liée à un distributeur d'air comprimé (3). Dans la deuxième cellule (4), nous avons intégré un capteur de déplacement (5) dont la tête est solidaire d'une membrane élastique très fine en latex. L'autre face de la membrane est en contact direct avec le matériau testé.

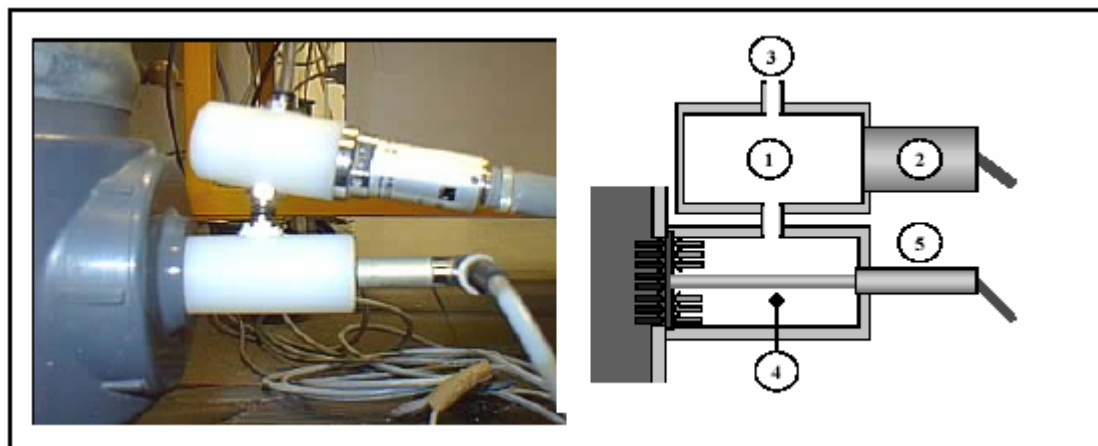


Fig.4 : Système de mesure de la pression latérale totale [19]

## 2 Le capteur de pression interstitielle :

La mesure de la pression interstitielle dans le sol sous contrainte est généralement réalisée en laboratoire à l'aide de l'appareil triaxial. Ce type d'essai est très complexe à réaliser pour des matériaux fluides tels que la pâte de ciment à l'état frais. C'est la raison pour laquelle un montage spécifique est développé (figure 5). [22]

La pression interstitielle est mesurée à l'aide d'un capteur de pression (1) fixé sur un bloc désaérateur (2) saturé d'huile et séparé du matériau par un dispositif de filtration de l'eau en fibre de coton compactée. L'huile hydrofuge dans la chambre se met en équilibre de pression avec l'eau présent dans la pâte par transfert de pression à travers le filtre.

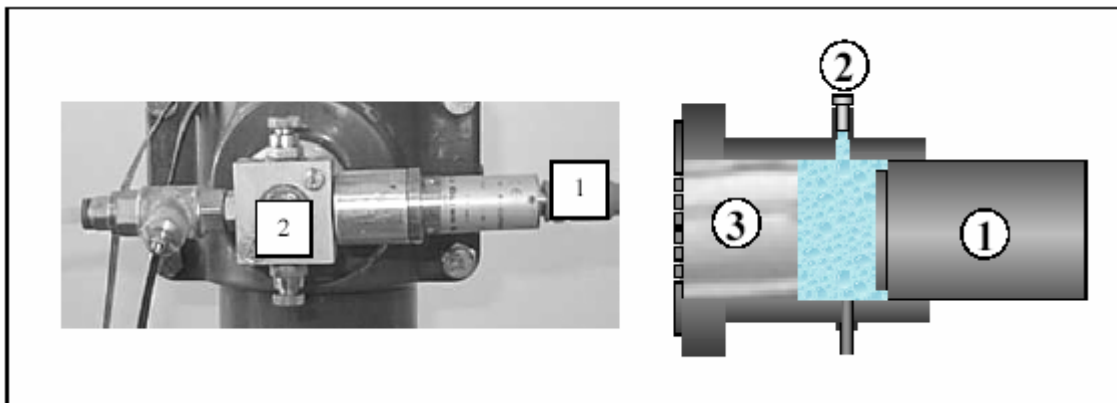


Fig.5 : Système de mesure de la pression interstitielle [19]

- 1- capteur de pression
- 2- bloc désaérateur

### **TECHNIQUE DE MESURE :**

Le dispositif expérimental schématisé sur la figure.6 est constitué essentiellement :

- d'un coffrage métallique (figs. 2-a et 2-b),
- de cinq capteurs de force (fig. 2-c),
- de vingt-quatre capteurs de déplacement,
- d'un capteur de pression,
- d'une centrale de mesure.

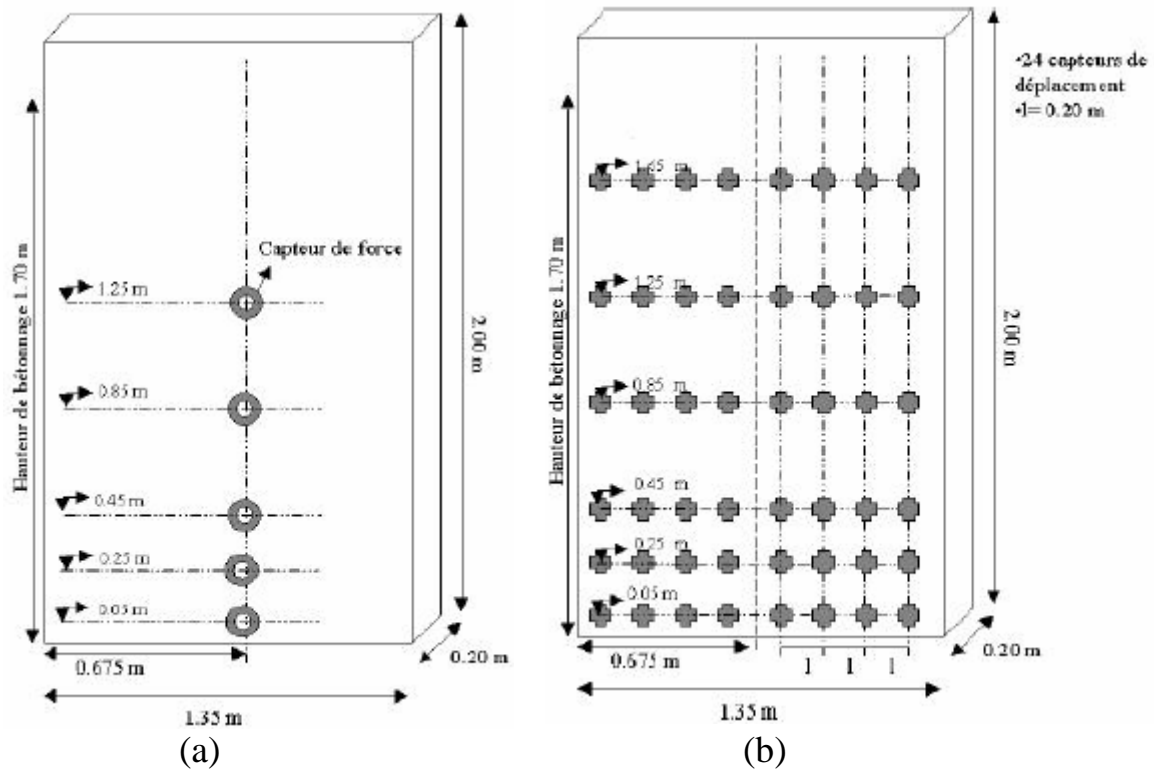


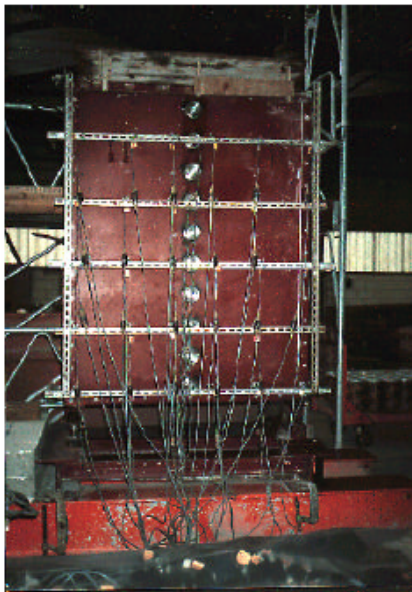
Fig.6 : Caractéristiques géométriques de la paroi coffrante [24]

(a) : emplacement des capteurs de force [24]

(b) : emplacement des capteurs de déplacement [24]

Vue de face

vue de profil



(a)

(b)

(c)

Fig.7 : Montage expérimental [24]

- (a) : vu de face du coffrage [24]
- (b) : vu de profil du coffrage [24]
- (c) : capteur de force [24]

## ANNEXE 5 :

Dissolution et hydratation des différents composants du ciment.

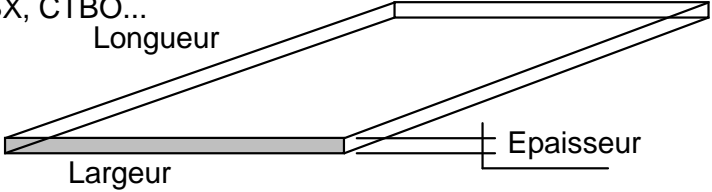
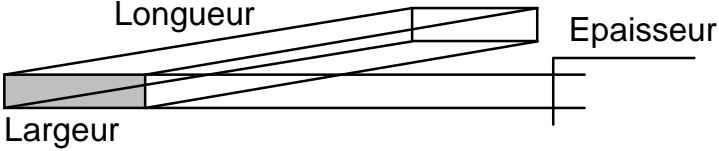
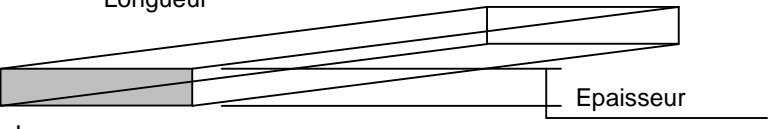
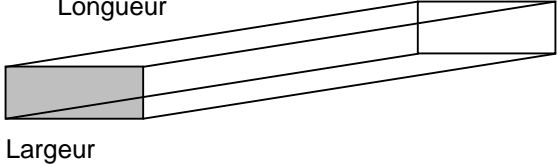
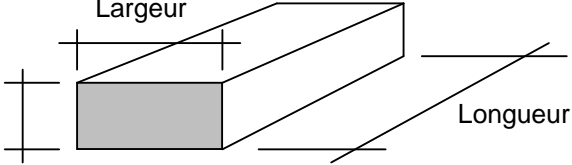
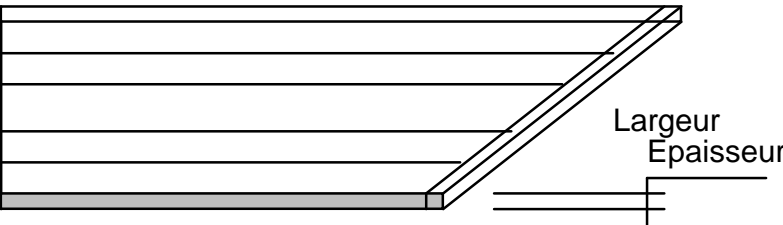
Phase	Dissolution	Réaction
Gypse	$C_2H_2 \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{-}$ $+ 2H_2O$	- Formation de l'étringite : $25H_2O + 6Ca^{++} + 2Al(OH)_4^{-} + SO_4^{-} + 4OH^{-} \rightarrow [Ca_2Al(OH)_6]_2 Ca_2(SO_4)_3, 25 H_2O$
C <sub>3</sub> A	$C_3A + 6H_2O \rightarrow 3Ca^{++} + 2Al(OH)_4^{-} + 4OH^{-}$	- Autres réactions du C <sub>3</sub> A : $2C_3A + 15H_2O \rightarrow C_2AH_8 + C_4AH_{13}$ $C_2AH_8 + C_4AH_{13} \rightarrow 2C_3AH_6 + 9H_2O$
C <sub>4</sub> AF	Le C <sub>4</sub> AF réagit de la même manière que le C <sub>3</sub> A en substituant aux aluminates des alumino-ferrites	
C <sub>3</sub> S	$C_3S + 3 H_2O \rightarrow 2Ca^{2+} + H_2SiO_4^{2-} + 4OH^{-}$	- Formation des silicates de calcium hydratés (CaO) <sub>x</sub> - (SO <sub>2</sub> ) - (H <sub>2</sub> O) <sub>y</sub> noté "C-S-H" : $H_2SiO_4^{2-} + 1,5Ca^{2+} + OH^{-} + H_2O \rightarrow (CaO)_{1,7} - (SO_2) - (H_2O)_4$
		- Formation des hydroxydes de calcium (Ca(OH) <sub>2</sub> ou "CH") appelé "portlandites". $Ca^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Ca(OH)_2$
C <sub>2</sub> S		$C_2S + 3H_2O \rightarrow C-S-H + Ca(OH)_2$

Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment.

Période	Processus chimique	Processus physique
Gâchage	Dissolution rapide des constituants du ciment, formation du C-S-H et d'étringite.	Fort dégagement de chaleur (1er pic thermique).
Dormante	Augmentation rapide du pH et de la teneur en $\text{Ca}^{2+}$ de l'eau de gâchage ce qui induit un ralentissement de la dissolution des constituants du ciment. Formation lente de C-S-H et d'étringite et sursaturation en chaux de la phase aqueuse.	Inertie thermique et augmentation lente de la viscosité.
Prise	Accélération de la dissolution des constituants du ciment grâce à la diminution de la teneur en $\text{Ca}^{2+}$ par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; Hydratation de $\text{C}_3\text{S}$ pour donner du C-S-H et de la portlandite,	Augmentation du flux thermique, solidification et diminution de la porosité.
Ralentissement	Epuisement du gypse et formation du monosulfo-aluminate de calcium par la réaction des ions sulfates (provenant de l'étringite) avec le reste des aluminates ; Accélération de l'hydratation des $\text{C}_3\text{S}$ et $\text{C}_2\text{S}$ .	Deuxième pic thermique et diminution de la porosité.
Durcissement	Ralentissement des réactions du fait que les grains anhydres sont recouverts d'hydrate de plus en plus épais.	Diminution du flux thermique et de la porosité.

# ANNEXE :

## Caractéristiques dimensionnelles des bois

Description physique et dénomination des bois de coffrage.	Longueurs (cm)	Largeurs (cm)	Épaisseurs
Panneaux de contreplaqué CTBX, CTBO... Longueur  Largeur Épaisseur	<b>250</b> <b>300</b>	<b>122</b>	<b>3 mm</b> <b>5 mm</b> <b>10 mm</b> <b>15 mm</b> <b>19 mm</b> <b>22 mm</b> <b>25 mm</b>
Planches Longueur  Largeur Épaisseur	<b>200 à</b> <b>400</b>	<b>10 minimum</b>	<b>27 mm</b> <b>40 mm</b>
Bastaings Longueur  Largeur Épaisseur	<b>200 à</b> <b>600</b>	<b>15</b> <b>18</b>	<b>5,5 cm</b> <b>6,5 cm</b>
Madriers Longueur  Épaisseur Largeur	<b>300 à</b> <b>600 cm</b>	<b>18</b> <b>20</b>	<b>7,5 cm</b>
CHEVRONS Longueur  Épaisseur Largeur	<b>200 à</b> <b>500 cm</b>	<b>6,5</b> <b>7,5</b> <b>10,5</b>	<b>6,5</b> <b>7,5</b>
Panneaux standards. Longueur  Largeur Épaisseur	<b>100</b> <b>150</b> <b>200</b> <b>250</b>	<b>50</b>	<b>27 mm</b>

## Caractéristiques mécaniques des variétés de bois

<u>Catégories usuelles</u>	$\sigma_{adm}$ de flexion daN/cm <sup>2</sup>	$\tau_{adm}$ daN/cm <sup>2</sup>	$\sigma_{ct}$ daN /cm <sup>2</sup> compression Transversale	Module d 'Young Elasticité long daN / cm <sup>2</sup>
Contreplaqué CTBX, CTBO, Okoumé...	50			40 000
Résineux catégorie II (bastaings et madriers)	80	10	17	90 000
Chêne catégorie II (bastaings et madriers)	90	12	25	100 000