

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir

Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj Faculté

Des Sciences et de la Technologie

Département Génie Civil

جامعة محمد البشير الابراهيمى

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

THÈME:

Effet d'hydrofuge SIKA
sur les performances physicomécanique du béton
ordinaire

Préparé par :

Nahoui layachi

Laieb moussa

Encadreur : Dr. GUELMINE Layachi

2019/2020

DÉDICACES

*Avant tout je tiens à remercier le bon dieu le seul et l'unique qui
m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes
épreuves de la vie*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mon chère père et ma mère . ma femme mes enfants mes frère et mes
sœurs mon collègue avec qui j'ai réalisé ce projet*

Ainsi qu'à tous mes amis

Layachi

DÉDICACES

*Avant tout je tiens à remercier le bon dieu le seul et l'unique qui
m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes
épreuves de la vie*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mon chère père et ma mère .ma femme ma fille 'tasnime' mes frère et
mes sœurs mon collègue avec qui j'ai réalisé ce projet*

Ainsi qu'à tous mes amis

Moussa

REMERCIEMENTS

*Nous remercions vivement notre encadreur monsieur Dr :
Layachi MELMME pour les efforts qu'on a déployés
pour nous aider, conseiller, encourager, et corriger*

*Nous remercions encore tous ceux qui ont participé à la
réalisation de projet*

*Nous tenons à remercier également tout le corps enseignant
et administratif qui a contribué à notre formation*

Résumé

L'utilisation des adjuvants dans les bétons et les mortiers est devenue une technique indispensable pour la majorité d'applications dans le domaine du génie civil . A cet effet, à travers ce travail expérimental on vise étudier l'effet du dosage en hydrofuge de type SIKA sur les caractéristiques à l'état frais (étalement par la table à secousses) et à l'état durci (résistance à la flexion et à la compression) des bétons ordinaire.

Ce travail consiste à réviser les études antérieurs sur l'effet de adjuvant hydrofuge de type SIKA sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires.

Cette étude a permis de comparer entre les résultats antérieurs pour tirer des conclusions sur la formule optimale du béton qui assurant à la fois une capillarité et une porosité basses ainsi qu'une résistance mécanique acceptable des bétons adjuvantes.

Mots Clés : Adjuvant, Hydrofuge, Béton, Mortier, résistance à la compression

Abstract

The use of admixtures in concrete and mortars has become an indispensable technique for the majority of applications. To this end, through this experimental work the aim is to study the effect of the dosage of SIKA type water repellent on the characteristics in the fresh state (spreading by the shaking table) and in the hardened state (resistance to bending and compression) of ordinary concrete.

This work consists of revising previous studies on the effect of SIKA-type water-repellent admixture on the physical and mechanical properties of cementitious materials.

This study made it possible to compare between the previous results to draw conclusions on the optimal formulation of concrete which ensures both low capillarity and porosity as well as an acceptable mechanical resistance of admixtures.

***Key words:* Admixture, Water repellent, Concrete, Mortar, compressive strength.**

ملخص

أصبح استخدام المواد المضافة في الخرسانة والملاط تقنية لا غنى عنها لغالبية التطبيقات. تحقيقاً لهذه الغاية ، من خلال هذا العمل التجريبي ، الهدف هو دراسة تأثير جرعة طارد المياه من نوع سيكا على الخصائص في الحالة الطازجة (الانتشار بواسطة طاولة الاهتزاز) وفي الحالة المتصلبة (مقاومة الانحناء و ضغط) الخرسانة العادية.

يتكون هذا العمل من مراجعة الدراسات السابقة حول تأثير المزيج الطارد للماء من نوع سيكا على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد الإسمنتية. أتاحت هذه الدراسة إمكانية المقارنة بين النتائج السابقة لاستخلاص النتائج بشأن الصيغة المثلى للخرسانة والتي تضمن انخفاض الشعيرات الدموية والمسامية وكذلك المقاومة الميكانيكية المقبولة للمواد المضافة.

الكلمات المفتاحية: خليط ، طارد للماء ، خرسانة ، مونة ، مقاومة الضغط

Liste des figures

Figure 1: Diagramme de dimensionnement de gravier.....	07
Figure 2 : perte d'affaissement en fonction du temps.....	18
Figure 3: effet de la température du béton frais sur l'affaissement.....	19
Figure 4: Effet de la température du béton frais sur la qualité d'eau.....	19
Figure 5 : l'ouvrabilité en fonction de teneur en eau.....	25
Figure 6: l'effet d'entraineur d'air sur la structure du matériau.....	28
Figure 7: l'effet d'entraineur d'air la résistance en compression.....	29
Figure 8: la classe de consistance (ouvrabilité) des adjuvants en fonction du temps.....	32
Figure 9: Absorption capillaire entre mortier témoin et mortier avec hydrofuges.....	34
Figure 10 : exemple d'étiquette devant figurer sur les emballages des adjuvants.....	38
Figure 11 :Action des traitements de surface De gauche à droite : Enduits, bouche-pores et couvrant la surface interne.....	39
Figure 12 : Effet d'un produit hydrofuge sur la capillarité et Effet perlant.....	42
Figure 13 : Schématisation des réactions des hydrofuges de la famille des silicones.....	46
Figure 14 : Schématisation des réactions du silane (hydrolyse et condensation).....	48
Figure 15: Balance électronique.....	57
Figure 16 : Moules normalisés.....	57
Figure 17: Eprouvettes cubiques.....	58
Figure 18 : Presse pour les essais de flexion et de compression sur éprouvettes 4×4×16cm ³	59
Figure 19 : Principe d'essai de résistance à la flexion.....	60
Figure 20 : Principe d'essai de résistance à la compression.....	61
Figure 21 : Etuve électrique.....	62
Figure 22: Perméabilmètre à l'eau.....	63
Figure 23 : Essais de perméabilité à l'eau.....	64
Figure 24 : Image des éprouvettes des trois mortiers pour les essais d'absorption capillaire.....	67
Figure 25. L'absorption d'eau par capillaire durant 24 heures d'immersion partielle (5mm).....	68

Figure 26. Résistance à la flexion pour différents mortiers.....	70
Figure.27.Résistance à la compression pour différents mortiers, éprouvettes 4x4x16 cm3.....	71
Figure.28 : Résistance à la compression pour différents bétons, éprouvettes 15x15x15 cm3.....	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Choix de granulats dans le béton.....	04
Tableau 2 : Classes des granulats.....	06
Tableau 3 : Refus cumulés sur tamis.....	07
Tableau 4 : Caractéristique de la pièce à fabriquer en fonction des dimensions (max) des granulats.....	08
Tableau 5 : L'influence de la Nature de gravier sur le béton.....	09
Tableau 6 : classification des sables suivant les valeurs de module de finesse. (Normes de l'ex : U.R.S.S).....	11
Tableau 7 : valeur préconisées pour l'équivalent de sable.....	12
Tableau 8 : classe de résistances des ciments.....	15
Tableau 9 : Cette résistance est mesurée sur mortier normal Norme (EF P15-301).....	15
Tableau 10 : Teneur minimale en ciment conformément à AFNOR (P18-301).....	16
Tableau 11 : Désignation des classes d'affaissement au cône d'abrams.....	17
Tableau 12 : adjuvants normalisé modifiant la mise en œuvre des bétons et mortiers.....	27
Tableau 13 : adjuvants normalisé modifiant la prise et le durcissement du ciment.....	32
Tableau 14 : Caractéristique du béton susceptible d'être modifiée par classe d'adjuvant..	35
Tableau 15: Caractéristiques physiques de sable.....	54
Tableau 16: Caractéristiques de l'hydrofuge SIKA.....	56
Tableau 17: Résultats des essais.....	65
Tableau 18: Variation de masse du mortier immergé totalement.....	66
Tableau 19 : Résistances des différents mortiers et bétons.....	69

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
ملخص.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	ixx

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Revue générale sur le béton

I.1. Généralité	3
I.2. Le béton	3
I.2.1. Classe de béton	3
I.2.2. composition du béton	3
I.3. Constituants de béton	4
I.3.1. Granulats.....	4
1- Définition.....	4
I.3.1.1. Choix de granulats	4
I.3.2. Les différents types des granulats	5
a) Granulats naturels	5
b) granulats artificiels	5
I.3.3. Classification des granulats	5
I.3.4. Gravier	6
I.3.4.1. Définition	6
I.3.4.2. Granularité de gravier	6
I.3.4.3. L'influence de la grosseur maximale du gravier	7
I.3.4.4. Influence de (la nature, la forme, les impuretés) des gravies sur le béton.....	8
I.3.4.4.1. Nature de gravier	8
I.3.4.4.2. Forme de gravier	9
I.3.4.4.3. Les impuretés	10
A – impureté prohibée	10
B – Impureté Tolérée.....	10
I.3.4.4.4. Absorption d'eau	10
I.3.5. Sable	10
I.3.5.1. Classification des sables	10
I.3.5.2. Propreté	11
I.3.5.3. Rôle de sable dans le béton	12
I.3.6. Le ciment	12

I.3.6.1. Définition de constituants de base	12
A) Clinker	12
B) les additions (ajouts)	13
I.3.6.2. Fabrication de ciment	14
I.3.6.3. Types de ciment	14
I.3.6.4. Classe de résistance	14
I.3.6.5. Caractéristiques mécanique garantis	15
I.3.6.6. Propriétés du ciment	16
I.4. Propriétés de béton	17
I.4.1. définition du béton	17
I.4.2. structure du béton	17
I.4.3. propriétés du béton	17
a). propriété de béton frais	17
b). propriété du béton durci	21
c). Durabilité du béton	21
d). Fissuration des bétons	22
e). Porosité	22
f). Perméabilité	22
g). la résistance mécanique	22
I.4.4. Traitement ultérieur de cure	23
I.4.4.1. Définition	23
I.4.4.2. Effet de l'élévation de la température	23

Chapitre II

Synthèses bibliographiques sur les adjuvants

II.1 Introduction.....	24
II.2 Définition.....	24
II.3 Classification	24
II.3.1 Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air	25
a) L'effet sur le béton frais	25
b) plastifiants-rétenteurs d'eau	26
c) entraîneur d'air	28
II.3.2. adjuvants modifiant la prise et le durcissement	30
a) Accélérateur	30
b) Retardateur	31
II.3.3. adjuvants modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques	32
a) Antigels et antigelifs	32
b) Hydrofuges	32
c) Produit de cure	36
II.3.4. adjuvants pour coulis d'injection	37
II.4. Contrôle et Stockage des adjuvants	38

Chapitre III

Synthèses bibliographiques sur les hydrofuges

III.1 Les hydrofuges	39
----------------------------	----

III.2 Historique	40
III.3.Effet des hydrofuges	41
III.4.Types d'hydrofuges	43
a) Hydrofuge de masse.....	43
b) Hydrofuges superficiels	43
c) Hydrofuges pénétrants	43
III.5.Familles et exemples d'hydrofuges	44
a)Enduits au latex	44
b) Ciment ou produits à base de ciment	44
c) Enduits polymériques	44
d) Résines époxy.....	44
e) Silicones	45
f) Silicates	50
g) Huile de lin	50
III.6.Durabilité.....	51

Chapitre IV

État de l'art sur l'effet d'hydrofuge de type SIKA sur le comportement physicomécaniques de béton ordinaire

IV.1. Introduction	53
IV.2. Étude des propriétés des matériaux utilisés	53
IV.2.1 Sable de littoral de mer	54
IV.2.2 Ciment	54
IV.2.2.1 Caractéristique mécanique	54
IV.2.2.2 Caractéristique chimique	54
IV.2.3.Eau de gâchage	55
IV.2.3.1 Caractéristiques physiques.....	55
IV.2.3.2 Caractéristiques chimiques.....	55
IV.2.4.Hydrofuge SIKA.....	55
IV.2.4.1.Description	55
IV.2.4.2.Mode d'emploi et dosage	55
IV.2.4.3.Propriétés et domaines d'application	56
IV.3. Méthodes expérimentaux	56
IV.3.1 principe	56
IV.3.2. Paramètres des essais	56
IV.3.3. Préparation de béton et de mortier	57
IV.3.3.1 Équipement utilisé pour la préparation	57
IV.3.3.2.Mode opératoire	58
IV.3.3.3. Confection des éprouvettes	58
IV.4. Description des essais expérimentaux.....	59
IV.4.1. Mesure des résistances en flexion et en compression.....	59
IV.4.1.1. Équipements utilisés.....	59
IV.4.1.2. Principe de l'essai.....	60
IV.4.2. Essai pour l'évaluation de perte de masse (porosité)	61
IV.4.2.1.Objectif	61
IV.4.2.2.Principe de l'essai	61
IV.4.2.3.Mode opératoire	62
IV.4.3. La durabilité ou mesure de perméabilité à l'eau	62
IV.4.3.1.Principe	62

IV.4.3.2. Appareillage et dispositif d'essais	62
IV.4.3.3. éprouvette	63
IV.4.3.4. Mode opératoire	64
IV.5. Analyse des résultats et interprétations	65
IV.5.1. Discussion	65
IV.5.2 Résultats expérimentaux	65
IV.5.3. L'effet de l'hydrofuge SIKA sur les propriétés physiques de béton	66
IV.5.3.1 Porosité	66
IV.5.3.2 Absorption capillaire	67
IV.5.4 L'effet de l'hydrofuge SIKA sur les propriétés mécaniques de béton	69
IV.5.4.1. Résistance à la flexion	69
IV.5.4.2. Résistance à la compression	70

Conclusion générale

Conclusion générale.....	63
--------------------------	----

Références

Références

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction au monde entier, à cause de son facilité de mise en œuvre et à son coût relativement bas. Il est également devenu le matériau préférable pour la construction des structures robustes et durables [1].

Le béton est un matériau composite dans lequel les granulats (gravier et sable) sont liés par une pâte de ciment hydratée. Dans le long terme, l'excès d'eau s'évapore, laissant des vides dans le béton. Dans une pâte de ciment portland de rapport eau/ciment de 0,5, la porosité totale représente entre 25 et 30% du volume et la taille des pores varie du nanomètre à quelques millimètres. La porosité du matériau diminue sa résistance mécanique et sa durabilité. Le béton est donc un matériau composite poreux, dont les performances varient en fonction de sa porosité capillaire et donc de l'excès d'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais [1,2].

La nécessité d'améliorer les performances des bétons (diminuer la porosité et l'absorption capillaire), amène à ajouter au béton frais de faibles quantités d'adjuvants imperméabilisants, appelés hydrofuges (habituellement moins de 2% de la masse du ciment), on peut nettement réduire l'absorption capillaire d'eau nécessaire pour obtenir des propriétés mécaniques satisfaisantes pour une bonne mise en œuvre du béton [1,2].

Ce travail consiste à faire une synthèse bibliographique sur l'effet des adjuvants sur les propriétés à l'état frais et durci de béton. De plus, on a fait une recherche bibliographique sur l'effet de l'adjuvant hydrofuge de type SIKA sur les propriétés durcies (résistance à la compression, la porosité, la résistance à la flexion et l'absorption capillaire) d'un béton ordinaire.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres:

- Le chapitre I est consacré à une brève description du béton ; comprenant les différents constituants et la structure des matériaux cimentaires.
- Dans le deuxième chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les adjuvants du béton.
- Dans le troisième chapitre nous présentons quelques études antérieures Algériennes réalisées sur l'effet de l'adjuvant de type hydrofuge SIKA commercialisé dans le marché Algérien sur quelques propriétés durcies (résistance à la compression, la

porosité, la résistance à la flexion et l'absorption capillaire) des bétons ou mortiers de ciment Portland.

Enfin, on résume les principales conclusions dégagées lors de la révision des études antérieures sur la thématique et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

CHAPITRE I

REVUE GENERALE SUR LE BETON

I.1 Généralité :

Le béton a été depuis longtemps le matériau de construction, le plus utilisée dans les travaux de conception de différents types d'ouvrage ; tout comme dans le cas dans les autres industries, le besoin universel de conserver les ressources de protéger l'environnement et bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie de béton. Dans ce chapitre on présent une revue générale sur les constituants des bétons (gravier, sable), ainsi les ciments et quelques notations sur les bétons.

I.2 Le béton :

On sait que le béton est le matériau obtenu en solidarissant par une pâte de ciment. Un squelette granulaire composé d'un sable et gravier, comme le liant a de propriétés hydrauliques, ces bétons sont aussi appelés béton hydrauliques.

I.2.1 Classe de béton :

La grande diversité des bétons a conduit à définir et préciser des critères de bases pour leur classification et leur désignation.

Les critères fondamentaux adoptés sont au nombre de cinq :

- La résistance à la compression ; cette résistance est mesurée sur des éprouvettes cylindriques, cubique et prismatique à l'âge de 7, 14, 21,28 jours.

La recommandation CEB-FIR classe les bétons, en fonction de leur résistances caractéristique comme suit ;

-C12.....utiliser seulement pour les bétons non armé.

-C16, C20.....utiliser pour les bétons armés.

- C25, C30, C35.....utiliser pour le béton armé ou précontrainte.

- C40, C45, C50.....utiliser pour le béton précontraint.

- C60, C70, C80.....utiliser dans les cas spéciaux.

I.2.2 composition du béton :

L'étude d'une composition de béton consiste toujours, à rechercher conjointement deux qualités essentielles sont la résistance et l'ouvrabilité. Or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre quant aux facteurs dont elles dépendant, mais elles varient en sens inverse.

On recommande un dosage minimal de (300Kg/m³) et un rapport (E/C) maximal de 0.65.[1]

La recommandation CEB-FIR ainsi que le règlement BAEL.83. N'inscrivent pas, des dosages pour les différentes caractéristiques qui doivent être respectés.

Le dosage des différents constituants du béton dépend de type de matériau recherché, déterminé par ses utilisations. En effet, ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques dépendent de sa composition et de sans origine.

I.3 Constituants de béton [1]:

I.3.1 Granulats :

1- Définition :

Le granulats sont des matériaux inertes provenant de l'érosion ou de concassage des rocher, il sont des tines surtout à être incorporés dans les mortiers et les bétons où il se trouvent agrégés au moyen d'un liant qui peut – être le ciment ou le bitume, ils servent aussi à confectionner les bétons et les mortiers les granulats constituent le squelette du béton.

I.3.1.1 Choix de granulats :

Tableau 1 : Choix de granulats dans le béton.[1]

Type de béton et l'ouvrage	MV app (kg / m3)	Nature des granulâtes
Bétons basique pour les structures chanteries ou la préfabrication	2200 a 2400	Tous granulats roulées ou concassées, siliceux ou siclico calcaires
Bétons apparents architectonique	2200 a 2400	Même granulats mais aussi les basaltes, granulats diorites qui présentant des coloris trévires pour l'harmonie de la façade
Bétons légers pour structures porteuses	1500 a 1800	Argiles escpansé ou schiste escpansé pouzzolanes ou ponces
Bétons lourds	3000 a 5000	Corindon, bray time magnetite.
Bétons réfractaires	2000 a 2500	Corindon, pouzzolanes laitier
Béton pour dallages industriels	2400 a 3000	Corindon, granulats métallique
Bétons routiers	2200 a 2300	Tous origines, roulés ou concassés.

I.3.2 Les différents types des granulats :

Dans les normes récentes (P 18-541) basées sur les acquis de la recherche et de l'expérience fixe des spécifications réalistes qui prennent en compte utilisation, sécurité, fiabilité et coût. On distingue :

a) Granulats naturels :

Les granulats naturels Issus de différentes roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (concassage, broyage, criblage, lavage, sélection).

Sable et gravier de revivre, sable de mer, et sable de dune dite de désert.

b) granulats artificiels :

Qui proviennent de la transformation thermique de roche, de minerais, de sous-produits, industriels (laitier, scories... etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

1. Granulats concassés :

- naturels de forme
- artificiels d'obtention par concassage des roches.

2. Granulats traités :

- artificiels par leur composition.
- artificiels par leur formation.
- artificiels par leur obtention (cuisson).

I.3.3 Classification des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leurs démontions par criblage sur des tamis à mailles carrées dont les dimensions intérieures sont en (mm).

Le terme (granulats d/D) est réservé ou granulats sont les dimensions s'étalent de « d » pour les petits à « D » pour les refus grands.

Le tableau suivant détermine les classes des granulats.[1]

Tableau 2 : Classes des granulats.[1]

Appellation	Mailles carrées des tamis (mm)	
Farine, fillers		< 0.08
Sable	Petits	0.080<D<0.310
	Moyens	0.310<D<1.250
	Gros	1.250<D<5.00
Gravillons	Petits	5.00<D<8.00
	Moyens	8.00<D<12.50
	Gros	12.50<D<25.00
Pierres concassées	Petits	25.00<D<40.00
	Moyens	40.00<D<63.00
	Gros	63.00<D<100.00

I.3.4.Gravier :**I.3.4.1. Définition :**

On appelle gravier l'accumulation des grains de 5 à 70mm provenant de la distraction naturelle des roches. Tandis que la pierre concasser par broyage des roches massives, de gravier pierre artificielle, en morceaux dont les dimensions varient de : 5 à 70mm.

En distingue deux formes de gravier :

- Gravier concassé : obtenue par concassage des roches massives présentent un aspect anguleux et des arêtes vives. [02]
- Gravier roulé : qu'on d'origines naturelle préalable à une forme arrondi et polis.

I.3.4.2. Granularité de gravier :

La granularité conditionne la porosité de mélange, si tous les grains, ont une même grosseurs, ont aurais une porosité maximale, dont pour avoir un mélange de volume des vides minimum il faut une composition granulométrique des grains de différents dimensions doit se situer dans la limite appelées (fuseaux de spécifications). [02]

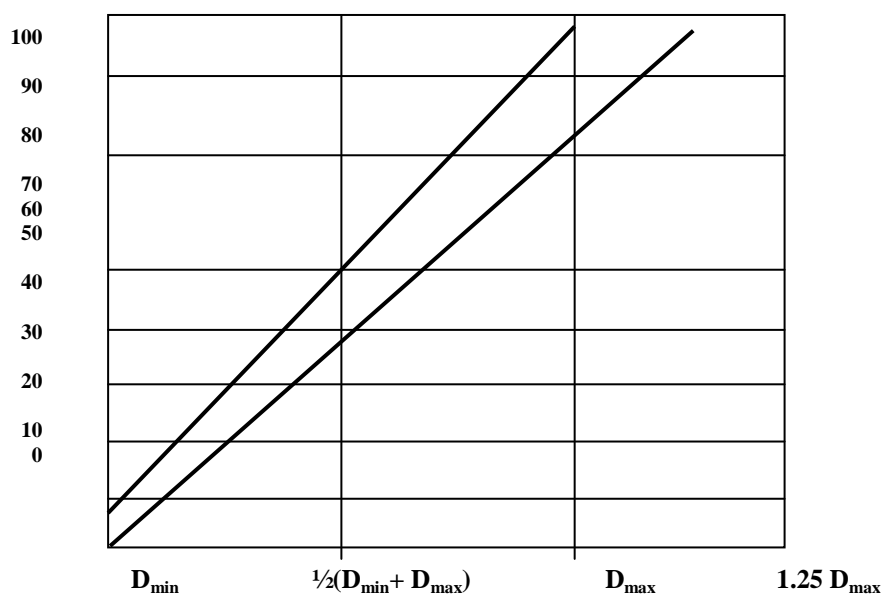


Figure 1: Diagramme de dimensionnement de gravier.[02]

Tableau 3 : Refus cumulés sur tamis.[02]

Tamis	Limite de refus cumule (%)
D_{\min}	90-100
D_{\max}	0-10
$\frac{1}{2}(D_{\min}+D_{\max})$	40-70
$\frac{5}{4}(D_{\min}+D_{\max})$	0

I.3.4.3. L'influence de la grosseur maximale du gravier :

Les dimensions des éléments à façonner le degré de ferrailage, la disposition de l'armature, ces dimensions influent sur la grosseur maximale du gravai.

Le diamètre maximal ne doit pas excéder 1/3 de la dimension la plus faible de la section, sans spécification le diamètre minimal des granulats stadmis égale à 32 mm

Tableau 4 : Caractéristique de la pièce à fabrique en fonction des dimensions (max) des granulats

Caractéristique de la pièce à fabrique	Dmax des granulats	
	Roulé	concassé
E : espacement les armatures horizontales	0.92	0.8 e
C: couverture entre les armatures et le coffrage couche protection des armatures et le coffrage couche de protection des armatures	0.8 c	0.7 c
N : rayon moyen des malles de ferrailage	1.8 n	1.6 n
R : rayon moyen des moules	1.2 r	R
Hn : épaisseur minimale	Hn /4	Hm/4

I.3.4.4. Influence de (la nature, la forme, les impuretés) des gravies sur le béton :

I.3.4.4.1. Nature de gravier :

Les graviers sont constitués de différents minéraux .chaque gravier a son propre composition chimique, et minéralogique, son résistance, son adhérence avec la pâte de ciment et son porosité (par ce que les graviers provient des roches maternelles).

-l'état de surface du gravier influe sur l'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment, et cette adhérence influe sur la résistance du béton.

Donc l'adhérence du gravier roulé est différente à l'adhérence du gravier concassé, parce que la surface des grains de gravier roulé est lisse par contre la surface des grains de gravier concassé est rugueuse. [02]

La résistance à la compression de quelques roches utilisées souvent dans les bétons notés dans le tableau suivant :

Tableau 5 : L'influence de la Nature de gravier sur le béton.

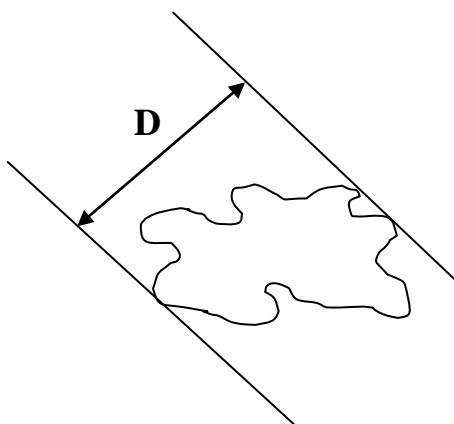
Quartzite	290 MPa
Granite	190 MPa
Basalte	250MPa
Prophyne	230 MPa
Calcaire dur	90 MPa
Calcaire tendre	40 MPa
Calcaire froid	160 MPa

I.3.4.4.2. Forme de gravier :

Les grains d'un gravier distinguent par leur forme : sphériques, cubiques, allongées

Le coefficient volumique C_v permet de donner une idée précise sur la forme de l'élément considère.

C'est pour un grain, le rapport entre le volume absolue ou volume de la sphère circonscrite à la plus grande dimension de grains.



Le coefficient volumique est donné par la relation :

$$C_v^g = \frac{v}{\frac{\pi d^3}{6}}, \quad v: \text{Volume absolue des grains de gravier.}$$

d : La plus grande dimension des grains de gravier.

Un coefficient faible correspond à un granulats présentent une forme plate et « d'aiguilles » à l'opposé en coefficient élevé correspondant à un granulats dit « cubique » ou « arrondi » la norme AFNOR P18-301 préconise :

$C_v \geq 0.15$: Pour les graviers de (12.5 à 25mm)

$C_v \geq 0.11$: Pour les cailloux de (25 à 50mm).

I.3.4.4.3. Les impuretés :

Le gravier contient souvent une ou plusieurs matières étrangères appelées impuretés.

L'impureté influe sur l'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment ce qui influe sur la résistance. Il existe deux type d'impureté sont :

A – impureté prohibée :

Se présente comme le charbon, les bois ou leur résidus (cendres, mâchefer.....etc)

Les matières organiques, les déchets végétaux, ces impuretés sont aussi nuisibles.

B – Impureté Tolérée:

Se présente comme les sulfures.

I.3.4.4.4. Absorption d'eau :

Les graviers en générale sont plus au moins poreux, ils absorbent l'eau de pluie est devient humide, il faut donc prendre en compte cette humidité lors de la détermination de la composition de béton. Si non on aura une quantité d'eau de gâchage supplémentaire qui entraînent une diminution dans la résistance du béton.

I.3.5. Sable :

On appelle sable, les matériaux de petites dimension issues de désagrégation des roches le sable est l'élément qui assure au béton au mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante : il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient des roches, ils sont chimiquement inertes

Tels que : les calcaires durs les granits et les quartzites.

I.3.5.1. Classification des sables :

- suivant leurs grosseurs :

- Sable fin 0.08 à 0.315 mm

- Sable moyen 0.315 à 2.00mm

- Sable gros 2.00 à 5.00 mm

Suivant leur provenance :

Ils peuvent être également distingués suivant leurs provenances

- sable rivières.
- sable de mer.
- sable artificiel.
- sable de carrière.
- sable de d'une.
- suivant les valeurs de module de finesse (normes de l'ex : U .R . S. S)

**Tableau 6 : classification des sables suivant les valeurs de module de finesse.
(Normes de l'ex : U.R.S.S).**

Sable	Mode de finesse M_F	Refus cumulé sur les tamis 0.633 EN %
gros	3.4 à 2.4	50 – 75
moyen	2.5 à 1.9	35 – 50
fin	2.0 à 1.5	20 – 35

I.3.5.2. Propreté :

- Equivalent de sable : selon la norme NF 18 – 598 cet essai nous a permis de mettre en évidence la proportion d'impureté argileuses ou ultra – fines contenus dans le sable et le pourcentage de poussières nuisible et les éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons.

Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable sont regroupés dans le tableau suivant.

[02]

Tableau 7 : valeur préconisées pour l'équivalent de sable

E .S.V	E.S.P	NATURE ET QUALITE DU SABLE
ES < 60	ES<60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq Es < 75$	$65 \leq Es < 70$	Sable l' légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq Es < 85$	$70 \leq Es < 80$	Sable propre à faible pourcentage des mines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$Es \geq 85$	$Es \geq 80$	Le sable très propre, l'absence presque totale des fins argileuses risque d'entraîner en défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation au dosage en eau.

I.3.5.3. Rôle de sable dans le béton :

la qualité du sable influe considérablement sur la qualité des bétons , le sable joue un rôle important dans la formation de la structure des bétons avec le ciment et l'eau , il remplit tous les vides entre les grains du graviers dans le béton .

I.3.6.Le ciment :

Le ciment est une poudre fine obtenue par la cuisson à haute température (vers 1450 ° C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en générale).

Cette poudre constituée de sel minéraux anhydres instable (en particulier silicates et aluminates de chaux) forme avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durci progressivement (plus ou moins rapidement) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec « liant aériens »

(a base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent qu'au contact de l'air .

I.3.6.1.Définition de constituants de base :**a) Clinker :**

c'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion (clinkerisation) du mélange (argile + calcaire) , dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice(SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃)

les quatre principaux constituants de clinker sont :

- silicates tricalcique :SiO₂ , 3CaO ou (C₃S) , (50 à 60 %)

- silicates bicalcique : SiO_2 , 2CaO ou (C2S) , (15 à 20 %)
- Aluminates tricalcique : Al_2O_3 , 3CaO ou (C3A) , (5 à 15 %)
- Alumino–ferrite tétra calcique: $4\text{CaOFe}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 , ou (C4AF) ,(5 à 10 %)

B) Les additions (ajouts) :

B). 1. Laitier granulé de haut fourneau :

C'est un résidu minérale de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir de minerai de fer et du cole métallurgique.

Il sort du trou de coulée à la une température de l'ordre de 1500°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 (45 à 50 %) , de silicates (15 à 20 %) et de 10 % environ de magnésie et des oxydes divers et de manganèses.

B). 2. Cendres volantes :

Ce sont des produit pulvérulent de grande finesse (0 à 315 μ dont 50 % < 40 μ) résultant de la combustion en centrale thermique , des combustibles minéraux solides (houille , lignites) ; elle rentrent dans la composition de certains ciment en proportion variable (5 à 30 %) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker .

B). 3. les Pouzzolanes :

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice alumine et oxyde ferrique, ils sont employés dans les cimenteries pour leurs propriétés « pozzolanique » c'est-à-dire une aptitude à fixer la chaux à la température ambiante et forme des composés ayant des propriétés hydrauliques.

C'est –à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation. On obtient artificiellement des pozzolaines à partir d'argile cuite.

B. 4. Fillers :

Sont des Produits obtenus par fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire , basalte , laitier , kieselguhr , bentonite , cendres volantes) naturelle ou non , agissant principalement , grâce à une granularité appropriée , par leur propriétés physique sur certains qualités du ciment (accroissement de maniabilité , diminution de perméabilité et de capillarité , réduction , de la fissuration) les fillers sont inertes s'ils n'ont aucun action chimique sur les ciments .

I.3.6.2. Fabrication de ciment :

Les matériaux naturel de carrière (calcaire, marne, argile) doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange intime, homogène et bien dosé environ 75% de calcaire pour 25% d'argile..)

Ce broyage peut se faire à sec ou en présence d'eau. Le mélange ainsi réalisé, passe dans un four rotatif ou se cuit vers 1450°C en général.

Pour fixer les idées, précisons qu'un grand four moderne peut atteindre 250m de longueur de 6 à 7 m de diamètre, produit plus de 300t de clinker par 24h.

Le clinker, addition d'un peu de gypse (3 à 5 %) avec éventuellement certains produits d'addition tel que laitier ...etc. et ensuite réduit en poudre fine dans un broyeur à boulets.

Le ciment issu du broyage est conservé en silo un certain temps, puis conditionnés pour l'expédition en sacs, ou en vrac.

I.3.6.3. Types de ciment :

la nouvelle normalisation comporte cinq types principaux de ciments :

- TYPE 1 ciment portland
- TYPE 2 ciments portland composé.
- TYPE 3 ciments de haute - fourneau
- TYPE 4 ciments pozzolanique.
- TYPE 5 ciments au laitier et aux cendres.

I.3.6.4. Classe de résistance :

Le ciment se caractérise en fonction de sa classe de résistance à la compression, cette dernière, mesurée à 28 jours d'âge, étant exprimé en MP a. pour les ciments fabriqués jusqu'à de 1994, on distinguait 4 classes de résistances donc les valeurs indiquées dans le tableau (II.8) (les ciments de la classe 35 n'existant pratiquement plus de puis plusieurs années) :

Tableau 8 : classe de résistances des ciment.

Classe ciment	de	Sous classe éventuels	A 2 jours	A28 jours	A 28jours
			Limite inférieure nominal	Limite inférieure nominal	Limite supérieure nominale
35		-	-	25	45
45		-	-	35	55
45		R (rapide)	15	35	55
55		-	-	45	65
55		R (rapide)	22.5	45	65
Hautes performances		-	-	55	-
		R (rapide)	27	55	-

I.3.6.5. Caractéristiques mécanique garantis :

Les ciments sont classifiés par leurs classes de résistances.

Tableau 9 : Cette résistances est mesurée sur mortier normal Norme (EF P15-301).

Classe de résistance	Résistance minimale garantie en (N/mm ²)		
	2 jours	7 jours	28 jours
32.5	-	17.5	30
32.5R	12	-	30
42.5	10	-	40
42.5R	18	-	40
52.5	18	-	50
52.5R	28	-	50

Dans les normes AFNOR la teneur minimale en ciment détermine de la manière suivant

I.3.6.6. Propriétés du ciment :

- la finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou sa surface développée totale des grains contenus dans une masse donnée. Cette finesse, mesuré conventionnellement selon la norme NF P 15-442 est exprimée en cm^2/g , elle varie de 2700 à 3500 cm^2/g

- la masse volumique de ciment est en générale de 800 à 1200 Kg/m^3 . En compte en moyenne

1100 Kg/m^3 pour un ciment en vrac non tassé.

- la masse spécifique varie en générale de 2900 à 3200 Kg/m^3 soit en moyenne une densité absolue de 3100 g/cm^3 généralement admise.

- Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement ; on le détermine à l'aide de « l'aiguille de Vicat » (essai NF P 15-431).

-La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide suivant la norme

Tableau 10 : Teneur minimale en ciment conformément à AFNOR (P18-301).

Matériau de construction	Teneur minimale en ciment (Kg/m^3)
Béton non armé (coulé gros masse)	150 à 250
Béton de route	300 à 325
Béton ordinaire	325 à 350
Béton spéciale (Préfabriqué, Précontrainte...)	350 à 400

Le temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe 30 min à quelques heures.

- Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue pour les ciments à durcissement rapide on obtient après quelques jours l'évolution maximal de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois. [1]

I.4. Propriétés de béton :

I.4.1. Définition du béton :

Le béton sans aucun doute a été depuis longtemps, le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction, sur tous les continents et sous tous les climats ceci s'explique par les faits suivants :

Possibilité de varier les propriétés de béton dans une large limite ; facilité de mécanisation totale des travaux de bétonnage, qualité économique du béton par ce que 80 à 90% de son volume est composé d'agrégats d'origine locale.

I.4.2. Structure du béton :

D'après sa structure, le béton durci est considéré comme un conglomérat naturel dans lequel les grains de granulats fins (sable) s'arrangent dans les vides entre les grains de gros granulats (gravier ou pierre concassée), les grains sont liés les uns aux autres par des couches minces de la pierre de ciment.

Les gros granulats servent de squelette pour le béton, ce qui permet à ce dernier de résister aux charges.

I.4.3. Propriétés du béton :

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, d'autre part à l'état durci.

a)-Propriété de béton frais :

a).1.La consistance :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité on appelle consistance la mesure d'une grandeur effectuée avec un appareillage simple conçu pour reproduire un aspect marquant de l'opération de mise en place d'un béton.

Elle dépend de l'appareil qui sert à la mesure ; c'est pourquoi, quand on donne une valeur de consistance, il faut dire comment elle a été mesurée, précisée, par exemple : consistance au cône d'Abrams ou consistance à la table à secousse. [1]

a.1.1.Mesure de la consistance du béton frais et classe de consistance :

Les normes ISO et les normes EN retiennent quatre types d'appareils pour la mesure de la consistance du béton frais :

- Le vèbé (ISO 4110 et EN 12350 -2) ;
- Le cône d'Abrams (ISO 4109 et EN 12350-2) ;
- L'essai de serrage (ISO 4111 et EN 12350-4) ;
- L'essai de l'étalement à la table à secousse (ISO 9812 et EN 12350-5) ;

Les classes de consistance au cône d'abrams sont désignées par les qualifications de ferme, plastique, très plastique et fluide.

Tableau 11 : Désignation des classes d'affaissement au cône d'abrams.

Affaissement (cm)	Désignation de la consistance
0 à 4	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 15	Très plastique
≥ 16	Fluide

a).1.2.Paramètres susceptibles de modifier la consistance :

- Le transport du béton :

- Le béton avant même d'être sorties du malaxeur commence à réagir, sa consistance au moment de la livraison sur chantier est toujours inférieure, à celle mesurée à la sortie du malaxeur.
- Après trente ou soixante minutes, le béton peut ne pas avoir la même consistance, suivant qu'il a été laissé au repos ou constamment agité.

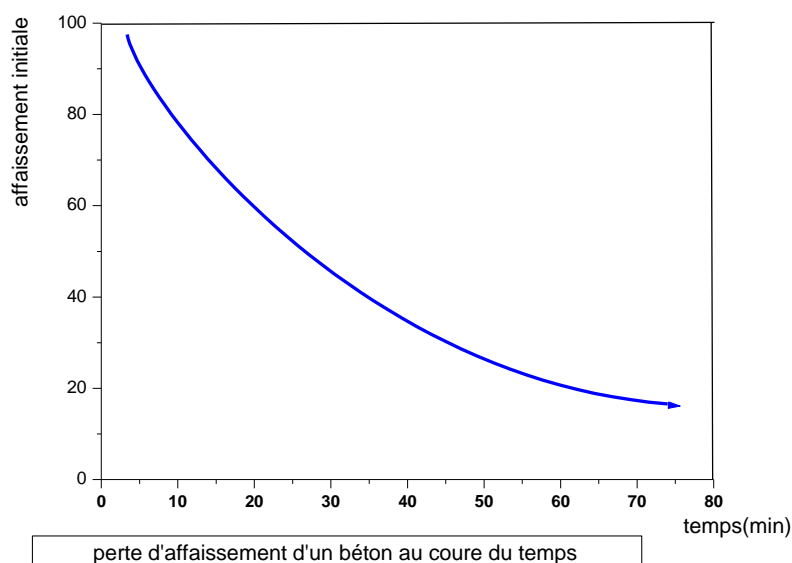


Figure 2 : Perte d'affaissement en fonction du temps.

- Le mélange du béton frais durcit avec le temps, une partie de son eau absorbée par les agrégats une autre est perdue par évaporation surtout si le béton est exposé au soleil ou au vent, une troisième partie est utiliser pour l'hydratation du ciment .

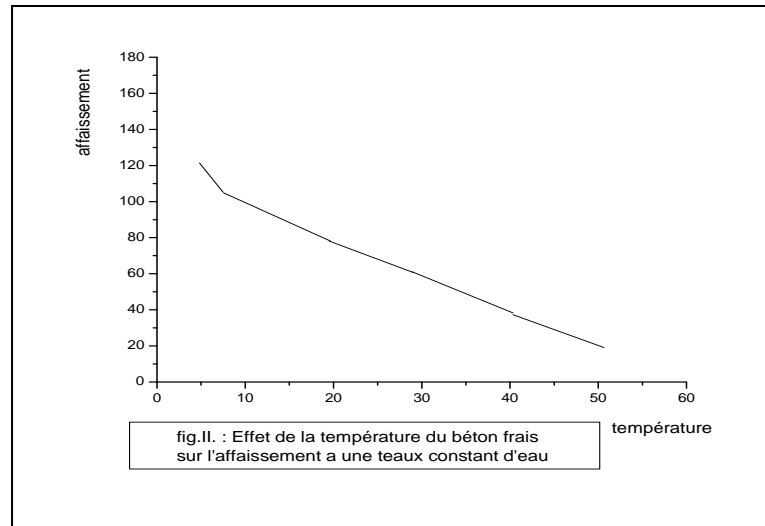


Figure 3: Effet de la température du béton frais sur l'affaissement.

Pour que le béton conserve la même ouvrabilité dans un climat chaud , il faut augmenter la hauteur d'affaissement de l'essai au cône d'abrams à 20°C , il ne sera que 5cm a 5°C , on passe donc d'un béton plastique à un béton plus ferme demandant une énergie de vibration plus grandes pour un même densité en place, si l'on veut conserver la même ouvrabilité, il faut ajouter de l'eau et changer par conséquent , le rapport E/C initiale , la baisse de la résistance mécanique sera inévitable et sera de l'ordre de 7 à 8% , la perte d'ouvrabilité causée par l'augmentation de la température est illustré par la figure II. . , cette figure montré par exemple que l'affaissement décrois avec l'accroissement de la température pour un béton contenant une qualité d'eau constante, elle montre par exemple l'affaissement décrois de 3 cm quand la température passe de 20°C à 30°C.

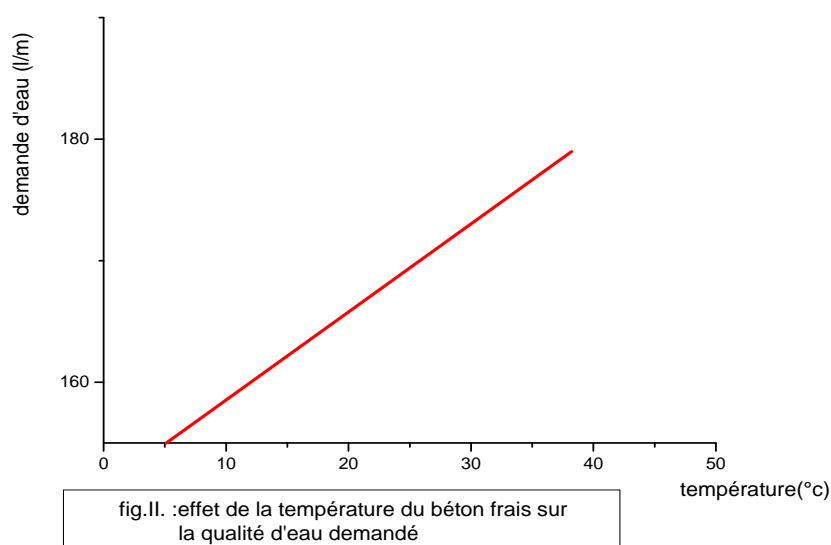


Figure 4: Effet du température du béton frais sur la qualité d'eau

➤ **Les fins de sable :**

Dans le cas des sables de concassage, les teneurs en fines tolérés, sont assez importantes et il nécessaire de les tenir compte dans la composition lors du calcul de l'optimum en fines. [2]

➤ **Autres paramètres :**

Les granulats très chaud, très humide (cas d'un tas de granulats exposé au soleil, pluie....) peuvent modifier la consistance. [2]

a).2. Ségrégation :

C'est le phénomène de séparation des petites et des gros granulats dans le béton sous l'effet de sollicitation, de la manutention, de malaxage ou de vibration. Les gros grains tendent à descendre, tandis que les petits grains, tendent à remonter à la surface de béton.

En d'autres termes, le béton subit un déménagement et par conséquent une diminution d'homogénéité. Et donc un abaissement de résistance. [1,4]

a).3. Ressuage de l'eau :

Le ressuage d'eau et le phénomène de détachement et de l'apparition de l'eau sur la surface de béton frais, sans mise en œuvre. Le ressuage de l'eau peut causer le manque de l'eau, par l'hydratation de ciment, l'hétérogénéité du béton et l'abaissement de sa résistance. Il conduit également à la porosité importante et la mauvais adhésion aux milieu de contact de couches de béton.[2]

a).4.homogénéité :

Pour l'ouvrage de faible section, (poutres, poteau, routes, est) cette nécessité est évidente. Pour les ouvrages en grande masse, l'homogénéité est également indispensable, en particulier, pour que le module d'élasticité et de retrait soient uniforme en tous les points de l'ouvrage [4,5].

a).5.Adhérence :

L'adhérence est un phénomène très complexe qui peut éprouver des modifications considérables, du fait des variations des sur constances extérieures les insignifiants en apparence.

Lorsqu'un corps faisant prise par lui-même on ajoute pour augmenter le volume du mortier obtenue, un corps étranger inerte, du sable ou du gravier par exemple, on doit faire entre en ligne de compte l'adhérence qui dépend de la nature chimique des corps en présence et de

l'état des surfaces, elle est sélective et ce n'est pas uniquement pour des raisons économique que l'on emploie des sables siliceux ou calcaire.

b).Propriété du béton durci :

Le béton est considéré comme un solide monolithique après achèvement de sa prise. Comme le béton est un matériau complexe, il se distingue par plusieurs propriétés telles que :

b.1. Durcissement de béton :

Le durcissement d'un béton avec le temps est dû essentiellement à l'hydratation progressive du ciment. On peut dire donc. À ce niveau, que tout paramètre influence sur l'hydratation de la pâte de ciment se répercute forcément sur les résistances mécaniques du béton.

Il est bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait plus lentement lorsque le temps passe. Ceci peut s'expliquer par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décroît elle-même avec le temps. [1,2]

b.2.Retrait :

Lorsque l'on observe une pièce de béton aussitôt son gâchage, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, elle change de volume, cette propriété qui a pris le nom de retrait, est à l'origine de désagrément de toutes sortes, que les constructeurs connaissent bien.

Il est, en réalité la résultante des mouvements complexes qu'il est intéressant d'analyser. On distingue trois types de retrait [1,2,4]:

- retrait hydraulique.
- retrait thermique.
- retrait hygrométrique.

b.3.Fluage :

C'est la déformation d'un élément de béton, maintenu sous charge constante, le fluage accompagne tous les modes de sollicitation du béton.

Mais, c'est le fluage sous compression qui a la plus grande importance.

En béton armé, les facteurs influant sur le fluage sont :

- l'âge de chargement – la contrainte appliquée – le volume sollicité.....etc.

C).Durabilité du béton :

Un béton durable est un capable de résister à un degré satisfaisant aux conditions climatiques, aux attaques chimiques et à tous autres processus de détériorations. Ceci dit un béton durable doit conserver sa forme originale et ses qualités quand l'est exposé à son environnement. [1,2]

Nous intéressons au cas où les propriétés du béton ne s'améliorent plus avec le temps, ou contraire, se dégradent. Voyons donc successivement :

- La fissuration
- L'action du gel ;
- Les attaques par les milieux agressifs.

d). Fissuration des bétons :

La fissuration du béton ne conduit pas toujours à un affaissement notable des bétons, les fissurations qui apparaissent assez fréquemment dans les ouvrages en béton sont d'origines très diverses, parfois les causes d'une fissuration sont multiples.

e). Porosité :

On appelle porosité du béton, le degré de remplissage de son volume par les pores. La

porosité est donnée par la formule $P = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_m \cdot I}$ ou : P : porosité en %

γ : la masse volumique de matériau

$\gamma_m \cdot I$: Densité du matériau.

Les pores sont de petites alvéoles remplies d'eau ou l'air.

Ils peuvent être fermés ou ouverts comme ils peuvent être de petites ou de grandes dimensions.

f). Perméabilité :

C'est la propriété du béton de laisser l'eau (ou tout autres liquides) sous pression. La perméabilité n'est pas une simple fonction de la porosité du béton, mais dépende aussi de la taille de la distribution et la continuité des pores.

g). la résistance mécanique :

La résistance mécanique du béton se présente sous deux aspects : résistance à la compression et résistance à la traction [1,2,5].

Cette résistance, joue un rôle très important en béton armé. Les tests le plus commun en béton est celui de la compression. En effet, le béton est souvent employé comme une structure porteuse soumise, en générale, à la compression, en addition les caractéristiques importantes, du béton sont qualitativement liées à sa résistance à la compression.

La détermination de la résistance du béton est nécessaire pour contrôler la qualité du béton .généralement, ces tests sont réalisés à 28 jours de durcissement dans le cas de

nécessite, ces tests sont réalisés a plusieurs autres âges (3,7, 14,21,.....etc) jours .La résistance mécanique du béton est fonction de plusieurs paramètres dont les principaux :

- La nature est la qualité des constituants ; granulats ciment ; sable.....etc.
- Les conditions de mise en œuvre de ces constituants ;
- Les constituants thermo hygrométrique ambiante et conservation.

I .4.4 Traitement ultérieur de cure :

I .4.4.1. Définition :

On entend par traitement d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mis en œuvre jusqu'à ce qu'ils attirent une résistance suffisante contre :

- La dessiccation prématurée du béton liée au vent, au soleil à la faible humidité de l'air.
- Les températures extrêmes et le changement de température rapide.
- Les précipitations
- Les vibrations, secousses, et autre sollicitation mécaniques.
- L'effet prématuré des substances nuisibles.

La protection du béton jeune contre les pertes d'eau liées à la dessiccation est la règle en pratique.

I .4.4.2. Effet de l'élévation de la température :

Il est généralement connu que l'élévation de la température réduit le temps de prise du ciment est accélère donc son durcissement.

Les effets de la haute température sur les propriétés du béton durci sont multiples, ils comportent essentiellement la baisse de résistance, l'augmentation de la fissuration due au retrait de dessiccation après et au retrait thermique, la diminution de la durabilité et en fin l'augmentation du fluage [1,2,6].

CHAPITRE II

Synthèses bibliographiques sur les adjuvants

II.1 Introduction :

Les Romains utilisaient du sang d'animal et le blanc d'œuf comme plastifiants dans leur béton de chaux et de pouzzolane. Dès le début de la fabrication du béton de ciment Portland (1850), on a ajouté certains produits pour modifier la prise (plâtre, chlorure de calcium, sucre) où l'étanchéité (filler, etc.).

La commercialisation de ces ajouts a commencé plus tard vers 1910 , 1920; il s'agissait surtout d'hydrofuges et d'accélérateurs. Les plastifiants furent commercialisés vers 1935, les entraîneurs d'air après la guerre en Europe. Récemment, sont apparus les antigels et les produits de cure.

Depuis 1960, les adjuvants se sont diversifiés et multipliés; leur qualité et sa constance ne cessent de s'améliorer. [7].

II.2 Définition :

On définit les adjuvants de la façon suivante :

Produits qui, ajoutés à moins de 5% du poids du liant, au moment des malaxages des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont encore frais, améliorent certaines de leurs propriétés.

Cette définition ne considère pas comme adjuvants des produits ajoutés au moment du broyage du clinker. Les adjuvants ne sont pas des panacées permettant de transformer un béton médiocre en bon béton. Mais, dans de nombreux cas, ces produits permettent l'exécution des travaux que les moyens classiques ne permettent pas de réaliser.

II.3 Classification :

Le critère essentiel permettant de classer les adjuvants est le résultat de leur action; ainsi on distingue [7] :

1. adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air : plastifiants, plastifiants-réducteurs d'eau, rétenteurs d'eau et entraîneurs d'air,
2. adjuvants modifiant la prise et le durcissement : accélérateurs et retardateurs,
3. adjuvants modifiant la résistance aux actions aux physiques et chimiques : antigels et antigelifs, hydrofuges et produits de cure,
4. adjuvants pour coulis d'injection,

II.3.1 Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air :

a) plastifiants-réducteurs d'eau :

Ils permettent :

- Soit une réduction de la teneur en eau pour une même ouvrabilité.
- Soit une augmentation de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau.

Ces adjuvants améliorent l'aptitude à la déformation des mortiers et bétons frais sous l'effet d'un moyen de serrage donné. Ce sont souvent des produits organiques capables de lubrifier les grains de ciment qui se trouvent défloculés et individualisés; cette dispersion facilite le mouillage. On recommande souvent de les ajouter, après un premier malaxage du béton (se conformer aux notices du fabricant).

a) L'effet sur le béton frais :

L'ouvrabilité est améliorée pour une même teneur en eau. Cette propriété est mise à profit dans le cas de bétonnage de pièces minces ou fortement ferrillées et dans le cas d'utilisation de granulats concassés. Mais, en principe l'utilisation d'un produit à action fluidifiante doit être associée à une diminution effective de la teneur en eau (l'excès d'eau est le plus grand ennemi du béton).

permettent d'augmenter l'ouvrabilité d'un mélange de béton donné sans ajouter de l'eau (A)
 ou: de réduire fortement la teneur en eau sans modifier l'ouvrabilité d'un mélange de béton donné (B)
 ou encore: de réduire la teneur en eau tout en augmentant l'ouvrabilité (C)

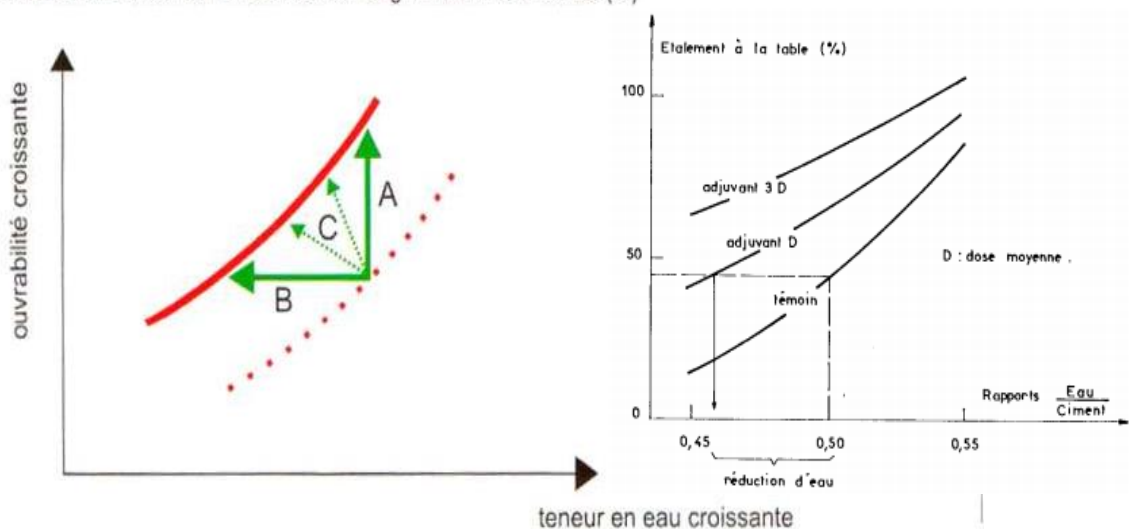


Figure 5 : l'ouvrabilité en fonction de teneur en eau.

a).2.effet sur le béton durci :

Pour les bétons courants et en première approximation, une diminution de 1% du dosage en eau augmente les résistances mécaniques de 1%. La diminution de la teneur en eau a pour conséquence la diminution de l'absorption capillaire donc une augmentation de la pérennité du béton.

a).3.Applications et utilisations :

Les doses à prendre varient de 0,2 , 0,5% du poids du ciment, on les utilise pour :

- des bétons à haute performance,
- des bétons de forte densité d'armatures,
- des bétons manufacturés,
- les centrales de béton prêt à l'emploi,
- les grands travaux de B.T.P. (autoroutes, travaux maritimes, barrages),
- certains travaux spéciaux : injection, béton projeté, etc.
- le béton brut de décoffrage.

a).4.produit de base :

Lignosulfates, détergents synthétiques, résine de mélanine et formaldéhyde.

b) plastifiants-rétenteurs d'eau :

Ils améliorent la stabilité : le ressuage est diminué et la cohésion plus forte. Ces adjuvants comportent souvent des produits très fins dont la majorité des grains est inférieure à 10 μ .

b).1.leur effets :

Ces produits fins augmentent la viscosité du béton frais et sa cohésion, la ségrégation est très diminuée. Les bétons durcis sont plus ou moins étanches. En revanche, ils demandent parfois un apport d'eau supplémentaire (à plasticité égale), surtout dans le cas d'un surdosage.

b).2.Applications et utilisations :

Les doses à préconiser sont assez élevées et varient de 1 à 3 % du poids du ciment. Parmi les emplois possibles :

- la mise en place du béton dans des pièces minces à forte densité d'armatures,
- le bétonnage en grande masse : c'est le cas des grands barrages où la nécessité de diminuer les chaleurs dégagées oblige parfois à abaisser le dosage en ciment initialement prévu,

- améliorer le décoffrage ainsi que l'aspect du béton brut de décoffrage (moins de fuites d'eau possible au travers des joints de coffrages),
- le béton transporté sur une longue distance (réduire la ségrégation), c'est le cas du B.P.E.,
- le béton pompé (qui exige une granularité convenable avec suffisamment d'eau),
- en injection (coulis d'injection dans les sols fissurés).

b).3.produit de base :

bentonite (argile colloïdale), Kieselguhr (terre fossile d'algues silicifiées), chaux grasse, calcaire broyé, acétate de polyvinyle et stéarates.

	Plastifiants	Réducteurs d'eau-plastifiants	Superplastifiants
Dosages	Généralement < 0,5 %.	Généralement < 0,5 %.	Généralement 0,5 % à 3 %.
Introduction	Dans l'eau de gâchage.	Dans l'eau de gâchage.	Dans le béton avant sa mise en œuvre.
Effets sur la mise en œuvre du béton	A rapport eau/ciment constant, amélioration de la maniabilité.	A maniabilité constante, réduction d'eau > 6,5 %.	A rapport eau/ciment constant, grande fluidification du béton : gain d'affaissement d'au moins 8 cm.
Résistances à toutes échéances	Maintien des résistances du témoin ou légère augmentation du fait de la meilleure mise en place.	Supérieures à celles du témoin. Augmentation minimum 10 %.	Par rapport au témoin, légère diminution possible.
Effets secondaires favorables	Possibilité d'accélération du durcissement.	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de compacité, diminution de la perméabilité. • Possibilité d'améliorer la résistance du béton aux agents chimiques agressifs. 	L'emploi de ces adjuvants peut permettre de réaliser des bétons à hautes performances en utilisant de faibles rapports eau/ciment.
Autres effets	Possibilité d'une légère augmentation du retrait.		
Adjuvants normalisés modifiant la mise en œuvre des bétons et mortiers. (Extrait du guide SYNAD.)			

Tableau 12 : adjuvants normalisé modifiant la mise en œuvre des bétons et mortiers.

c) entraîneur d'air :

Leur rôle est de créer dans le béton des bulles d'air arrondies dont le diamètre varie entre 10 à 1000 μm . La plus grande partie est généralement comprise entre 25 et 250 μm . Ces bulles possèdent une courbe granulométrique continue dans le domaine recouvre celui des ciments et des sables les plus fins des mortiers et des bétons. La distance entre bulles est variable entre 100 et 200 μm (nombre de bulles 100000 à 500000 par cm^3 de béton).

c).1.effet sur le béton frais :

Les bulles d'air jouent le rôle d'un fluide; en remplaçant une partie de l'eau de gâchage, et d'un inerte, les bulles remplaçant par leur granulométrie une partie du sable fin (1 / 2 mm).

c).2.effet sur le béton durci :

Les bulles changent la structure du matériau et coupent le réseau des canicules (figure). Cela explique pourquoi l'air occlus améliore beaucoup la tenue au gel, aux sels de dégel ainsi qu'aux eaux agressives. Les bulles améliorent l'imperméabilité des bétons en limitant les remontées par capillarité. Lors du gel, elles jouent le rôle de vase d'expansion pour l'eau poussé par la glace ou par la glace elle-même.

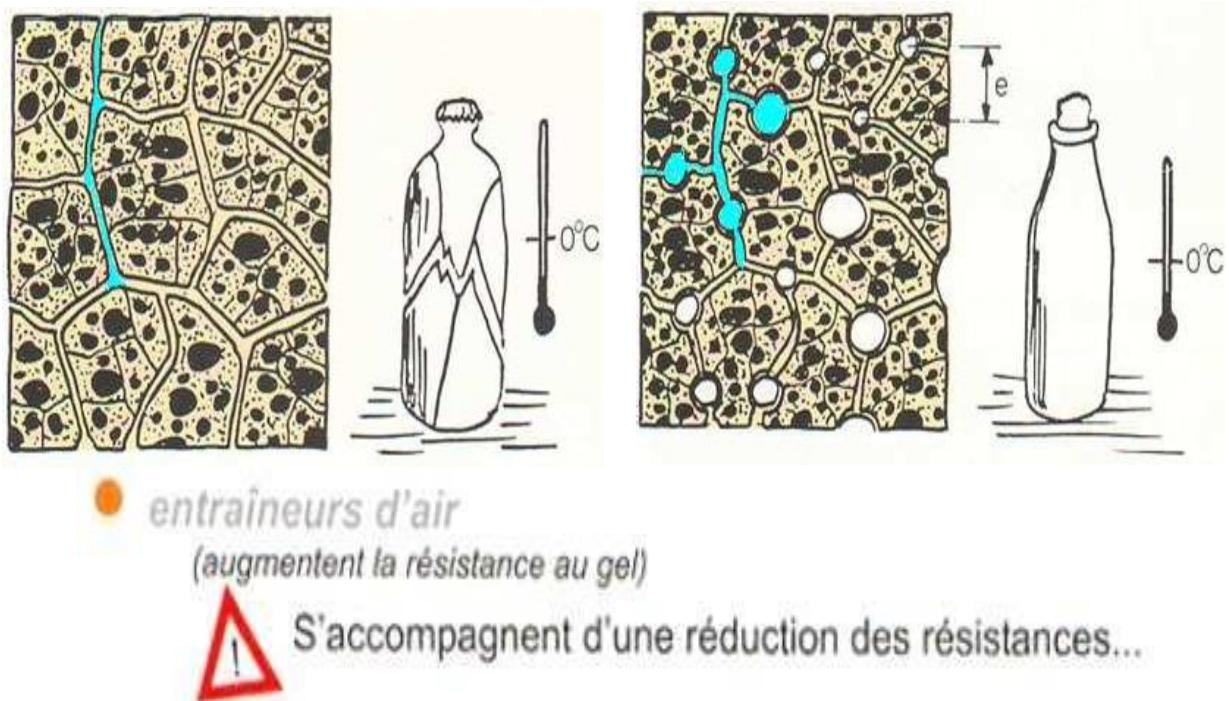


Figure 6: l'effet d'entraîneur d'air sur la structure du matériau.

Les entraîneurs d'air permettent une diminution de l'eau de gâchage et réduisent ainsi la ségrégation et le ressuage. Ils améliorent très souvent l'aspect du béton au démoulage. Ils peuvent en très grande quantité, provoquer des baisses de résistances mécaniques. Comme un certain nombre de facteurs interviennent sur la teneur en air, il est indispensable d'effectuer sur le chantier des essais de contrôle sur le béton frais. L'air occlus améliore et d'une façon spectaculaire la résistance au gel du béton durci. Le pourcentage d'air nécessaire décroît avec le diamètre maximal des granulats.

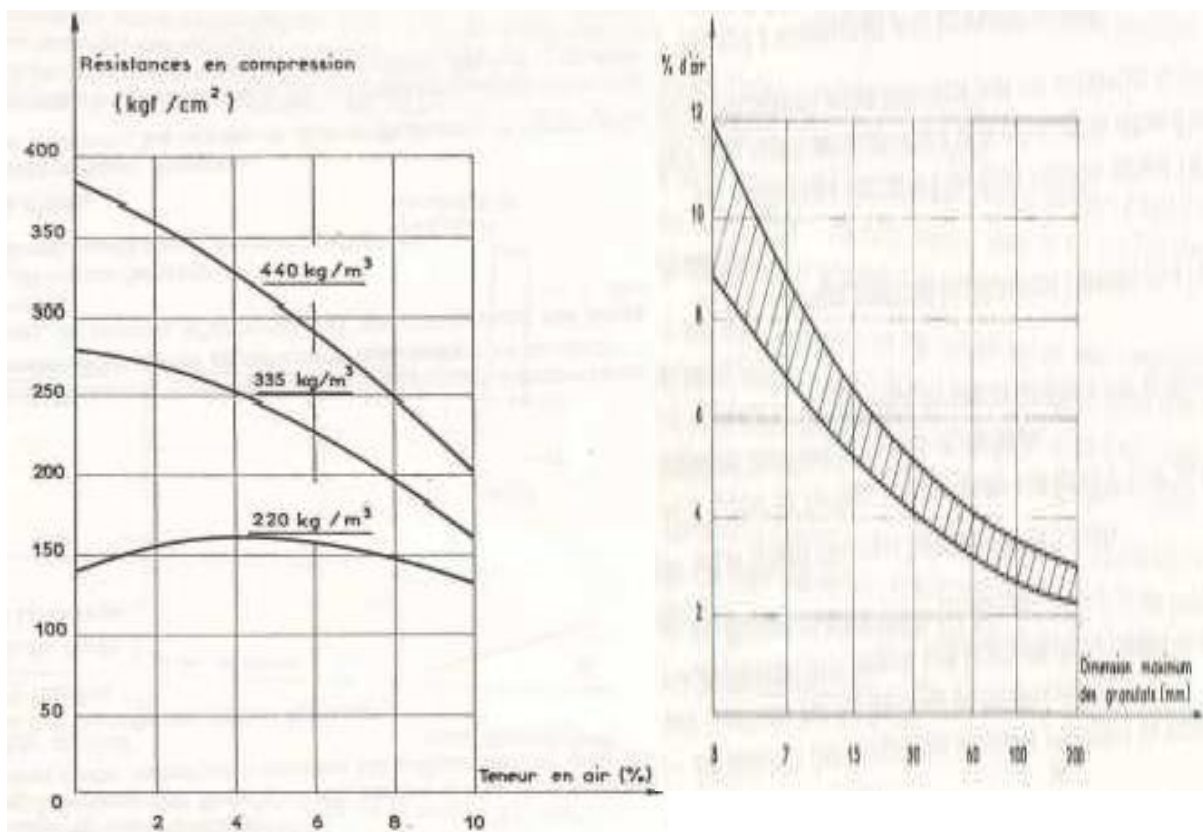


Figure 7: l'effet d'entraîneur d'air la résistance en compression.

c).3.Applications et utilisations :

les entraîneurs agissent à très faible dose. Cependant, ils sont vendus dilués dans le commerce; ils se présentent sous la forme de liquide brun ou incolore à ajouter à raison de 0,5 - 2% du poids du ciment. Les entraîneurs d'air sont utilisés pour la confection de béton classique armé ou non et aussi pour certains bétons spéciaux (bétons lourds et bétons légers afin de limiter la ségrégation). On les emploie souvent dans les centrales à béton, pour les bétons transportés sur de longues distances et pour certains mortiers et bétons projetés. Ils

sont pratiquement obligatoires, dans les pays froids, pour les routes, autoroutes et pistes d'aérodromes ainsi que pour les barrages.

c).3.produit de base :

lignosulfates, sulfonâtes d'alcool gras, savons alcalins d'acides gras, etc.

II.3.2. adjuvants modifiant la prise et la durcissement :

Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout la vitesse de dissolution de ces constituants. Quelques remarques préalables peuvent être faites :

- il faut en général des doses assez élevées d'adjuvant pour accélérer la prise et le durcissement, des doses extrêmement faibles pour les retarder,
- un produit peut agir comme retardateur ou accélérateur suivant la dose du produit et la nature du ciment,
- les résistances finales sont souvent augmentées avec les retardateurs et diminuées avec les accélérateurs, et dans ce cas d'autant plus que le produit est plus accélérateur.

a) Accélérateur :

Ces produits sont employés à des doses comprises entre 2 à 5 % du poids du ciment; certains sont vendus pour agir sur les ciments à forte teneur en clinker, d'autres sur des ciments à forte teneur en laitier. Les accélérateurs s'utilisent à des doses variables suivant l'effet recherché. A très forte dose, dans le cas de scellement et de colmatage de venues d'eau (utilisation de pâte pure ou de mortier); à plus faible dose pour une accélération de prise modérée du béton.

a).1.utilisations :

Ils sont à recommander pour les travaux suivants :

- décoffrage rapide,
- bétonnage par temps froid,
- préfabrication (démoulage rapide),
- réduction des périodes de cure et de protection des travaux rapides (dallages industriels, réfection d'ouvrages la nuit devant être mis en service dans la journée),
- scellement (étanchement et bouchage des fissures et venues d'eau),
- colmatage des voies d'eau à bord de navires (mélange alumineux + C.P.A.) travaux en galeries ou dans les tunnels à parois humides.

a).2.produits de base :

Chlorures de calcium, de sodium et aluminium; bases alcalines (soude, potasse, ammoniac); sels (carbonates, aluminates, borates de soude et de potasse); nitrates et nitrites et également des formates de calcium.

b) Retardateur :

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs. Ils donneraient naissance à des produits colloïdaux enveloppant les grains de ciment et retarderaient ainsi la progression de l'hydratation pendant un certain temps. Les doses des produits purs à utiliser sont extrêmement faibles. Il faut se méfier des excès de dosage qui risquent de retarder considérablement les temps de prise. Les retardateurs sont généralement efficaces à 20 °C comme à des températures plus élevées (40 °C par exemple). Des essais préalables sont toujours indispensables sur le chantier.

b).1.utilisations :

Ils sont à recommander pour les travaux suivants :

- bétonnage par temps chaud.
- pour supprimer les reprises de bétonnage.
- pour le transport sur une longue distance.
- préparé en centrale.
- béton pompé, mortier d'enduit projeté, travaux d'injection.

b).2 produits de base :

lignosulfates, sucres, phosphates et fluorures, oxydes de zinc et plomb, acides humiques et phosphoriques.

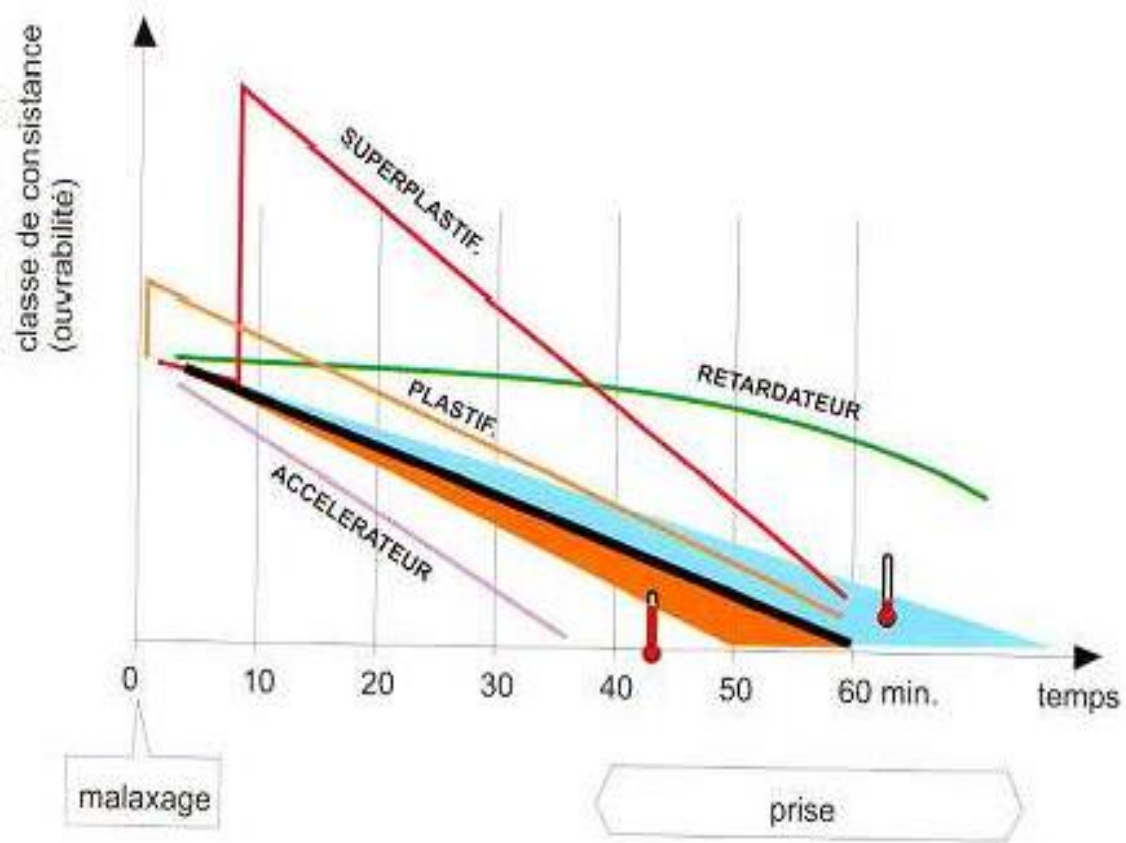


Figure 8: la classe de consistance (ouvrabilité) des adjuvants en fonction du temps.

Tableau 13 : adjuvants normalisé modifiant la prise et le durcissement du ciment.

		Accélérateurs de prise	Accélérateurs de durcissement	Retardateurs de prise
Dosage		1 à 3 %	0,2 à 3 %	0,1 à 0,5 %
Introduction		Dans l'eau de gâchage		
Effets sur la prise		Accélération très variable suivant les dosages, les ciments et la température.		Retard très variable suivant dosages, ciment, température.
Effets sur les résistances	initiales (avant 3 jours)	Augmentées à 1 ou 2 jours.	Augmentées.	Diminuées à 1 ou 2 jours.
	finale (après 28 jours)	Légèrement diminuées (d'autant plus que la prise aura été accélérée).	Inchangées ou légèrement diminuées.	Légèrement augmentées.
Effets secondaires favorables				Amélioration de la maniabilité avec possibilité de réduction d'eau.
Autres effets		Possibilité d'une légère augmentation du retrait.		
Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement du ciment. (Extrait du guide SYNAD.)				

II.3.3. adjuvants modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques :

a) Antigels et antigelifs :

Les adjuvants commerciaux vendus comme antigels \sont des produits chimiques solubles analogues aux accélérateurs et qui activent l'hydratation du ciment. Le béton peut ainsi durcir avant que survienne le gel; on les appelle le plus souvent des pare-gels.

Les antigelifs protègent du gel le béton durci : ce sont surtout des entraîneurs d'air. Les doses à utiliser seront d'autant plus élevées que la température sera plus basse; elles varient entre 1 et 3% de la quantité de ciment.

a).1.utilisations :

- bétonnage par temps froid,
- protection du béton durci du gel,
- préfabrication, béton manufacturé.
- béton prêt à l'emploi (centrale à béton),
- tous travaux de béton armé de construction traditionnelle.

a).2.produits de base :

Chlorures de calcium, de sodium et aluminium; bases alcalines (soude, potasse, ammoniac); sels (carbonates, aluminates, borates de soude et de potasse); nitrates et nitrites et également des formates de calcium.

b) Hydrofuges :

Ils améliorent l'étanchéité à l'eau sous pression des bétons et les protègent de l'humidité en arrêtant l'absorption capillaire. Ils agissent surtout physiquement en bouchant les pores et canicules grâce soit aux particules très fines qu'ils contiennent soit aux produits précipitables ou gonflants.

Mais les hydrofuges ne peuvent boucher les pores que si ceux-ci sont relativement petits (figure). Ils ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, mal composé présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

L'action de ces produits est très variable suivant leur composition, leur dosage et les et les types de bétons auxquels ils sont incorporés. Ils sont souvent aussi efficaces pour les CPA qu'avec les CHF, CLK et CLC. Les produits commerciaux se présentent sous forme de

poudres ou de liquides. Les précautions à prendre sont les mêmes que dans les cas des plastifiants.

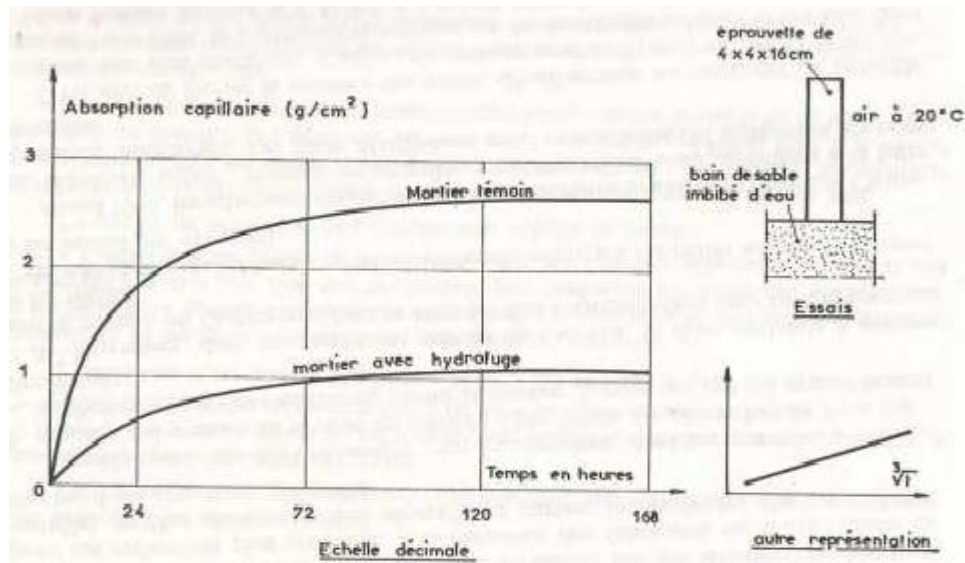


Figure 9: Absorption capillaire entre mortier témoin et mortier avec hydrofuges.

b).1 utilisation :

Bétons d'ouvrages hydrauliques : bassins, canaux, murs de fondations, piscines, réservoirs, silos, retenues d'eau, etc.,

- mortiers d'étanchéité : chapes (balcons, caves, garages, ponts, sols industriels, terrasses), enduits de façades, joints de maçonnerie, revêtements de conduite d'égouts et de galerie de tunnels.

b).1 produits de base :

Matières fines (bentonite, kieselguhr, chaux grasse), sels d'acides gras (stéarates, oléarates,...), fluidifiants (lignosulfates, ...), sulfate d'alumine, colloïdes gonflantes à base d'algues marines, etc.

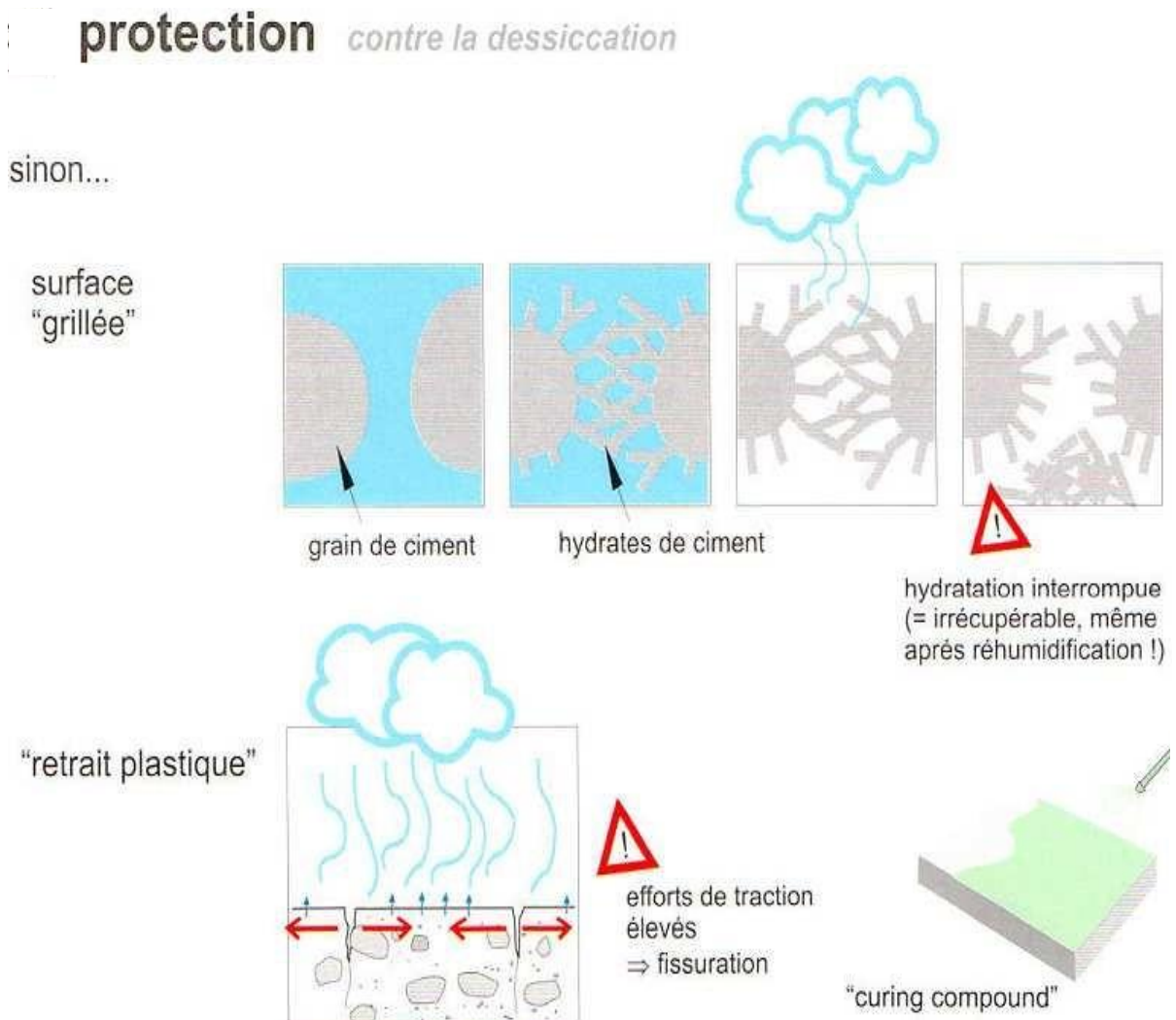
Tableau 14 : Caractéristique du béton susceptible d'être modifiée par classe d'adjuvant.

		Réducteurs d'eau	Plasti- fiants	Super- plasti- fiants	Accélé- rateurs de durcis- sement	Accélé- rateurs de prise	Retar- dateurs de prise	Entraîneurs d'air	Hydrofuges de masse
Ouvrabilité.			+	+					
Temps de prise.						-	+		
Résistances.	Court terme (3 j)	+		+	+	+	-		
	Long terme (> 28 j)	+				=	+		
Air occlus.								+	
Perméabilité sous pression hydraulique.				-					-
Résistance au gel du béton durci.								+	
Compacité.		+	+	+					
État de surface.			+					+	

c) Produit de cure :

on sait que le béton frais doit être protégé un certain temps après le gâchage afin d'éviter un départ trop important de l'eau qu'il contient. La dessiccation des mortiers et des bétons a pour conséquence un abaissement des résistances mécaniques, un poudroiement en surface ainsi que la formation de fissures profondes de retrait avant prise. Il est nécessaire de maintenir humide le béton. Un procédé moderne, simple et pratique consiste à pulvériser sur le béton frais, un produit de cure formant après application un film continu imperméable s'éliminant après quelques semaines sans laisser de traces.

Les produits de cure sont incolores et peuvent recevoir des colorants afin de faciliter le contrôle de leur application. Récemment, on leur a rajouté des pigments blancs (poudre d'aluminium) puisqu'ils puissent réfléchir les rayons solaires et éviter l'échauffement de la surface du béton.



Ils se présentent sous la forme d'un liquide qui doit être appliqué par pulvérisation sur la surface du béton frais presque immédiatement après le coulage. La consommation est souvent comprise entre 120 et 150 g/m². Après pulvérisation, l'eau de l'émulsion ou du solvant s'évapore laissant à la surface une mince couche continue de produit qui empêche l'évaporation de l'eau interne contenue dans le béton. Cette couche peut même protéger la surface du béton contre pluie. Il est déconseillé d'utiliser un produit de cure si le béton doit recevoir une chape ou une peinture, ou s'il s'agit d'une reprise de bétonnage.

c) .1.utilisations :

- les revêtements de la route, d'autoroutes, de pistes d'envol, de ponts, ...
- protection de dalles, planchers, terrasses, ...
- revêtements des berges de canaux,
- les tunnels et voûtes,
- les parements divers et réservoirs,
- les enduits et les chapes.

c) .2.Produit de base :

Cires ou paraffines en émulsions aqueuses ou dissoutes dans les solvants pétroliers ; caoutchouc chloré.

II.3.4. adjuvants pour coulis d'injection :

On sait que les ouvrages de bétons armé utilisant le système de câbles situés dans les gaines souples et étanches, celles-ci sont injectées d'un coulis de ciments. L'injection est effectuée après la tension des câbles dès que le ciment peut supporter sans risques les contraintes appliquées. L'injection est une bonne opération nécessaire mais délicate qui a pour but d'enrober les câbles, de les lier au béton et de les protéger contre la corrosion.

Le coulis doit entièrement remplir les vides et doit être fluide et stable et ayant un temps de prise correcte (> 190 min). Un certain nombre d'adjuvants peuvent être ajoutés au coulis afin d'en améliorer les qualités :

- retardateurs de prise (si la durée prévue d'injection est longue),
- entraîneur d'air (léger gonflement et protection du gel),
- expansif (afin de remplir complètement la gaine).


II.4. Contrôle et Stockage des adjuvants :

La réception d'un produit à utiliser comme adjuvant doit comporter un contrôle au laboratoire relatif à sa nature chimique, à son comportement vis-à-vis du liant, des granulats, etc. ; mais ce contrôle ne donnera aucun renseignement sur la durabilité du produit.

Le technicien devra exiger que les adjuvants soient accompagnés d'un certificat d'origine indiquant la date de fabrication et la date limite d'emploi au cas où le produit n'a pas une stabilité durable. Pour ces raisons multiples, une étiquette parfaitement lisible est exigé quel que soit le mode d'emballage. La plupart des adjuvants se présentent en fûts hermétiques stockable sur le chantier à pied d'œuvre.

La présentation en sachet dose ou en sac de poudre plus ou moins hygroscopiques peut nécessiter l'entrepôt à l'abri des intempéries. Il faut dans tous les cas suivre les instructions des fabricants qui en général, sont en mesure d'assister le technicien-utilisateur dans la mise en œuvre du produit.

Ces indications sont inscrites dans un cadre remplissant entièrement l'espace défini à l'article 3.1.1 conformément à l'exemple ci-après et de manière inaltérable.

Réducteur d'eau — Plastifiant DUPONTE — PLASTOU		
Produit par DUPONT, 34 route de X... — 02 (Ville)		
Distribué par SMITH, 27 th St London, SW2, GB		
FONCTION PRINCIPALE : Réducteur d'eau — Plastifiant		Norme NF P 18-335
FONCTION SECONDAIRE : Retardateur de prise		Marque NF 
EFFET SECONDAIRE : Hydrofuge		
DOSAGE : Plage d'efficacité sans effets nocifs 0,3 % à 0,6 %		Teneur en ions-chlore < 1 g/l
Liquide	brun foncé	Masse volumique : 1,1 kg/dm ³
MODE D'EMPLOI : à diluer dans l'eau de gâchage		
PRÉCAUTIONS DE STOCKAGE : craint le gel		
PRÉCAUTIONS ET LIMITES D'EMPLOI : Voir notice d'emploi : — pour temps de fin de prise — pour incompatibilité avec certains ciments		
PRÉCAUTIONS DE MANIPULATION : avec des gants		
Références de fabrication 82-045		Année limite d'emploi 1987

Indications facultatives
 Le fabricant a en outre la faculté de compléter les indications normalisées par toutes autres indications qu'il juge utiles à la bonne utilisation du produit.
 Ces indications ne doivent pas risquer de provoquer des confusions avec les indications normalisées.

Figure 10 : exemple d'étiquette devant figurer sur les emballages des adjuvants.

CHAPITRE III

Synthèses bibliographiques sur les hydrofuges

III.1 Les hydrofuge :

Un hydrofuge est un produit incolore possédant la capacité de protéger une surface poreuse. Celui-ci n'altère pas l'aspect de la surface même après vieillissement (UV, ...) et laisse la possibilité au béton de respirer (diffusion de vapeur d'eau libre). Ainsi, un hydrofuge empêche uniquement les liquides de pénétrer.[8][9][10][11].

Cette méthode de protection doit présenter également d'autres caractéristiques comme la possession d'une bonne résistance à la plupart des attaques qui existent et la capacité de pénétration ou de bonne adhérence au sein du béton.[12].

De tels produits sont à différencier des enduits et des peintures car, comme représenté à la figure 11, ils ne recouvrent pas les pores mais sont absorbés par le substrat et tapissent les parois des pores du béton. De plus, ceux-ci ne jouent aucun rôle mécanique au sein de l'ouvrage. .[8][9][10][11].

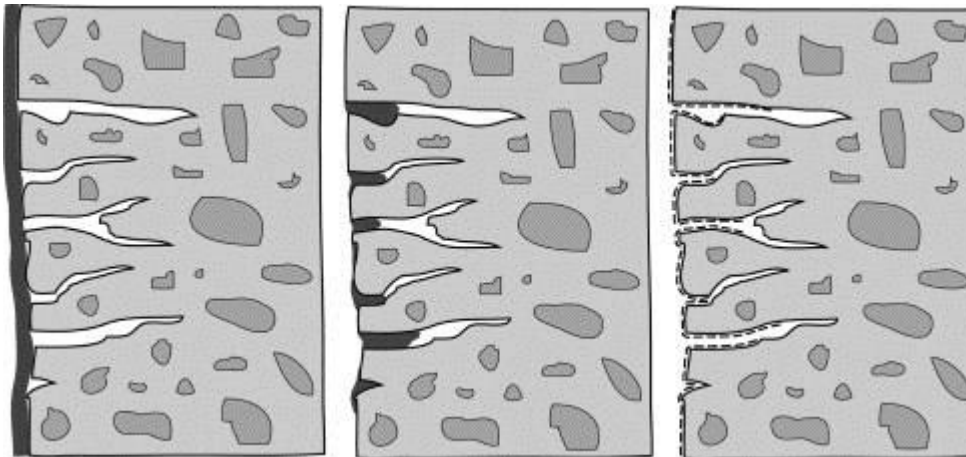


Figure 11 :Action des traitements de surface De gauche à droite : Enduits, bouche-pores et couvrant la surface interne [13].

Un hydrofuge est habituellement constitué au minimum de $\pm 5\%$ de matières actives dissoutes soit dans un solvant, soit dans un liquide organique ou soit dans de l'eau.[11]

L'usage d'un bon hydrofuge peut fortement (doubler voire plus)augmenter 5la durée de vie de service d'un bâtiment.

III.2 Historique [11] :

Observant que l'eau est le principal moteur de la dégradation du béton en corrodant les armatures, la volonté d'empêcher cet élément de s'introduire dans le béton s'est vite fait sentir.

Depuis plusieurs siècles, des produits pouvant empêché cette entrée d'eau sont recherchés et utilisés pour la protection des ouvrages réalisés en matériaux durables (pierres, briques, ...).

Ainsi, depuis l'Antiquité, de nombreux produits se sont succédé sur le marché pour essayer d'atteindre ce but. Au début, l'usage se limitait à des produits naturels (huile, résines, ...) avec des performances totalement méconnues. Ensuite, les surfaces d'immeuble étaient tout simplement recouvertes d'une couche (enduits, peintures,...) devant être souvent renouvelée.

Avec l'industrialisation de la chimie (vers le XIXe siècle), de nouveaux produits apparaissent dans la littérature de l'époque. A partir des années 50, des recherches prônent l'utilisation de peintures à l'huile. Tandis que d'autres spécialistes conseillent l'usage de dérivés d'esters, de polymères, de cires et de polymères synthétiques (début des hydrofuges modernes).

Les années suivantes, la performance très mitigée des différentes méthodes rend les utilisateurs septiques. Ces mauvais résultats sont la cause d'inexpérience dans ce domaine et l'inadéquation de ce produit à un usage industriel. Après ces observations, les scientifiques se sont penchés sur ces différents produits pour déterminer les attitudes à avoir afin d'assurer une durabilité plus importante. En même temps, d'autres solutions de protection apparaissent comme les "coatings" tels-que les résines époxydes.

Enfin, vers les années 70 apparaissent les silanes et siloxanes qui sont, actuellement, les produits les plus utilisés.

III.3.Effet des hydrofuges [10] :

L'effet des hydrofuges est, comme déjà précisé, de rendre la surface d'un revêtement hydrophobe sans entraver le passage de vapeur d'eau. Pour ce faire, un hydrofuge ne peut pas boucher les pores mais doit pénétrer à l'intérieur et rendre l'entièreté de la surface, sur une certaine profondeur, répulsive à l'eau liquide.

Ainsi, la seule façon que les hydrofuges ont pour effectuer cette demande est de jouer sur les caractéristiques d'attraction de la surface en béton. La plus importante pour ce que nous étudions est "les tensions superficielles". En effet, toute surface présentant une tension superficielle supérieure à celle de l'eau, attirera celle-ci et lui permettra de pénétrer par capillarité. Or, le béton, sans protection, possède une tension superficielle de 80 mN/m contre 73 mN/m pour l'eau.

La couche permettant cet effet hydrophobe ne mesure que quelques nanomètres et ne détériore donc pas l'aspect de surface.

L'hydrofuge permet donc de réduire la tension superficielle à une valeur proche de 20 mN/m. Ainsi, les gouttes d'eau atteignant la surface seront attirées par les autres gouttes d'eau qui présentent une tension superficielle presque semblable. Grâce à cela, le comportement capillaire se trouve modifié et le comportement en surface voit apparaître "l'effet perlant".

En ce qui concerne le comportement capillaire, lorsque l'hydrofuge n'est pas mis en place, le réseau capillaire attire et aspire de l'eau en son sein. La pose d'un traitement hydrophobe diminuant la tension superficielle en surface et dans les pores permet d'inverser totalement le comportement. En effet, l'eau se trouve repoussée hors du réseau capillaire. Une répulsion apparaît grâce à l'impossibilité pour l'eau de pénétrer dans le réseau. Ce nouveau comportement capillaire peut être expliqué par l'effet perlant qui est détaillé au paragraphe suivant.

La deuxième caractéristique, l'"effet perlant", consiste à avoir un angle de contact important pour minimiser la zone touchée par l'eau. L'angle de contact est celui mesuré entre le substrat et l'extérieur de la goutte d'eau au niveau du contact. En observant la figure 13, il est clair que plus l'angle est élevé, plus la goutte est repoussée de la surface, plus la tension superficielle du béton est faible et plus le frottement entre la goutte et la surface est faible également. On commence à parler d'un angle de contact acceptable à partir de 90° mais il est intéressant d'atteindre plus de 130°. [14]

L'effet perlant et l'effet sur le réseau capillaire sont représentés sur la figure 12. Une précision sur les angles de contact est apportée par la figure 13.

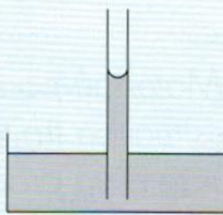

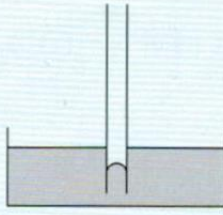
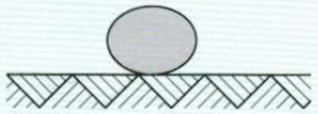
TYPE D'EFFET	COMPORTEMENT CAPILLAIRE	COMPORTEMENT EN SURFACE
<p>EFFET HYDROPHILE :</p> <p>matériaux pierreux non hydrofugés</p>	<p>ATTRACTION</p> 	<p>ÉTALEMENT</p>  <p>tension superficielle \approx 80 mN/m</p>
<p>EFFET HYDROPHOBE :</p> <p>matériaux pierreux hydrofugés</p>	<p>RÉPULSION</p> 	<p>EFFET PERLANT</p>  <p>tension superficielle \approx 14 à 24 mN/m</p>

Figure 12 : Effet d'un produit hydrofuge sur la capillarité et Effet perlant [10].

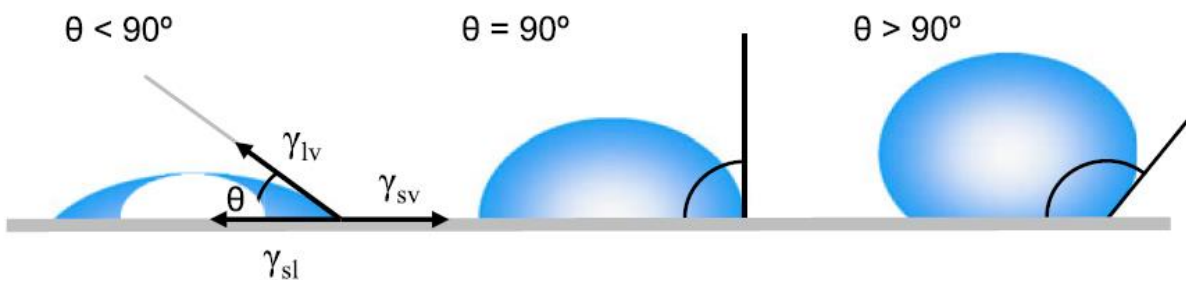


Figure 13 : Angles de contact à la surface d'un revêtement [14].

Les symboles présents sur la figure 5 servent à définir l'équilibre mécanique de la goutte d'eau sur un revêtement qui est énoncé par la formule (1). [14][15]

$$\gamma_{lv} \cos \theta_y = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (1)$$

où

γ_{sv} est l'énergie de surface à l'interface solide/vapeur ;

γ_{sl} est l'énergie de surface à l'interface solide/liquide ;

γ_{lv} est l'énergie de surface à l'interface liquide/vapeur ;

θ_y est l'angle de vapeur.

III.4.Types d'hydrofuges :

a) Hydrofuge de masse:

Ce type d'hydrofuge ne peut être utilisé que lors de la préparation du béton vu qu'il consiste en l'incorporation d'adjuvants dans celui-ci afin de rendre sa surface imperméable une fois durcie.

Ce genre de produit n'est pas utile dans mon travail et ne sera plus étudié par la suite. Seuls les hydrofuges pouvant être appliqués sur des ouvrages existants seront considérés. Ainsi, les deux chapitres qui suivent définissent mieux ce type de traitement.

Pour au moins citer un hydrofuge de masse, des produits composés d'acide gras acyclique et d'une émulsion aqueuse, composée de polymère et de globules aromatiques.

Il protège l'entièreté du béton en l'imperméabilisant et en empêchant la dégradation par les sels, acides et autres. [12]

b) Hydrofuges superficiels [12] :

Ce type d'hydrofuge, appelé également "enduit", ne pénètre pas le béton lors de sa pose sur celui-ci. Selon un TFE de 2009 [8], se référant à des recherches de Gagné R [16].

Ces enduits forment une couche supplémentaire sur le béton en adhérant parfaitement bien à sa surface, grâce à des liens physiques. Ces types d'enduits ont, généralement, un bon pouvoir d'imperméabilisation et résiste bien aux UV.

Les caractéristiques de ces produits sont totalement indépendantes du béton devant être protégé. Ces produits peuvent présenter une bonne efficacité pour autant qu'une importante adhérence existe.

c)Hydrofuges pénétrants [12] :

Ce type d'hydrofuge pénètre le béton et réagit avec celui-ci en profondeur. Ce produit ne bouche jamais les fissures mais recouvre plutôt les parois internes qui deviennent hydrophobes. Bien entendu, si une fissure est très large ou si celle-ci est toujours active, l'utilisation d'hydrofuge n'aura pas une efficacité maximale, voire nulle.

Au niveau de la performance, de nombreuses influences peuvent exister comme [12] :

- L'arrêt ou la diminution de la pénétration d'eau et des substances agressives tout en laissant respirer le béton

- L'importance de la pénétration du béton. Celle-ci varie habituellement de 1 à 3 mm et dépend de nombreux facteurs tels que la dose de produit utilisé, le type de béton, les conditions climatiques lors de la mise en place, la préparation de la surface avant imprégnation et la technique de la mise en place.
- La résistance chimique des produits face aux chlorures et alcalis.

Deux groupes au sein de ce type d'hydrofuge peuvent être mis en évidence. Des produits pénétrants peuvent laisser une couche résiduelle en surface, alors que la majorité des hydrofuges pénétrant n'en laisse aucune.

Les produits laissant une couche résiduelle 6 utilisent celle-ci pour assurer l'arrêt de l'eau et des agents agressifs. Néanmoins, ce type de fonctionnement quitte légèrement la définition même d'un hydrofuge. En effet, l'apparition d'une couche crée une barrière à la vapeur d'eau et provoque une différence d'aspect à la surface.

Le deuxième groupe de produits, ne laissant pas de couche superficielle, est le plus fréquemment utilisé. Ces hydrofuges sont composés d'agents actifs en solution dans l'eau ou du solvant. Les grandes particularités de ce type d'hydrofuge sont le faible coût de ce traitement, la facilité d'application sans préparation de surface et le respect de l'aspect d'origine.

III.5.Familles et exemples d'hydrofuges :

a)Enduits au latex :

Produits à base d'écétate de vinyle, d'acrylique et styrène et de résines acryliques. Même si largement utilisés, ces produits résistent peu aux UV et sont sensibles à l'humidité. Ainsi, leur utilisation sera privilégiée en intérieur. [12]

b) Ciment ou produits à base de ciment :

Distribués en poudre, divers types de ciment peuvent être créés en mélangeant cette poudre avec de l'eau ou un polymère au latex (émulsion de polymère et d'eau). [12]

c) Enduits polymériques :

Produits à base de résines diluées dans des solvants organiques. La couche active se dépose par simple évaporation du solvant.[12]

d) Résines époxy [12]

Ces résines sont obtenues grâce au mélange de deux composants (résines époxy et un durcisseur). Une fois le mélange réalisé et le produit mis en place, celui-ci durcit en quelques heures pour devenir fortement rigide et résistant (aux attaques tant physiques que chimiques).

Mais outre ses bonnes caractéristiques, la production à grande échelle semble compliquée vu la nécessité d'un mélange de deux composants très peu de temps avant la mise en place. De plus, comme précisé plus haut, ce produit annule totalement la perméabilité à la vapeur et forme un film luisant (voire coloré) sur la surface.

Finalement, la résine époxy présente un coefficient de dilatation différent du béton.

e) Silicones :

La famille des silicones organiques est certainement la plus étudiée et la plus utilisée actuellement. Plusieurs sous-familles de produits existent en fonction de la taille des molécules de l'agent actif. En effet, les silicones sont des polymères composés par une répétition d'un ou plusieurs monomères. Les éléments présents au sein de ces monomères ont, comme pour le silicate, de l'oxygène et du silicium. La différence avec les hydrofuges inorganiques vient de la présence dans les polymères de groupes organiques tels que des hydrocarbures

La principale caractéristique de ce type d'hydrofuge est l'absence totale de film à la surface et de liens physiques avec le béton. Celui-ci pénètre au sein des pores, sans les boucher, et réagit chimiquement avec le béton. Cette pénétration est influencée par le poids moléculaire et le type de solvant utilisé. Plus la taille moléculaire est faible, plus l'agent actif peut pénétrer en profondeur.

Pour que les produits agissent, deux réactions chimiques doivent avoir lieu : La première est l'"hydrolyse" qui consiste à faire réagir les molécules de silicones avec l'humidité pour former des groupes silanols. Ceux-ci réagissent eux même avec les groupes.

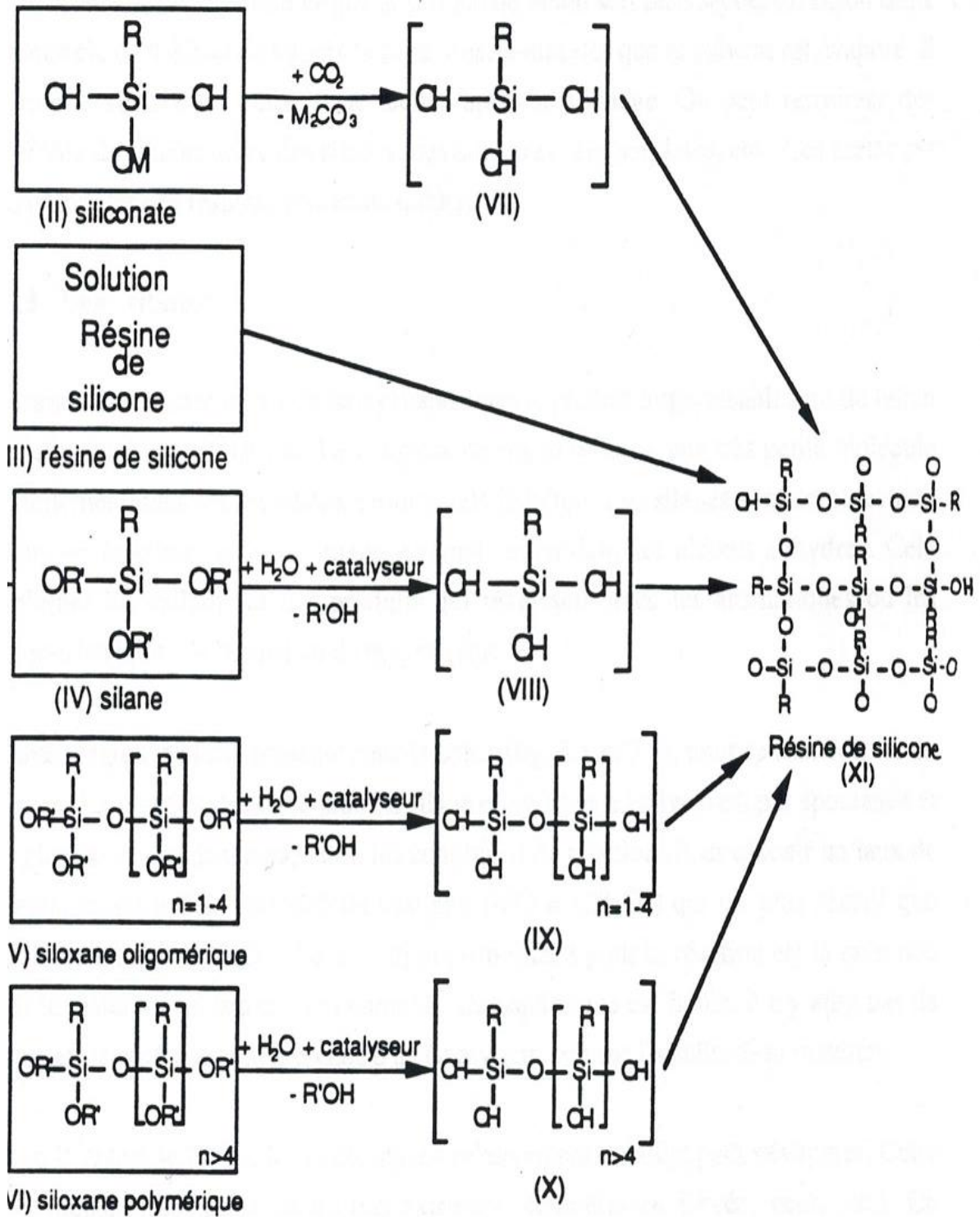
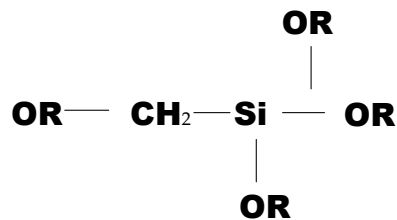


Figure 13 : Schématisation des réactions des hydrofuges de la famille des silicones [17]

Hydroxyles (OH) béton lors de la deuxième réaction, appelée "condensation". Ces deux réactions pour l'ensemble des produits silicones sont illustrées à la figure 6. Mais pour une meilleure compréhension, l'ensemble du processus est schématisé pour le silane sur la figure 15.

Silicones monomères (ou silanes) [12] [10] [17]

Une molécule de silane est schématisée ci-dessous :



Molécule de silane avant hydrolyse) [18]

Ce produit est assez récent et est utilisé de manière industrielle depuis les années septante. La particularité de ce composé est de posséder de très petites molécules 7 qui lui permettent de pénétrer plus facilement au sein du substrat poreux.

Comme précisé précédemment, le silane se condense en réagissant avec l'eau pour former la couche de protection, la résine de silicone. La vitesse de condensation peut varier selon de nombreux paramètres, à savoir le type de silane utilisé 8 et les conditions d'humidité. En effet, cette réaction a obligatoirement besoin d'humidité et d'un catalyseur, qui fournit l'alcalinité, pour pouvoir se réaliser.

Lors de la formation de cette résine, une évaporation de silane peut se produire vu la volatilité de ce composant. La vitesse de condensation est augmentée dans le cas où l'évaporation est importante à cause de paramètres environnementaux comme le vent et la température. Ainsi, lors de mauvaises conditions, la disparition du silane par évaporation se réalise pendant une plus longue durée vu le ralentissement de la réaction.

Pour contrer cela, la seule solution est d'utiliser des solutions à haute concentration en silane (20 à 40 %) qui compensent la perte.

Ainsi, outre les avantages tels que son grand pouvoir de pénétration, le silane est très dépendant des conditions climatiques lors de la mise en place. De plus, en cas de pluie sur des surfaces fraîchement imprégnées, un lessivage n'est pas impossible.

Des combinaisons avec d'autres produits fournissent des produits de très bonne qualité.

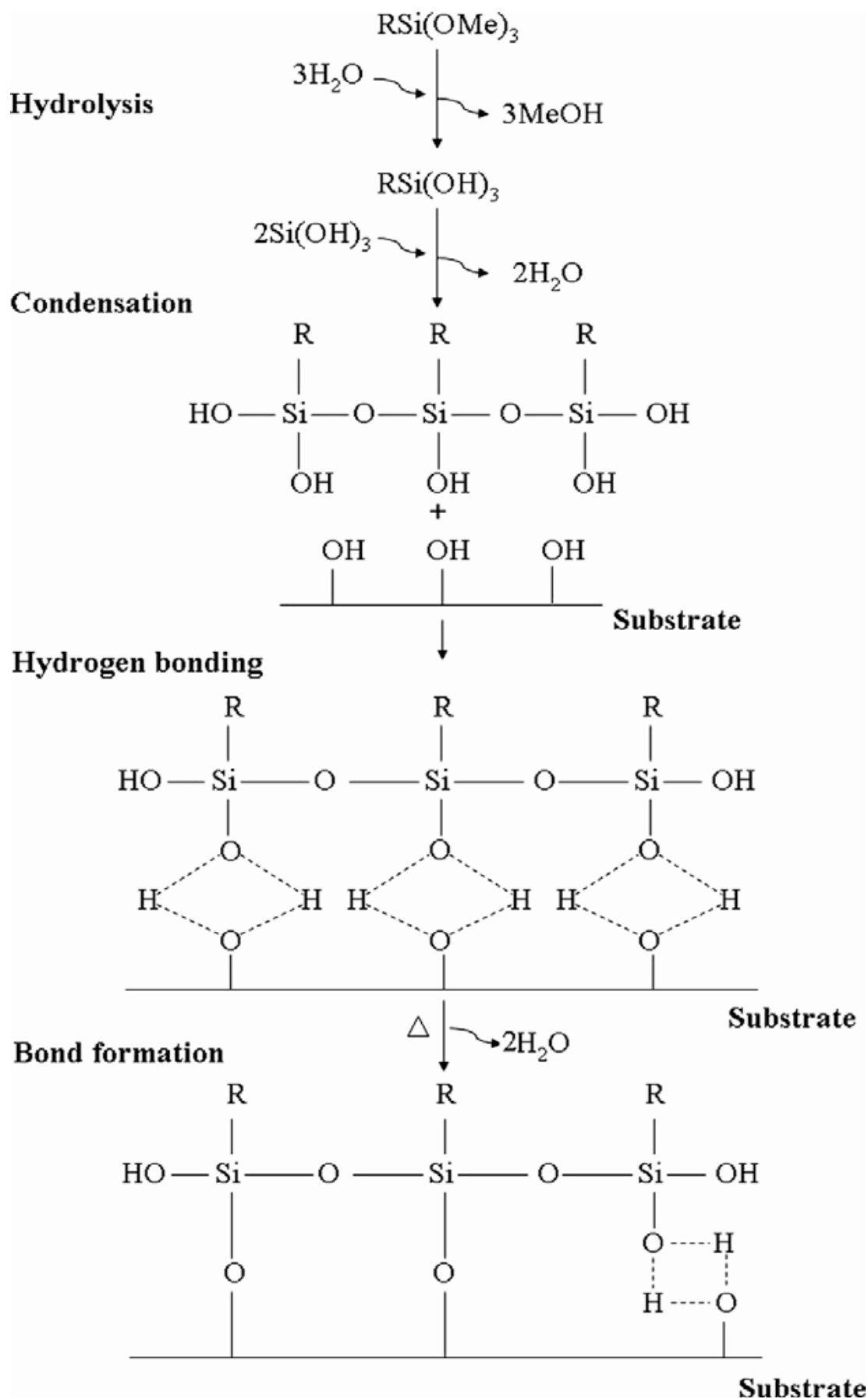


Figure 14 : Schématisation des réactions du silane (hydrolyse et condensation) [19]

Ce produit est obtenu en modifiant la composition du silane. On sait que l'ajout d'une faible quantité d'eau à un alkylalkoxysilane dissocie les groupes alkoly ($R'O'$) et crée le siloxane qui possède des courtes chaînes et donc une structure moléculaire plus lourde.

Ce produit possède les avantages du silane tout en empêchant une évaporation aisée lors de la polymérisation. Ainsi, un gain d'agents réactifs est réalisé lors de la mise en solution vu que seulement 8 à 9% sont nécessaires (contre 20 à 40% pour le silane). Comme le silane, le siloxane a besoin d'humidité et d'un catalyseur pour pouvoir réagir.

La principale différence est la possession d'un catalyseur par le siloxane, ce qui le rend totalement indépendant du substrat concernant cette problématique.

Un siloxane présentant de longues chaînes est également possible. Ceux-ci sont appelés "siloxane polymérique" et agissent de manière similaire au siloxane précédent tout en ayant un poids moléculaire encore plus élevé.

Siliconates [17]

Produits fortement alcalins dilués dans l'eau et/ou l'alcool. Après son hydrolyse, il réagit avec le CO_2 pour créer une substance active qui protégera le béton. Si ce produit est mis en place avec excès, une substance blanche se dépose. Cette substance provient de la création de carbonate de potassium lors de la polymérisation.[10]

Pour éviter ce problème esthétique, l'usage de cet hydrofuge est de moins en moins fréquent pour être remplacé par les résines de silicone.

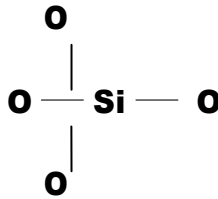
Résines de silicones [12] [17]

L'utilisation de ces résines s'effectue sous forme de solution contenant 5% de matières actives, obtenue après dissolution de celle-ci dans du solvant organique. La pénétration de cet hydrofuge dépend du solvant utilisé mais ne présente que peu de difficulté vu la faible taille des molécules.

Il faut compter 4 à 5 heures après la mise en place, sur une surface sèche, pour que l'effet de protection soit actif. Cette couche hydrophobe laisse toujours passer la vapeur mais peut modifier l'aspect du substrat en tâchant celui-ci lors du séchage.

f) Silicates :

Une molécule de silicate est représentée ci-dessous :



Molécule de Silicate

Ce type d'agent est initialement sous forme concentrée. Une dilution doit être entreprise pour permettre une application efficace et assurer une bonne réaction chimique avec la chaux libre du béton.

Cette famille d'hydrofuges est reconnue efficace pour sa résistance aux abrasions pouvant agir sur la surface du béton.[12] Mais, selon R. Gagné, le pouvoir imperméabilisant peut être remis en question.[16]

Certaines références ([16], [20] et [21]) assurent que le silicate de soude peut ne pas pénétrer le béton, car celui-ci réagit rapidement, lors de la mise en contact avec le béton, avec les composés calcium se trouvant à la surface et une couche durcie et souvent brillante se forme. Cette couche entrave le reste de l'application de pénétrer dans le béton. De plus, une efficacité réduite comparée aux hydrofuges silicones est également conclue. La seule solution pour atteindre un même niveau de réduction de la perméabilité est d'effectuer plusieurs passages d'imprégnation ou de le placer sur le béton à peine durci.[20]

g) huile de lin [12] :

Hydrofuge d'origine naturelle (appelé également hydrofuge bio-sourcé) qui était un produit couramment utilisé avant l'arrivée de la famille des silicones.

Ce produit est présenté comme efficace et économique. Néanmoins, il ne serait présent que sur une faible durée au vu de sa sensibilité aux alcalis du béton. Ainsi, la durabilité relative à l'écaillage est inférieure à celles des autres hydrofuges. De plus, certaines études ont prouvées que, comparé aux autres hydrofuges, celui-ci était moins efficace au niveau de la perméabilité à l'humidité.

III.6.Durabilité:

L'ensemble des essais le plus souvent testés dans les ouvrages de référence sont liés à trois des conditions principales d'un hydrofuge, à savoir, l'imperméabilité à l'eau liquide, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'arrêt de tous les agents agressifs extérieurs.

Les nombreuses recherches dont C. Abesque [12] fait référence dans sa thèse concluent que les silanes et les siloxanes (ou un mélange des deux) sont les meilleurs produits sur le marché. Ces différentes recherches concluent également que les caractéristiques du béton sont importantes dans l'efficacité du traitement. Pour augmenter la durabilité, la plupart des auteurs de ces recherches s'accordent à recommander une bonne préparation de surface avant application d'hydrofuge.

Ainsi, les auteurs s'entendent pour assurer la supériorité des silanes et siloxanes face aux autres produits existants et ajoutent que les caractéristiques du béton sont primordiales. Un très bon béton vaut mieux qu'un béton de mauvaise qualité protégé. Par contre, concernant, par exemple, l'écaillage, les recherches obtiennent des résultats allant d'une dégradation fortement accélérée de la surface à une protection efficace.[17][12]

Des recherches récentes [22] confirment la très bonne efficacité du silane et du siloxane sur l'absorption d'eau avec une variabilité diminuée au facteur e/c. Cette même conclusion est annoncée pour la perméabilité aux chlorures. De plus, l'application de traitements de surface retarde l'initiation de la corrosion. Mais, concernant le gel-dégel et l'écaillage, cette recherche souligne le fait qu'une application du traitement sur du béton humide ne fournira pas l'efficacité que celui-ci aurait dû avoir sur du béton sec.

M.H.F. Medeiros[23] confirme l'efficacité face à la capillarité mais suggère une faible diminution de la perméabilité aux chlorures après traitement. Cette dernière affirmation est réfutée par J. de Vries et son équipe [24] qui ont effectué des tests sur sept hydrofuges contenant divers pourcentages de silane non dilué ou dilué soit dans l'eau soit dans un solvant organique. Ces différents essais peuvent être intéressants à analyser pour différencier les efficacités en fonction des concentrations de silane. Sur un aspect plus visuel, S. Eyssautier-Chuine et son équipe [25] concluent, sur base d'une recherche expérimentale, qu'un hydrofuge dilué dans l'eau n'a pas empêché la colonisation sur la pierre après six mois. Le cercle des partenaires du patrimoine [11] confirme également l'intérêt du solvant face à l'eau en assurant l'inexistence de couche résiduelle en surface et la meilleure pénétration de l'agent hydrofuge. M.H.F. Medeiros [26] confirme également le non-respect de critères par les silane/siloxane dilués dans de l'eau et donc les meilleures performances de la dilution dans des solvants.

Cette recherche confirme également la bonne efficacité pour la capillarité, tandis que la pénétration sous pression est beaucoup moins diminuée.

P.A.M Basheer et son équipe [27] effectue, en 1997, un résumé de l'ensemble des études et tests qui ont été réalisés sur les familles d'hydrofuges existants. Malgré un grand nombre d'analyses, leurs conclusions restent l'existence d'une faible connaissance de la durabilité réelle et à long terme de certains produits modernes.

En conclusion, les silanes et siloxanes sont, sans conteste, les meilleurs hydrofuges présents sur le marché actuellement. L'utilisation de ceux-ci dilués dans du solvant est préférée par rapport à une dilution dans de l'eau qui propose un produit moins pénétrant et plus visqueux. Au niveau de la durabilité à des vieillissements, celle-ci est confirmée à l'unanimité pour une barrière contre l'eau entrant par capillarité (parois inclinée et eaux de pluie). Par contre, en ce qui concerne l'intrusion des chlorures et la pénétration d'eau sous pression, les résultats sont plus mitigés. Finalement, concernant l'écaillage, cette dégradation dépendant de nombreux facteurs, les recherches n'arrivent pas à tomber en accord.

CHAPITRE IV
ETAT DE L'ART SUR L'EFFET
D'HYDROFUGE DE TYPE SIKA SUR LE
COMPORTEMENT PHYSICOMECHANIQUES
DE BETON ORDINAIRE

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les résultats des recherches scientifiques qui ont été conduit par plusieurs chercheurs sur la thématique de l'effet l'hydrofuge de type SIKA sur les performances physicomécaniques de béton ordinaire, **Les travaux de recherches conduites par BEZZINA.**

Au début, On présentera une synthèse bibliographique qui montre les résultats des études antérieurs sur les propriétés physiques comme la porosité du béton incorporant des différents pourcentages d'hydrofuge. Par la suite, on présentera des études conduit par plusieurs chercheurs sur l'effet de l'hydrofuge sur les propriétés durcies et de durabilité des matériaux cimentaires (bétons aux mortiers) contenant ce type d'adjuvant. De plus, on trouve par des études publiés sur cette thématique d'origine Algériennes.

IV.2. Etude des propriétés des matériaux utilisés :

Le béton (ou le mortier) est constitué des composantes dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont différentes, chacun joue un rôle dans le comportement et la qualité du béton ou du mortier.

Nous avons utilisé pour la confection du béton des matériaux locaux dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH) de l'université de Guelma.

Le choix des matériaux s'est porté, sur leur disponibilité dans la région de Guelma. Le granulats est le plus souvent choisi pour son disponibilité local et ceci pour des raisons purement économiques liées au coût du transport.

Les matériaux utilisés sont :

- 1- Un sable du littoral de mer,
- 2- Un ciment portland composé CEM II-A (CPJ 42.5): Hajar Assoud la région de Skikda,
- 3- Eau de gâchage: c'est l'eau du robinet,
- 4- Hydrofuge SIKA.
- 5- Dix-huit formules d'adjuvant hydrofuge dans le cadre de teste.

IV.2.1 sable de littoral de mer :**Tableau 15: Caractéristiques physiques de sable.**

Masse Volumique Apparente (g/cm³)	1.540
Masse Volumique Absolue (g/cm³)	2.667
Teneur En Eau (%)	0.33

IV.2.2 Ciment :

Le ciment utilisé dans cette recherche est un ciment portland composé CEM II-A (CPJ42.5) d'Hajar Assoud la région de Skikda.

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse, en tant que régulateur de prise. Il répond aux exigences de la norme NA442 : 2000.

IV.2.2.1 Caractéristique mécanique :

La limite inférieure de la résistance à la compression à jeune âge (02 jours) est 20,0 N/mm² et les résistances à la compression font apparaître une valeur moyenne des résultats à 28 jours d'âge voisine de 42,5 N/mm².

Les valeurs limites garanties sont :

RC = 18,0 N/mm² à 02 jours.

RC = 40,0 N/mm² à 28 jours.

IV.2.2.2 Caractéristique chimique :

- La teneur en sulfates (SO₃) dans le ciment = 4,0%.
- La teneur en chlorures (Cl) = 0, 1%

IV.2.3.Eau de gâchage :**IV.2.3.1 Caractéristiques physiques:**

L'eau de gâchage doit être propre et ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises. Les tolérances réglementaires des matières en suspension sont les suivantes :

- 2 g/litres pour les bétons de types A et B
- 5 g/litres pour les bétons de types C

IV.2.3.2 Caractéristiques chimiques:

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/litre pour les bétons des types A et B
- 30 g/litre pour les bétons du type C

Toute eau douteuse doit être soumise à une analyse chimique [30].

IV.2.4.Hydrofuge SIKA:**IV.2.4.1.Description :**

L'hydrofuge (SIKA) liquide est un hydrofuge de masse pour un béton, de couleur blanche conforme à la norme NF EN 934-2 [31].

IV.2.4.2.Mode d'emploi et dosage :

L'hydrofuge (SIKA) s'ajoute dans le malaxeur en même temps que l'eau de gâchage. Plage d'utilisation recommandée : 0.7 à 2 % du poids du ciment (soit 0.68 à 1.96 litre pour 100 kg de ciment (voir annexe B).

IV.2.4.3. Propriétés et domaines d'application :**Tableau 16:** Caractéristiques de l'hydrofuge SIKA

Aspect	Couleur	Densité	Teneur en chlorure
Liquide	blanc laiteux	1.02 ± 0.01	≤ 0,1 %

L'hydrofuge (SIKA) permet la confection de béton étanche dans la masse : fondation, radier, réservoir, béton résistant à l'attaque des eaux séléniteuses, des eaux de mer, des eaux industrielles ou des eaux pures.

IV.3. Méthodes expérimentaux :**IV.3.1 principe :**

- Mesure des perméabilités à l'eau : mesure de la quantité d'eau absorbée sous pression sur des éprouvettes en béton (essai principal).
- L'expérimentation que nous avons mise en œuvre consiste à conduire des essais de résistance à la traction et à la compression sur des éprouvettes en mortier de ciment.
- Essais pour l'évaluation de la perte de masse (porosité) sur des éprouvettes en mortier.

IV.3.2. Paramètres des essais :

Les paramètres influant sur la résistance du mortier sont nombreux et variés, nous avons retenu pour cette étude les paramètres suivants :

- La nature du sable: le sable utilisé dans cette étude est un sable de mer.
- Le rapport Eau/Ciment : nous avons fixé le rapport E/C = 0,66.
- Composition du mortier et du béton : pour pouvoir évaluer leurs caractéristiques, on a pris comme composition celle d'un mortier, composé en poids de :
 - Une partie de ciment
 - Trois (3) parties de sable
 - 2/3 parties d'eau

Et celle d'un béton :

- Une partie de ciment
- Deux (2) parties de sable
- Trois (3) parties de gravier
- 2/3 parties d'eau

IV.3.3. Préparation de béton et de mortier :

IV.3.3.1 Equipement utilisé pour la préparation :

- Une balance électronique qui nous permet des peser les quantités nécessaires des matériaux (Figure 16) ;
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm³, ces éprouvettes utilisées pour les essais de résistance à la traction et à la compression (Figure 17).



Figure 15: Balance électronique.



Figure 16 : Moules normalisés

- Des moules normalisés (NF EN 12390-1) permettant de réaliser des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm³, ces éprouvettes utilisés pour les essais de perméabilité à l'eau comme représenté dans la figure 18 suivante:



Figure 17: Eprouvettes cubiques.

IV.3.3.2. Mode opératoire :

Le sable et le ciment et le gravier sont gâchés avec de l'eau dans les proportions décrites dans la composition de béton. Le béton est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196,1

IV.3.3.3. Confection des éprouvettes :

Pour la Confection des éprouvettes; nous avons procédé de la façon suivante :

- Huiler les moules,
- Vérifier le serrage des moules,
- Préparer un mélange homogène du béton,
- Remplir les moules de béton frais,
- Vibrer le mortier,
- Une fois le moule est rempli, araser la surface avec une règle métallique.
- Décoffrer le moule après 24 heures,
- Répéter la même opération en changeant le paramètre étudié.

IV.4. Description des essais expérimentaux:

- Les essais pour l'évaluation de la résistance à la flexion et à la compression ;
- Les essais de durabilité: sont des essais de perméabilité à l'eau (mesure de la quantité d'eau absorbée sous pression) et l'évaluation de la perte de masse (porosité).

IV.4.1. Mesure des résistances en flexion et en compression:

IV.4.1.1. Equipements utilisés:

Les essais de compression et de flexion ont été réalisés à 28 jours, sur des éprouvettes de mortier mesurant $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ suivant la norme EN 1015-11.

Une machine d'essai (Figure 19) permettant d'appliquer des charges jusqu' à 150 KN. La vitesse de mise en charge choisie est de 0.05 MPa/s conformément à la norme.



Figure 18 : Presse pour les essais de flexion et de compression sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

IV.4.1.2. Principe de l'essai:

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au schéma décrit sur la figure suivante :

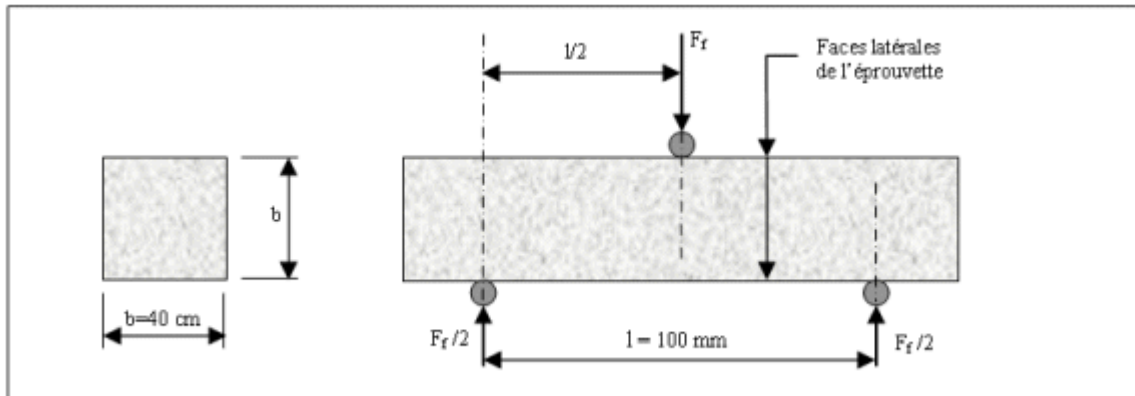


Figure 19 : Principe d'essai de résistance à la flexion.

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f.l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = (1,5 \cdot F_f \cdot l) / b^3$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals ($1\text{MPa}=1\text{N}/\text{mm}^2$) vaut :

$$R_f \text{ (MPa)} = 0,234 \cdot F_f$$

- Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression (figure III-6). Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra:

$$R_C \text{ (MPa)} = F_C \text{ (N)} / b^2$$

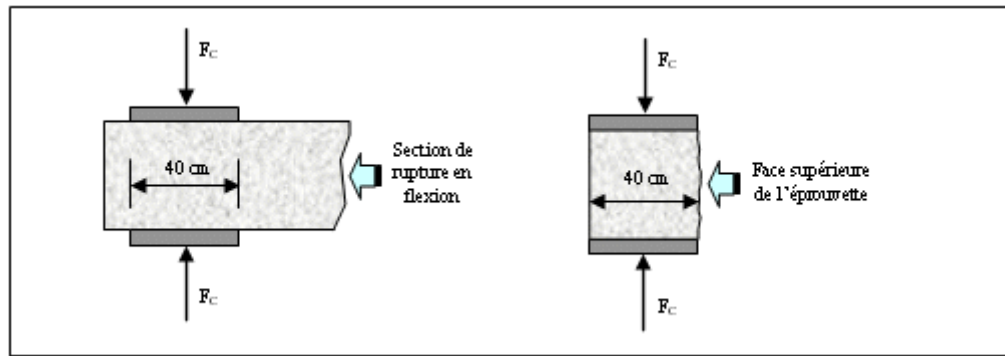


Figure 20 : Principe d'essai de résistance à la compression.

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_C est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$R_C \text{ (MPa)} = F_C \text{ (N)} / 1600$$

IV.4.2. Essai pour l'évaluation de perte de masse (porosité) :

IV.4.2.1. Objectif :

Ces essais ont été réalisés afin d'étudier l'évolution de la perte de masse ou bien la porosité.

IV.4.2.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer par pesée les éléments suivants: la masse d'un corps d'épreuve sec et sa masse lorsqu'il est saturé en eau.

$$\varepsilon(\%) = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100$$

- m_{sat} : masse de l'éprouvette saturée,
- m_{sec} : masse de l'éprouvette séchée à 105 °C,
- ε (%) : Porosité à l'eau (Porosité en poids).

IV.4.2.3.Mode opératoire :

Les éprouvettes ont été confectionnées et séchées (conservés) à l'air pendant 28 jours puis immergé totalement dans l'eau durée de 24heures (m_{sat}), et enfin chauffés dans une étuve électrique à 105°C pendant 24heures, (Figure 22).

La masse de l'éprouvette séchée (m_{sec}) est alors déterminée par simple pesée.



Figure 21 : Etuve électrique.

IV.4.3. La durabilité ou mesure de perméabilité à l'eau [32]:

Elle est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide.

IV.4.3.1.Principe :

De l'eau est appliquée sous pression (de 4,5 à 5bars) sur la surface du béton durci. Ensuite on pèse les éprouvettes après leur saturation total pour déterminée la quantité d'eau absorbée et enregistrée le temps.

IV.4.3.2. Appareillage et dispositif d'essais :

Le dispositif d'essai doit permettre de placer l'éprouvette, de dimension donnée, de telle façon que la pression d'eau peut s'exercer sur la zone d'essai, et de lire en continu la valeur de pression. Un exemple d'appareillage est présenté dans la figure 23 suivante :



Figure 22: Perméabilmètre à l'eau.

IV.4.3.3.eprouvette :

L'éprouvette doit être de forme cubique, cylindrique ou prismatique. La dimension de l'arête ou du diamètre ne doit pas être inférieur à 150 mm.



Figure 23 : Essais de perméabilité à l'eau.

IV.4.3.4. Mode opératoire :

- **Préparation d'éprouvettes** : la surface de l'éprouvette qui reçoit la pression d'eau doit être rendue rugueuse à l'aide d'une brosse métallique, immédiatement après le démoulage.
- **Application de la pression d'eau** : l'essai doit être pratiqué sur des éprouvettes âgées de 28 jours au moins. Ne pas appliquer la pression d'eau sur la surface d'une éprouvette arasée à la truelle. Placer l'éprouvette dans le dispositif d'essai et appliquer une pression d'eau de 500 ± 50 KPa. Au cours des essais, observer régulièrement l'apparence des surfaces de l'éprouvette d'essai non exposées à la pression d'eau pour noter l'éventuelle présence d'eau. En cas de fuite, s'interroger sur la validité de l'essai et consigner l'événement.

IV.5. Analyse des résultats et interprétations :**IV.5.1. Discussion :**

Pour que l'adjuvant hydrofuge soit conforme aux normes et aux exigences des industriels et des marchés, il doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Absorption capillaire sous pression de 5 bars: béton adjuvanté < 50% de béton témoin.
- Résistance à la compression : béton adjuvanté / béton témoin > 85%.

Remarque :

- Les essais de résistance à la flexion et de porosité sont des essais complémentaires et confirmatifs.

- Critère de la norme NF EN 934-2 : % d'absorption capillaire < 50%.

IV.5.2 Résultats expérimentaux :

Les résultats des essais sont récapitulés dans le tableau 17 :

N° Formule	A (g)	B (g)	[B] (M)	C (g)	[C] (%)	D (g)	E (g)	Capillarité (g/h .cm ²)	R _f (MPa)	R _c (MPa)	Porosité (%)
1	20	20	10	20	90	20	0	0,41	4,34	10,77	10,09
2	20	20	10	20	95	0	0	0,35	----	----	----
3	20	10	10	0	0	0	0	0,75	----	----	----
4	20	10	10	0	0	20	1	0,81	----	----	----
5	20	10	10	0	0	20	0	1,35	----	----	----
6	20	10	10	0	0	120	0	0,44	----	----	----
7	20	10	10	5	95	120	0	1,53	3,6	7	10,19
8	10	5	10	5	50	60	0	2,35	4,29	6,6	9,45
9	17,2	5	5	5	95	44	1	2,84	3,8	8,86	9,72
10	17,2	5	5	5	95	20	0	2,44	----	----	----
11	30	5	15	10	50	115	0	0,9	3,73	10,63	9,89
12	30	5	15	10	50	100	1,7	3,51	3,79	8,54	10,3
13	20	11	10	10	80	40	0	0,22	5,53	11,41	9,61
14	30	0	0	10	50	20	0	2,8	----	----	----
15	30	0	0	5	95	20	0	2,62	----	----	----
16	30	20	5	5	80	40	0	2,49	3,78	10,26	9,47
17	32,5	0	0	20	90	20	0	0,7	3,85	9,19	9,06
18	32,5	0	0	20	90	40	1,4	2,5	4,21	11,78	8,94
Témoin								0,41	5,00	9,25	11,32

Tableau 17: Résultats des essais.

Si on compare les résultats des essais des bétons adjuvantés pour les dix-huit formules avec le témoin on peut conclure que :

- L'addition du l'émulsifiant (E) dans les quatre formules d'hydrofuge savoir (4, 9, 12 et 18), provoque une augmentation remarquable de capillarité du béton adjuvanté et une diminution des résistances mécanique de ce dernier. Ceci est nuisible aux propriétés des bétons.
- Une amélioration acceptable est remarquée dans les propriétés des bétons adjuvantés par la formule d'hydrofuge N°13; avec une diminution de près de 46% de capillarité et une augmentation des résistances à la compression (Rc) de 23% et à la flexion (Rf) de 10%.

IV.5.3L'effet de l'hydrofuge SIKA sur les propriétés physiques de béton :

IV.5.3.1 Porosité :

Réf de l'éprouvette	Masse humide (g)	Moyenne (g)	Masse Sèche (g)	Moyenne (g)	Variation (g)	Moyenne (g)	ρ_{moy} (g / cm ³)	porosité (%)
Témoin	1	540,7	478,2	478,6	62,5	64	1,87	13,37
	2	541,6	475,8		65,8			
	3	545,6	481,8		63,8			
SIKA	1	521,1	458,7	460,9	62,4	63,4	1,80	13,75
	2	524,3	460,7		63,6			
	3	527,5	463,4		64,1			
Hydro1	1	487,4	446,2	451,2	41,2	40,7	1,76	9,02
	2	490,5	451,9		38,6			
	3	497,8	455,6		42,2			

Tableau 18: Variation de masse du mortier immergé totalement.

(Mesure de porosité)

Où :

Témoin : les éprouvettes de mortier sans hydrofuge (référence).

SIKA : les éprouvettes de mortier avec l'hydrofuge SIKA.

Hydro1 : les éprouvettes de mortier avec notre formule optimisée.

Cette propriété consiste à déterminer par pesée les éléments suivants: la masse d'un corps d'épreuve sec et sa masse lorsqu'il est saturé en eau.

L'étude conduit par **BEZZINA** sur le mortier normal adjuvanté par deux types d'hydrofuge : de type SIKA et hydro1. Les résultats de la porosité a été montré que l'ajoute de hydrofuge de type SIKA ne change pas la porosité, par contre l'autre hydrofuge produit une grande diminution de la porosité par rapport au mortier témoin.

IV.5.3.2 Absorption capillaire :

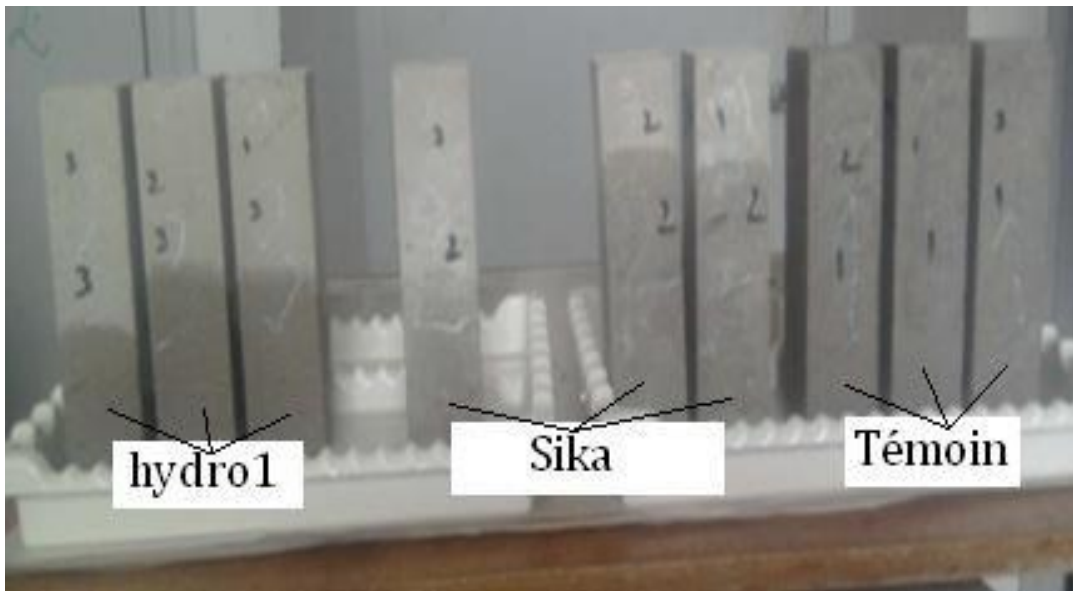


Figure 24 : Image des éprouvettes des trois mortiers pour les essais d'absorption capillaire.

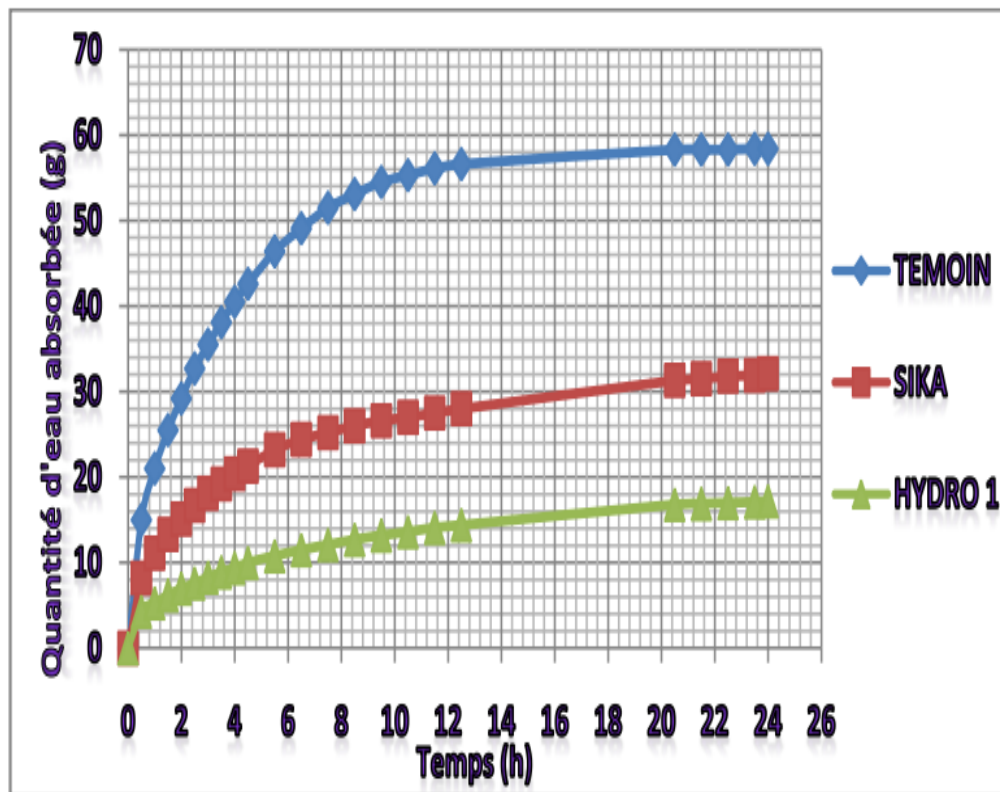


Figure 25. L'absorption d'eau par capillaire durant 24 heures d'immersion partielle (5mm)

Les travaux de recherches conduites par BEZZINA sur l'effet des deux hydrofuges différents sur l'absorption d'eau par immersion des mortiers de ciment. Le premier est le mortier témoin **TEMOIN** et deux autres mortiers adjuvantés par deux hydrofuges différents le premier de type SIKA et le deuxième de type HYDRO1. Leurs résultats de l'absorption d'eau par immersion montrent les conclusions suivantes :

- ✓ Un début de saturation de témoin après 14 heures d'immersion partielle.
- ✓ Et une diminution dans la quantité d'eau absorbée par capillarité pour les deux mortiers adjuvantés mais par des degrés différents; cette diminution est évaluée à 39,3% et 67,4% pour les hydrofuges SIKA et l'hydro1 respectivement.

Ces résultats montrent une diminution remarquable dans la capillarité de béton adjuvanté par l'hydrofuge SIKA, elle est égale 72,84% par rapport au béton témoin.

✓ Une augmentation dans la capillarité de béton adjuvanté par l'hydrofuge 1, elle est égale à 18, 27% par rapport au béton témoin.

IV.5.4 L'effet de l'hydrofuge SIKA sur les propriétés mécaniques de béton :

Les résultats sont exprimés dans le tableau suivant:

Réf de l'éprouvette	Mortiers				Bétons		
	R_f (MPa)	R_c (MPa)	R_c (MPa)	R_c (MPa)	R_c (MPa)		
Témoin	1	16,227	14,873	14,700	11,15	12,16	
			15,083				
	2		17,091		12,266		13,18
			16,575				
SIKA	1	14,078	11,142	12,619	16,04	17,12	
			14,796				
	2		12,744		10,750		18,20
			13,790				
Hydro 1	1	8,916	7,427	9,187	11,14	11,53	
			6,792				
	2		8,052		6,720		11,92
			7,811				

Tableau 19 : Résistances des différents mortiers et bétons.

IV.5.4.1. Résistance à la flexion :

Les essais de compression et de flexion ont été réalisés à 28 jours, sur des éprouvettes de mortier mesurant 4x4x16 cm³ suivant la norme EN 1015-11.

Les travaux de recherches réalisés par **BEZZINA** sur l'effet de deux hydrofuges différents de type SIKA et Hydro respectivement, sur la résistance à la flexion trois points des éprouvettes de 4*4*16 cm³ à l'âge de 28 jours. Les résultats de résistance en flexion sont montrés sur la figure III.2 pour les différents mortiers :

Il apparait que la résistance à la flexion diminue pour les deux mortiers adjuvantés, de l'ordre de 13 % pour le dosage en adjuvant SIKA et de 45 % pour le dosage en adjuvant hydro 1. L'incorporation de l'adjuvant hydro1 influe de manière néfaste sur la

résistance. Donc, la chute de la résistance à la flexion due à l'inclusion d'hydrofuge de type SIKA est conforme aux normes qui exigent le rapport :

Béton adjuvanté / béton témoin $\geq 85\%$.

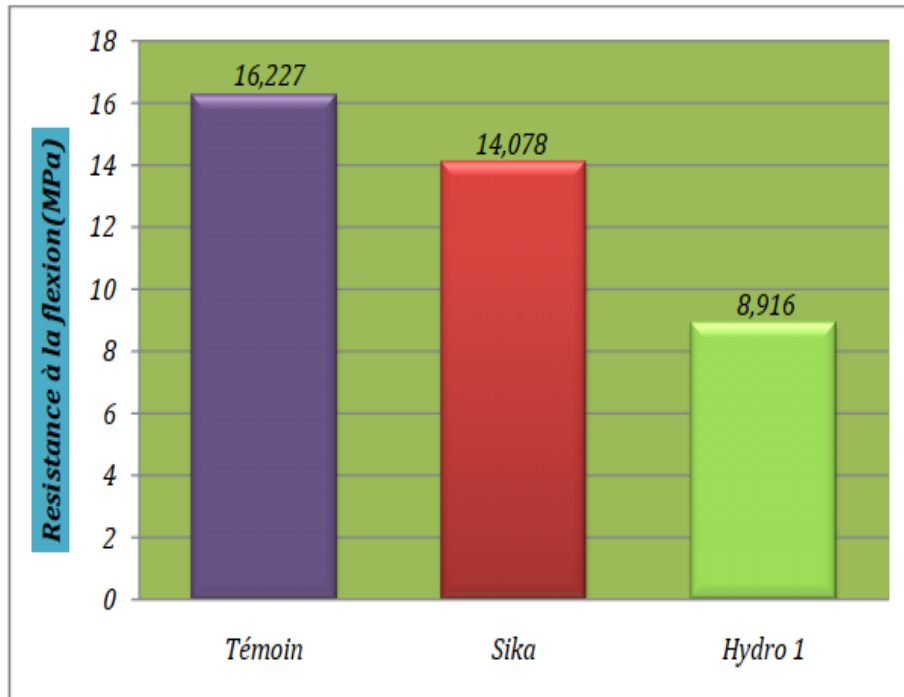


Figure 26. Résistance à la flexion pour différents mortiers

IV.5.4.2. Résistance à la compression :

Pour que l'adjuvant hydrofuge soit conforme aux normes et aux exigences des industriels et des marchés, il doit présenter les caractéristiques suivantes : Résistance à la compression : béton adjuvanté / béton témoin $\geq 85\%$.

Les études expérimentales exécutées par BEZZINA sur l'influence des hydrofuges de marché Algérien sur la résistance à la compression de mortier et de béton ordinaire (figure 18 et 19). Trois types de composites ont été étudiés : un composite Témoin sans adjuvant et deux autres composites (mortier / béton) adjuvantes par hydrofuge de type SIKA et Hydro 1

respectivement. Les résistances à la compression ont été déterminées par des éprouvettes: $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ et $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ respectivement.

La résistance à la compression diminue de l'ordre de 14 % dans ce cas pour le dosage en adjuvant SIKA, de 37 % pour le dosage en adjuvant hydro 1 par rapport à la résistance du mortier témoin.

✓ Nous constatons, par ailleurs, que la résistance en compression varie globalement de manière semblable à la résistance en flexion.

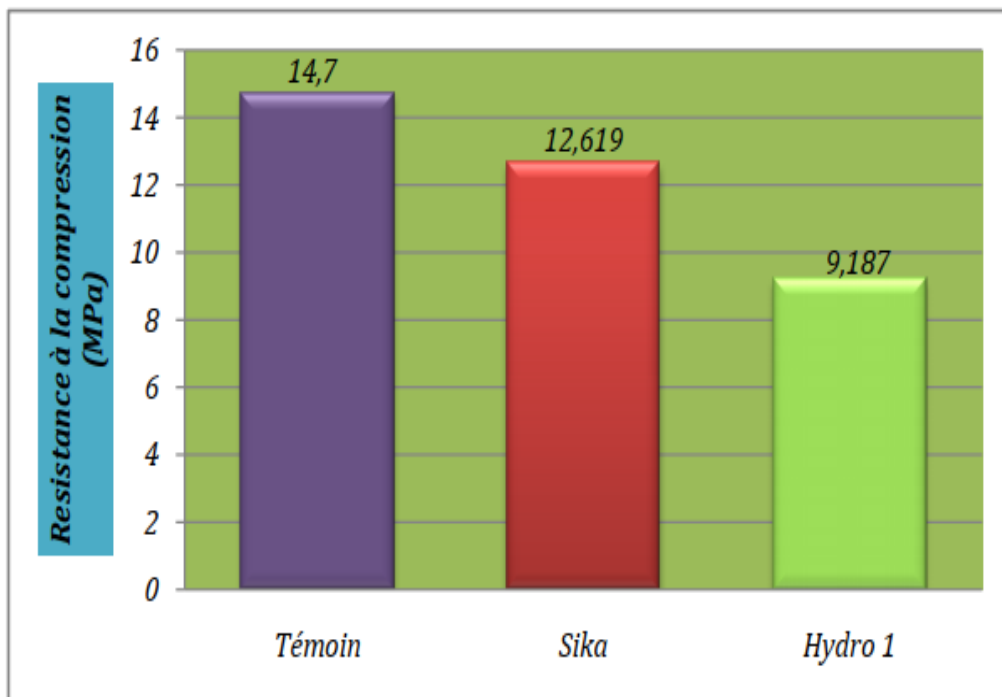


Figure.27. Résistance à la compression pour différents mortiers, éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

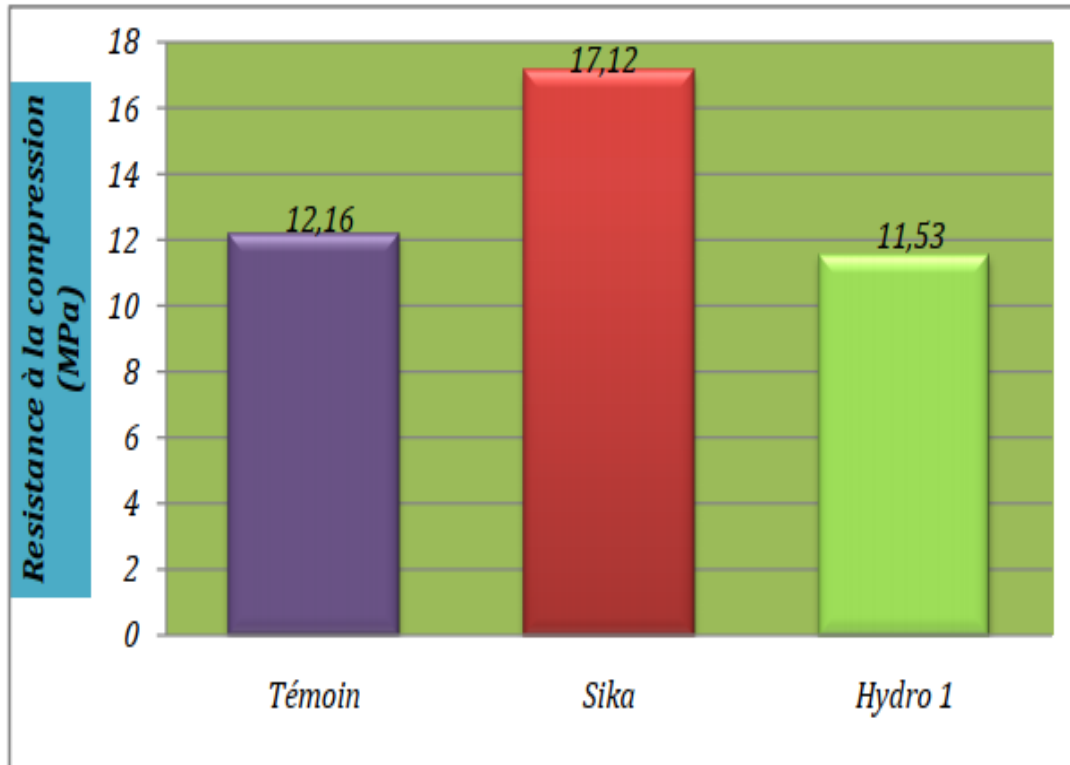


Figure.28. Résistance à la compression pour différents bétons, éprouvettes 15x15x15 cm³

La résistance à la compression augmente pour le béton adjuvanté par l'hydrofuge SIKA de l'ordre de 41 %.

✓ On remarque une faible diminution de résistance pour le béton adjuvanté par hydro 1 de l'ordre de 5 %

Nous constatons, par ailleurs, que la résistance en compression varie globalement de manière semblable à la résistance en flexion.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire permet d'approfondir nos connaissances sur les adjuvants du béton. Les recherches dans ce domaine se situent à la croisée des intérêts scientifique et économique, par le fait que le produit est fabriqué à partir des matières premières disponible.

La recherche bibliographique réalisé dans ce mémoire a permet d'approfondir nos connaissances à l'optimisation le dosage d'adjuvant hydrofuge de type SIKA avec le béton ordinaire. La mise en œuvre de ce travail a permis de déterminer les compositions qui assurent deux objectifs essentiels à savoir : minimisation de la capillarité et de la porosité et la maximisation de la résistance mécanique. L'étude bibliographique nous a permis d'observer, l'influence des constituants du ciment ainsi que ces caractéristiques physiques sur les résistances mécaniques. D'après les recherches antérieurs qui a été réalisés par **Belgacem BEZZINA** une formule optimale a été retenue et testée avec succès à l'échelle pratique où :

- L'absorption capillaire sous pression de 5 bars: béton adjuvanté < 87,02% de béton témoin.
- La résistance à la compression : béton adjuvanté / béton témoin = 104.6 > 85%.

Ces résultats sont conformes aux normes et aux exigences.

Les études que nous avons menées au cours de ce mémoire nous ont permis d'améliorer notre connaissance sur les processus d'interaction physico-chimiques qui gouvernent les adjuvants hydrofuges de type SIKA et le matériau cimentaire.

Références

- [1] **G. Dreux, J. Festa**, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Ed Eyrolles, pp.317 (1998),Paris.
- [2] **M.N. Adam**, Propriétés des bétons, Ed Eyrolles, pp. 754 (1998), Paris.
- [3] **Regourd M.**, Le béton hydraulique, chapitre d'eau, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, pp. 59-68, 1982.
- [4] **Diamond S.**, The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, pp. 919-933, 2004.
- [5] **Mouret M., Bascoul A., Escadeillas, G.**, Microstructural features of concrete in relation to initial temperature – SEM and ESEM characterization, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 369-375, 1999.
- [6] **Guelmine, L.**, Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures, thèse de doctorat en sciences, usthb d'Alger, 2017, pp.159.
- [7]**Ghomarifouad(2011/2012)**<https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/Adjuvants>.
- [8] **CEN (Comité Européen de Normalisation)**. NBN EN 1504-2 Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton, 2005.
- [9] **L. Courard**. Maintenance, entretien et réparation des constructions en béton. Université de Liège, 2008-2009. notes de cours provisoires.
- [10] **CSTC**. Hydrofugation de surface. Technical Report 224, Centre Scientifique et technique de la Construction, Bruxelles, 2002.
- [11] **J.M. Vallet**. La protection des pierres : Guide sur les hydrofuges de surface. Technical Report 3, Cercle des partenaires du patrimoine, Champs-Sur-Marne, 2000.
- [12] **C. Abseque**. Étude de l'efficacité des produits imperméabilisants pour prévenir la dégradation de la face aval des barrages en béton. PhD thesis, Université de Laval, Québec, 2001.
- [13] **M. Medeiros and P. Helene**. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. Materials and Structures, (41) :59– 71, 2008

- [14] **Y. Yuan and T. Randall Lee.** Contact angle and wetting properties. *Surface Science Techniques*, 51 :3–34, 2013. Springer Series in Surface Sciences
- [15] **L. Courard.** Caractères généraux des matériaux. Université de Liège. notes de cours.
- [16] **R. Gagné.** Durabilité et réparations du béton, chapter 3.7 - Hydrofuges et membranes d'imperméabilisation, pages 306–324. Université de Sherbrooke, 2009. notes de cours.
- [17] **K. Hazrati.** Efficacité des scellants face au problème d'ecaillage du beton en présence de sels fondants. Master's thesis, Université de Laval, Quebec, 1993.
- [18] **C. Moreau.** Vieillissement naturel en milieu urbain de pierres calcaires hydrofugées : évaluation de la durabilité des traitements et de leur impact sur le nettoyage. PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2008.
- [19] **R.S.C. Woo, H. Zhu, M.M.K. Chow, C.K.Y. Leung, and J-K. Kim.** Barrier performance of silane-clay nanocomposite coating on concrete structure. *Composites science and technology*, 68, 2008.
- [20] **D.A. Kagi and K.B. Ren.** Reduction of water absorption in silicate treated concrete by post-treatment with cationic surfactants. *Building and environment*, 2 :237–243, 1995.
- [21] **Protect Crete Australia PTY.** Why Densi-Proof works and sodium silicates (and other look a likes) don't. http://www.con-treat.com.au/pdf/sodium_silicates.pdf.
- [22] **L. Basheer and D.J. Cleland.** Durability and water absorption properties of surface treated concretes. *Materials and Structures*, 44 :957–967, 2011.
- [23] **M. Medeiros and P. Helene.** Surface treatment of reinforced concrete in marine environment : influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. (23) :1476–1484, 2009.
- [24] **J. De Vries and R.B. Polder.** Hydrophobic treatment of concrete. *Construction and Building Materials*, 11 :259–265, 1997.

- [25] **S. Eyssautier-Chuine, G. Fronteau, M. Gommeaux, C. Thomachot-Schneider, and G. Michaud.** estimation de l'efficacité et de la durabilité par vieillissement naturel des produits protecteurs de la pierre : le programme HYBRIPROTECH. *Matériaux et Techniques*, (99) :547–553, 2011.
- [26] **M. Medeiros and P. Helene.** Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. *Materials and Structures*, (41) :59– 71, 2008.
- [27] **P.A.M. Basheer, L. Basheer, D.J. Cleland, and A.E. Long.** Surface treatment for concrete : assessment methods and reported performance. *Construction and building materials*, 11 :413–429, 1997.
- [28] **Belgacem BEZZINA. B (2012),** ÉTUDE DE NOUVELLE FORMULATION D'ADJUVANT HYDROFUGE POUR APPLICATIONS DIVERSES, Université 08 Mai 1945 Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie des Procédés, page. 124.
- [30] **Maanser A.E :** Etude de l'effet des adjuvants sur les propriétés des mortiers, Mémoire de magister, Guelma, 2012.
- [31] **NF EN 934-2** (Sept. 2002) : Adjuvants pour béton, mortier et coulis- Adjuvants pour béton — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement P 18-342).
- [32] **NF EN 12390-8** (oct. 2001): Essai pour béton durci – partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression.