

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie des matériaux

Option : sciences des matériaux pour la construction durable

THEME

**Contribution à l'amélioration des caractéristiques
physico-mécaniques du béton de structure des
ouvrages annexes d'un barrage en remblai
(Barrage de Béni Slimane)**

Réalisé Par :

RAHLA Mohamed Kamel

CHAIBI Nassim

Proposé et suivi par :

Mr.GHERNOUTI Youcef

BOUMERDES 2016

Résumé

C'est une contribution à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et de la durabilité du béton de structure des ouvrages annexes du barrage en remblai de Béni Slimane.

Une étude comparative entre quatre formulations a été faite à travers divers essais mécaniques (résistance à la compression et à la flexion), essais physiques (porosité et absorption) et des tests de durabilité comme la perméabilité à l'eau et conservation dans deux milieux différents : un milieu acide à 10% de HCl (acide chlorhydrique) et un milieu salin à 5% de NaCl (chlorure de sodium).

Une des formulations est appliquée dans le cadre de la réalisation des ouvrages annexes du barrage de Béni Slimane, les trois autres sont des dérivés de cette formulation, en modifiant la partie liante en incorporant 10% de fumée de silice, en utilisant du ciment blanc à la place du ciment CHF-CEM III/A utilisé dans le béton témoin, ou en utilisant du ciment blanc avec 10% de fumée de silice.

On notera dans cette étude expérimentale que l'utilisation du ciment blanc avec 10% de fumée de silice a apportée des améliorations significatives au béton par rapport aux autres formulations dans presque tous les essais réalisés.

Mots clés : Perméabilité, durabilité, ciment blanc, fumée de silice, milieux agressifs, barrage en remblai.

Abstract

It is a contribution to the improvement of physico-mechanical properties and durability of concrete structure related structures of the dam embankment Beni Slimane.

A comparative study between four formulations was made through various mechanical tests (resistance to compression and bending), physical testing (porosity and absorption) and durability tests such as water permeability and retention in two different environments: an acid environment at 10% HCl (hydrochloric acid) and a saline environment with 5% NaCl (sodium chloride).

One of the formulations was applied in the context of achieving secondary constructions of the dam of Beni Slimane, the other three are derivatives of this formulation by altering the binding part by incorporating 10% silica fume, using white cement instead of CHF-cement CEM III / A used in the main concrete, or using white cement with 10% silica fume.

We will notice in this experimental study that the use of white cement with 10% silica fume has made significant improvements in concrete compared to other formulations in almost all tests performed.

Keywords: permeability, durability, white cement, silica fume, aggressive environments, embankment dam.

Remerciements

Tout d'abord on remercie le bon dieu pour toutes les choses qui nous a offert et permet de faire.

On tient à remercier notre promoteur « Mr.GHERNOUTI » pour la confiance qui nous a accordé et les conseils que nous a fournis tout au long de notre parcours.

On remerciera aussi les établissements suivants :

- Hydrotechnique.
- CETIM
- Unité de recherche de la FSI

Nos remerciements s'adresseront à : Abdellah Dahmani, Youcef Ali, ZARA Informatique, Hamza Morsli ingénieur à CETIM, les laborantines du département de chimie de la FSI, Rafik le chef de laboratoire du chantier de Béni Slimane, Aoukas Mohamed, les techniciens du laboratoire du chantier de Béni Slimane, le directeur d'Hydrotechnique Mr. Mustapha, Mr.MOUSSA Ahmed, la famille LATEB, la famille HAMMOUDI, la famille MEGROUS... et à toute personne qui participer de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Nos remerciements les plus distingués iront aussi aux professeurs : SAIDI, CHAID et SEMMAR pour leurs précieux conseils.

Au final, nous remercions nos chers parents qui étaient toujours là pour nous malgré les circonstances, qui nous ont poussés à aller de l'avant.

Merci à vous tous.

Dédicace

Je dédie ce modeste projet de fin d'études à mes précieux parents, qui étaient là pour moi et qui m'ont toujours soutenus jusqu'à la fin malgré les nombreuses erreurs commises de ma part, je vous aime ;

A mon frère et sœur que j'aime tant ;

A tous mes amis : BERBOUCHA Kamel, ALI Youcef, DAHMANI Abdellah, KHELASSI Azzedine, ZAARA Abd El Raouf, Lazazi Rafik, SLIMANI Hamza, ZAABOT Sofiane, SAHRAOUI Didine, SAOULA rabeh, AREGRADJ Fateh, KHADRAOUI Djamel, AIT TAHER Abdelhak, ZATOUT Nabil, BELHANAFI Sid Ahmed, TOUNSI Yacine...

Et à toute autre personne que j'ai oublié de mentionner, cet oubli sera temporaire.

RAHLA Mohamed Kamel.

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I	
I.1-Les Bétons	4
I.2-Constituants du béton	4
I.2.1-Le Ciment	4
I.2.1.1-Définition.....	4
I.2.1.2-Fabrication du ciment (Exemple le ciment Portland)	4
I.2.1.3-Composition chimique.....	5
I.2.1.4-Classification des ciments.....	7
I.2.1.5-Ciments à usage spécifique.....	8
I.2.1.6-Les ajouts cimentaires.....	10
I.2.1.6-Les propriétés principales des ciments	12
I.2.2-Les granulats	15
I.2.2.2-Caractéristiques des granulats.....	15
I.2.3-Eau de gâchage	16
I.2.4-Les adjuvants	17
I.2.4.1-Type d'adjuvant	17
I.3-Les propriétés des bétons	19
I.3.1-Béton frais.....	20
I.3.1.1-La maniabilité ou l'ouvrabilité	20
I.3.2-Bétons durcis	21
I.4-Notions de durabilité.....	23
I.4.1-La perméabilité	23
I.4.2-Paramètres de la durabilité chimique.....	24
I.4.2.1-Paramètres liés au matériau	24
I.4.2.2-Paramètres liés à l'environnement	25
I.4.2.3-Paramètres liés à la structure	26
I.4.3-Revue des principaux milieux agressifs.....	26
I.4.3.1-Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides	26
I.4.3.2-Attaque par les ions chlorures.....	27
I.4.3.3-Milieu sulfaté.....	28
I.4.3.4-Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements agressifs	30

I.5 : Généralités sur les barrages.....	31
I.5.1-Les barrages, c'est quoi ?.....	31
I.5.2-Le rôle des barrages	32
I.5.3-Les particularités de la construction des barrages.....	32
I.5.4-Types de barrages	33

Chapitre II

I.1-Problématique et objectif du travail	35
II.2-Caractérisation des matériaux	37
II.2.1-Les Ciments	37
II.2.2- Les Granulats (NF P18-650).....	39
II.2.3-L'adjuvant.....	45
II.2.4-fumée de silice.....	47
II.2.5-Eau de gâchage	47
II.3-Formulation de la composition du béton et essais réalisés	48
II.3.1-Formulation de la composition du béton	48
II.3.2-Confection des éprouvettes.....	49
II.3.2.4-Démoulage et cure du béton durci	52
II.3.3-Essais réalisés	54
II.3.3.1-Choix des essais	54
II.3.3.2-Béton à l'état frais	46
II.3.3.2-Béton à l'état durci	59
II.3.4-Lieu de réalisation des différents essais.....	70

Chapitre III

III.1-Béton à l'état frais :	72
III.2-Béton à l'état durci	75
III.2.1-Essai mécaniques.....	75
III.2.1.1-Essai de compression.....	75
III.2.1.2-Essai de flexion.....	76
III.2.2-Essai Physique (Porosité accessible à l'eau/Absorption)	79
III.2.3-Analyse minéralogique (diffractométrie à Rayons X : DRX).....	81

III.2.3.1-DRX du Béton G	81
III.2.3.2-DRX du béton GF	82
III.2.3.3-DRX du béton B	83
III.2.3.4-DRX du béton BF	84
III.2.4-Essai de Durabilité du béton.....	86
III.2.4.1-Profondeur de pénétration d'eau sous pression.....	86
III.2.4.2-Attaque des acides	89
III.2.4.3-Milieu Salin	104
Conclusion.....	108

Chapitre I

Tableau (I-1) : Classification des ciments en fonction de leurs compositions	7
Tableau (I-2) : Classification des ciments en fonction de leurs résistances	8
Tableau (I-3) : Composition chimique du clinker portland blanc et gris	9
Tableau (I-4) :Composition chimique de CV Type F [6].....	10
Tableau (I-5) :Composition chimique du LHF [8].....	11
Tableau (I-6)Composition chimique de la fumée de silice [6].....	11
Tableau (I-7) propriétés chimiques des différents ciments	12
Tableau (I-8) :Effets et domaines d'utilisations des différents adjuvants	19

Chapitre II

Tableau (II-1) : Analyse chimique du CHF-CEM III/A.....	37
Tableau (II-2) : Composition minéralogique du clinker du CHF-CEMIII/A	37
Tableau (II-3) :Propriétés physiques et mécaniques du CHF-CEMIII/A	37
Tableau (II-4) : Résistance à la compression du CHF-CEMIII/A	38
Tableau (II-5) : Analyse chimiques du ciment blanc	38
Tableau (II-6) : Composition minéralogique du clinker du ciment blanc	38
Tableau (II-7) : Propriétés physiques et mécaniques du ciment blanc	39
Tableau (II-8) : Résistance à la compression du ciment blanc	39
Tableau (II-9): Analyse granulométrique du sable 0/4.....	40
Tableau (II-10): Essai d'équivalent du Sable 0/4	40
Tableau (II-11) : Analyse granulométrique du sable 0/1	41
Tableau (II-12): Essai d'équivalent de sable 0/1	41
Tableau (II-13): Analyse granulométrique du sable corrigé	42
Tableau (II-14) : Caractéristiques des sables.....	42
Tableau (II-15): Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	43
Tableau (II-16): Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	43
Tableau (II-17): Analyse granulométrique du gravier 15/25.....	44
Tableau (II-18) : caractéristiques des granulats.....	44
Tableau (II-19): Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant	46
Tableau (II-20): Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice (Voir Annexe)	47
Tableau (II-21): les masses en Kg des différents constituants des 4 types de béton pour 1m ³	49
Tableau(II-22) : les classes de consistance suivant l'affaissement au cône d'Abrams.....	57

Chapitre III

Tableau (III-1) :

Tableau (III-2) : résultat des essais de compression.....	75
Tableau (II-3) : résultat des essais de flexion.....	77
Tableau (III-4) : les masses mesurées (en gr) pour le calcul de la porosité accessible et de ...	79
Tableau (III-5) : pourcentages de porosité et d'absorption d'eau pour les 4 formulations	79
Tableau (III-6) : Minéraux détectés par les DRX des quatre bétons	85
Tableau (III-7) : la profondeur d'eau sous pression pour les 4 formulations	86
Le tableau (III-8) : les résultats des pertes de masse.....	89
Tableau (III-9) : les pH des milieux acides	90
Tableau (III-10) : les résistances mécaniques à la compression après 28j d'immersion dans le HCl	93
Tableau (III-11) : les masses mesurées (en gr) pour le calcul de la porosité accessible.....	101
Tableau (III-12) : La porosité et absorption pour les quatre formulations	101
Tableau (III-13) : Profondeur de pénétration des ions Chlores	104

Introduction

L'optimisation de la durée de vie d'un béton est une préoccupation importante pour chaque grand ouvrage moderne, indépendamment du milieu dans lequel il sera réalisé. Cette préoccupation devient majeure quand il s'agit d'un ouvrage en contact permanent avec un milieu agressif comme l'eau polluée en sulfates, sels, acides...

Notre projet s'intéresse au comportement de la matrice du béton armé. Un matériau de structure du barrage en remblai de Béni Slimane, en cours de construction, destiné à répondre aux besoins en eau pour l'irrigation des terres cultivables de la région.

Les différentes analyses des recherches antérieures faites sur la durabilité du béton et des matériaux cimentaires, ont révélé que la fumée de silice pouvait être un ajout incontournable pour l'amélioration de la microstructure du béton et de la bonne répartition poreuse de celui-ci. Elle est utilisée dans la conception des bétons de hautes performances (BHP) ou des bétons destinés aux milieux agressifs. Sa non-disponibilité (90% d'importations) sur les marchés Algériens et son prix inaccessible font d'elle un ajout peu employé dans les grands ouvrages en cours de construction dans le territoire national.

Nous avons testé cet ajout dans le béton du barrage de Béni Slimane avec un pourcentage de substitution du ciment de 10% en fumée de silice. Ce taux est généralement jugé optimal par certains experts du domaine.

Parallèlement, nous avons changé le ciment du béton témoin par le ciment blanc connu surtout pour son utilisation dans les aspects esthétiques des ouvrages et non pour ses qualités techniques (physico-mécaniques). Il est vrai que le surcoût induit par l'utilisation du ciment blanc par rapport aux ciments gris usuels ne milite pas en faveur de sa généralisation, mais notre projet a voulu montrer les avantages de ce matériau au plan uniquement technique.

Pour caractériser le milieu agressif à un rythme accéléré, nous nous sommes servis de l'acide chlorhydrique à 10% et du Chlorure de sodium (Sel) à 5% afin de mesurer les conséquences de ces derniers sur le comportement du béton, mais aussi pour avoir une idée générale sur l'aspect physico-chimique des différents liants utilisés.

La première étape consiste à synthétiser les documents existants qui touchent de près ou de loin au béton, sa durabilité, la résistance de celui-ci vis-à-vis les agressions chimiques, ses propriétés physico-chimiques, les différents ajouts, mais aussi des généralités sur les barrages.

La présentation du projet se fera en trois chapitres :

Chapitre I : Synthèse bibliographique : ce chapitre traite des documents sur le béton, sa durabilité et vaguement les barrages pour avoir une idée générale sur l'objectif de travail établi.

Chapitre II : Programme expérimental : on va poser une problématique pour concrétiser notre objectif de travail, ensuite proposer des solutions qui seront vérifiées via différents essais expérimentaux, ces derniers seront un moyen de comparaison entre les solutions proposés et le matériau témoin.

Chapitre III : Résultats et discussions : ce chapitre présentera les résultats de tous les essais effectués au cours de la réalisation de notre projet de recherche.

I.1-Les Bétons

Le béton est un matériau minéral à la base de la quasi-majorité des constructions et des ouvrages.

C'est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions, collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment.

Les bétons utilisés dans les bâtiments, ainsi que dans les travaux publics comprennent plusieurs catégories.

En général, le béton peut se classer en quatre groupes, selon sa masse volumique ρ :

- Béton lourd : $\rho > 2500 \text{ kg/m}^3$
- Béton courant : ρ entre 1800 et 2500 kg/m^3
- Béton léger : ρ de 500 à 1800 kg/m^3
- Béton très léger: $\rho < 500 \text{ kg/m}^3$

La qualité du béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surfaces et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.[2]

I.2-Constituants du béton

Le béton est un mélange de plusieurs constituants naturels: le ciment, les granulats, l'eau de gâchage et les adjuvants.

I.2.1-Le Ciment

I.2.1.1-Définition

Le ciment est un liant hydraulique en forme de poudre constitué de silicates et d'aluminates de chaux qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide qui conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

I.2.1.2-Fabrication du ciment (Exemple le ciment Portland)

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: les roches calcaires et argileuses sont extraites des carrières puis concassées, homogénéisées et portées à haute température (1450°C) dans un four rotatif en proportions bien définies. Les opérations de broyage des 60 pierres calcaires et de malaxage avec l'argile peuvent être réalisées selon un procédé sec ou humide. Dans le procédé humide, on provoque le départ de l'eau de mouillage jusqu'à 100°C

puis c'est le départ d'eau liée. À partir de 800°C, il se forme une réaction de décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO). La température à l'entrée du four est d'environ 1400°C pour atteindre près de 1600°C à la sortie. Les transformations chimiques se produisent tout au long du cheminement du matériau de l'entrée vers la sortie du four. Ainsi, la pierre calcaire fournit principalement de la chaux au mélange alors que l'argile apporte de la silice et de l'alumine. Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Le produit obtenu à la sortie du four porte le nom de clinker et se présente sous forme de boulettes ayant un diamètre variant entre 3 et 25 mm. Le clinker est ensuite refroidi puis broyé avec une faible quantité de gypse (à hauteur de 3 à 5%) qui agit comme régulateur de prise, cette dernière opération doit être contrôlée avec soin pour prévenir les problèmes de prise éclair ou de fausse prise. En plus du gypse, on peut éventuellement ajouter d'autres constituants tels que les fillers calcaires et les ajouts cimentaires. [2]

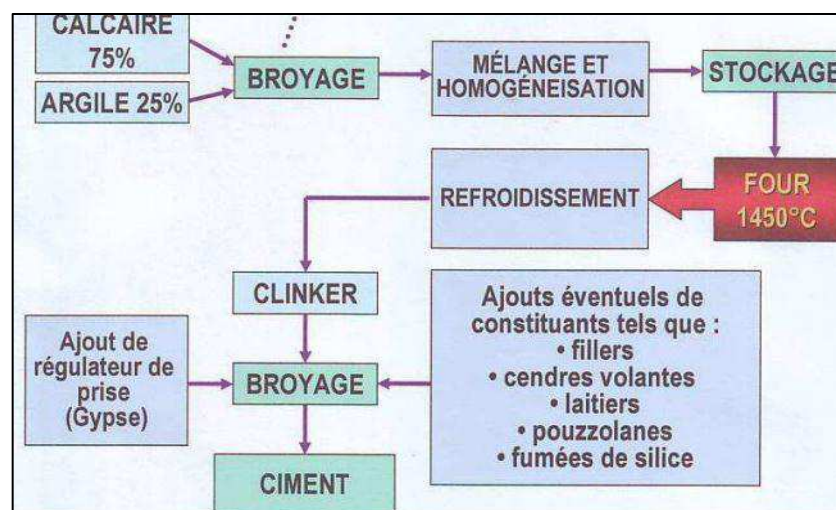


Figure (I-1) : Process de fabrication du ciment [8]

I.2.1.3-Composition chimique

Le clinker est formé de quatre composants minéralogiques principaux. Ces composants ne sont pas des substances chimiques pures mais plutôt des solutions solides :

- Le **silicate tricalcique (alite)** : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$; avec une proportion dans le ciment de 40 à 75 % et dont la notation cimentaire est : C_3S . C'est un constituant majeur qui se présente sous forme de cristaux polygonaux de 20 à 50 μm de diamètre. Ce minéral n'est jamais pur et renferme toujours un faible pourcentage (jusqu'à 4%) d'oxydes mineurs [1]. Les éléments les plus

fréquents sont : Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , S^{6+} et K^{+} [3]. L'alite est la phase la plus importante du ciment étant responsable des résistances à court terme et son hydratation résulte en un fort dégagement de chaleur.

- **Le silicate bicalcique (bélite) :** $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$; avec une proportion dans le ciment de 6 à 30 % et dont la notation cimentaire est : C_2S . Il apparaît généralement sous forme de cristaux arrondis. Tout comme le silicate tricalcique, le silicate bicalcique n'est jamais à l'état pur dans le clinker et peut contenir jusqu'à 6% d'oxydes mineurs [1]. Ainsi les ions les plus fréquents qui entrent dans la structure du C_2S sont : Al^{3+} , Fe^{3+} , P^{5+} , K^{+} et SO_4^{2-} [3].

- **L'aluminate tricalcique (célite) :** $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, avec une proportion de 0.1 à 12 % et dont la notation cimentaire est : C_3A . La forme de C_3A détermine sa réactivité. Deux formes se présentent dans les clinkers industriels, les formes cubique et orthorhombique. Ceci dépend de la quantité de Na_2O incorporée dans le C_3A [3]. Ainsi la forme de l'aluminate tricalcique pur est cubique tandis que pour celui contenant une teneur de 1.9% à 3.7% en Na, elle est orthorhombique.[4]

- **L'aluminoferrite tétracalcique (brownmillerite) :** $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$; avec une proportion de 2 à 16 % et dont la notation cimentaire est : C_4AF . Le C_4AF est une solution solide composée par des cristaux massifs et allongés incorporés dans l'interstice entre le C_2S et le C_3S et pouvant contenir jusqu'à 13% d'impuretés tel que Mg^{2+} , Si^{2+} et des alcalis[7]. En comparaison avec le C_3A , le C_4AF s'hydrate moins rapidement et dégage moins de chaleur.

I.2.1.4-Classification des ciments

❖ Classification selon la composition

Tableau (I-1) : Classification des ciments en fonction de leurs compositions [22]

principaux types	Notation des 27 produits (types de ciments courants)		Composition (pourcentage en masse a))											
			Constituants principaux										Constituants secondaires	
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaire					
			K	S	D b)	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Ciment portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Ciment portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment portland composé c)	CEM II/A-M	80-94	← 12-20 →								—	0-5	
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →								—	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →				—	—	—	0-5		
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →				—	—	—	0-5		
CEM V	Ciment composé c)	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 12-20 →				—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	← 21-35 →				—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées au tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.
b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.
c) Dans les cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B des ciments composés CEM V/A et CEM V/B les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment.

❖ Classification selon la résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 7 et à 28 jours.

Tableau (I-2) : Classification des ciments en fonction de leurs résistances [22]

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Temps de prise (min)	Stabilité (expansion)
	au jeune âge		à 28 jours			
	2 jours	7 jours	mini	maxi		
32.5	.	≥16.0	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5R	≥10.0	.				
42.5	≥10.0	.	≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5R	≥20	.	≥42.5	≤62.5	≥60	
52.5	≥20	.	≥52.5 (50)	.	≥60	
52.5R	≥30	.	≥52.5	.	≥60	

I.2.1.5-Ciments à usage spécifique

❖ Ciment BLANC

Le ciment blanc est un ciment Portland, différent des ciments précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication, il est fabriqué à partir des matières premières brutes particulièrement choisies qui sont généralement la craie pure et l'argile blanche (kaolin) contenant de très petites quantités d'oxydes de fer et d'oxydes de manganèse. Le ciment blanc est fréquemment choisi par les architectes pour son utilisation dans la fabrication du béton blanc, blanc cassé ou coloré, qui sera exposé, à l'intérieur ou à l'extérieur des édifices, au regard du public.

Il est bien connu que la fabrication du ciment blanc exige un contrôle rigoureux et précis durant l'ensemble des étapes du processus technologique afin d'empêcher la contamination du produit avec du fer, le manganèse, et le titane. Le ciment blanc se caractérise par une teneur extrêmement basse de C₄AF (moins de 1,5%) et une teneur élevée de C₃S et de C₂S.

Tableau (I-3) : Composition chimique du clinker portland blanc et gris [2]

Clinker ciment portland	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	F	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Gris	20.8	5.5	3.61	65.6	2.13	-	0.91	0.19	0.87
blanc (Normal)	23.1	6.2	0.28	67.8	0.83	0.24	0.14	0.05	0.89

❖ Ciment résistant aux sulfates (CRS)

C'est ciment gris de type CEM I ayant un faible pourcentage de C₃A, la norme NF P 15-301 limite la teneur de SO₃ pour les CPA CEM I 42.5 ES (CRS) à 3.5% si le taux de C₃A est inférieur à 3%, et à 2.5% si le taux de C₃A entre 3 et 5%.

• Ciments susceptibles d'être conforme aux exigences du CRS

- La plupart de CHF-CEM III/A et B, CLK-CEM III/C, et CLC-CEM V/A et B.
- Certains CPA-CEM I, CPJ-CEM I et B qui satisfaisant certains exigence notamment leur teneur en aluminat tricalcique.

❖ Ciment pour travaux à la mer PM (NF P 15-301)

Les bétons exposés à l'eau de mer doivent avoir un rapport E/C suffisamment faible, et on utilise les ciments courants suivants :

- La plupart de CHF-CEM II/A et B, CLK-CEM III/C ET CLC-CEM V/A et B.
- Certains CPA-CEM I, CPA-CEM-II/A et B ont des teneurs en aluminat tricalcique faibles.

I.2.1.6-Les ajouts cimentaires

L'usage des ajouts cimentaires permet de diversifier la formulation des bétons afin d'obtenir différentes propriétés tout en réduisant le coût de revient.

Autrefois, la cendre volante, le laitier, les fumées de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que l'argile et le schiste calciné, étaient utilisés dans le béton de façon individuelle. Aujourd'hui, les ajouts cimentaires sont régulièrement combinés afin de produire des liants ternaires et même quaternaires afin d'optimiser les propriétés du béton.

La norme CSA A3000 (2008) classe les ajouts cimentaires suivant les types suivants :

❖ Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres très fines résultant de la combustion du charbon en centrales thermiques. Ainsi, durant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés.

La cendre volante est constituée principalement de verre de silicate contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone [5]

L'ajout de cendres volantes dans le ciment permet de réduire la perméabilité et les coefficients de diffusion de pâtes de ciment [7].

Tableau (I-4) Composition chimique de CV Type F [6]

%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	S O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅	P A.F
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.A.F
42.2	21.60	27.60	1.87	0.92	1.10	0.66	2.55	n.m	n.m	1.85
42.2	21.60	27.60	1.87	0.92	1.10	0.66	2.55	n.m	n.m	1.85

❖ Laitier de haut fourneau

C'est un liant hydraulique fabriqué à partir du laitier de fonte et composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux.

Le rôle du LHF est la réduction de la porosité totale et un raffinement de la distribution poreuse.

Tableau (I-5) Composition chimique du LHF [8]

% CaO	% SiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% MgO	% MnO	% K ₂ O	% TiO ₂	% Na ₂ O
37.31	36.77	0.85	7.77	13.91	1.02	0.43	0.36	0.31

❖ La fumée de silice

Les fumées de silice (FS) sont un sous-produit industriel provenant de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Les fumées de silice sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion. Elle s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000°C. Une fois refroidie, elles se condensent pour être captée dans des poches de tissu. Ensuite, elles seront traitées pour enlever les impuretés et 65 pour contrôler la taille des particules.

Tableau (I-6) Composition chimique de la fumée de silice [6]

% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% SO ₃	% MnO	% K ₂ O	% TiO ₂	% P ₂ O ₅	% PAF
94.17	0.21	0.32	0.50	0.47	0.12	0.07	1.17	n.m	0.04	2.77

Les FS, de forme sphérique et de diamètre environ 100 fois plus petit que la dimension moyenne d'un grain de ciment, sont composées principalement de dioxyde de silicium amorphe.

Les fumées de silice peuvent être utilisées dans le béton à haute résistance en substitution d'une partie du ciment ou comme ajout dans des applications où le niveau d'imperméabilité est requis. Ainsi, les fumées de silice sont utilisées avec un dosage correspondant entre 5% et 10% de la masse totale des matériaux cimentaires.

➤ Avantages d'ajout de la fumée de silice au béton

- Réduction du ressuage et de la ségrégation.
- Forte réduction de la porosité.
- Augmentation de la résistance.
- Diminution de la perméabilité.
- Amélioration de la liaison entre pâte et granulat.

❖ **Les pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont généralement issues des cendres volcaniques, elles favorisent aussi l'amélioration de la résistance du béton à l'attaque par les sulfates. Elles ont été parmi les premiers matériaux utilisés pour combattre la réaction alcali-silice dans les bétons.

De nos jours elles sont traitées thermiquement et on y trouve notamment l'argile calcinée et le schiste calciné.

Les ajouts cimentaires permettent la fabrication de bétons de haute performance tout en améliorant les caractéristiques de durabilité. Les ajouts cimentaires peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés. C'est le cas des laitiers, des cendres volantes et des fumées de silice : un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction s'accompagne en général d'un raffinement des pores donc d'une réduction de la perméabilité, ceci peut apporter un gain important vis-à-vis de la durabilité. [2]

I.2.1.6-Les propriétés principales des ciments❖ **Les caractéristiques chimiques**

Tableau (I-7) propriétés chimiques des différents ciments

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA -CEMI CHF-CEM III CLK- CEM III	Toutes classes	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA- CEM I	Toutes classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Sulfates SO_3 (limite supérieure)	CPA-CEM I CPJ-CEM II	32.5 32.5 R 42.5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Toute classes	≤ 4 ≤ 4
Chlorures	Tout types de ciment	52.5 R Toutes les autres classes	≤ 0.05 ≤ 0.10

❖ Les caractéristiques physiques**➤ La surface spécifique (finesse Blaine)**

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique, ou la surface totale développée de tous les grains contenus dans un gramme de ciment, elle s'exprime en cm^2/g suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g . L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « perméabilimètre de Blaine »

➤ La masse volumique apparente

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

➤ La masse volumique absolue

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

➤ La consistance normale (CN)

La consistance normale représente l'eau nécessaire pour transformer une quantité de ciment pour avoir une meilleure pâte, elle a une caractéristique, qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

➤ Les délais de prise

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de prendre toutes formes désirées. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prennent de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et s'est raidi, on dit qu'il se fait priser. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début et la fin de prise.

-Début de prise : correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité.

-Fin de prise : c'est le moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un bloc rigide.

➤ **L'expansion**

Se mesure suivant un essai normalisé et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments.

➤ **Chaleur d'hydratation**

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

- La finesse de mouture.
- La nature des constituants.
- La nature minéralogique du clinker.
- La température extérieure.

➤ **Gonflement**

Le ciment augmente de volume au contact de l'eau, ces variations dimensionnelle étant d'environ le 1 /10ème de celle constaté dans l'air.

➤ **Couleur**

La couleur des ciments n'est pas normée et ne constitue pas un critère de qualité, du moins pour le ciment gris. Pour les ciments blancs le degré de pureté de la couleur blanche est une propriété caractéristique. La couleur dépend des matières premières utilisées, du type de ciment, de la finesse de mouture et du procédé de fabrication. Les variations de la teinte grise des ciments sont inévitables, mais négligeables pour les ciments de la même usine et classe de résistance. D'autres facteurs influent sur la teinte d'un béton nettement plus fortement comme la composition du béton et sa mise en place, sa consistance, le type de coffrage et le mode de compactage.

➤ **Les caractéristiques mécaniques**

Mesurées sur éprouvette de mortier normal (4x4x16)cm², elles caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment, définie par sa valeur nominale qui est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours, elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

I.2.2-Les granulats**❖ Définition**

Les granulats pour bétons sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm.

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

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

Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et dépendent des propriétés du granulat utilisé.

I.2.2.2-Caractéristiques des granulats**❖ Caractéristiques géométriques (classe granulaire)**

La granularité est la distribution par dimensions des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est la méthode d'essai pour déterminer la granularité, cette opération consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis, les tamis normalisés sont de :

0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 mm.

On trace la courbe granulométrique sur un graphe de référence, sur l'abscisse on porte l'ouverture des tamis normalisés et sur l'ordonnée nous portons le % soit de passant soit de refus, on exclut de l'essai des gros grains $\geq 80\text{mm}$ et les fines $\leq 80\text{ }\mu$

Les informations obtenues vont déterminer :

- Limite des différentes fractions d et D
- Le % de fines particules
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

➤ Le module de finesse

Le module de finesse d'un granulat est égal à la somme d'un refus exprimé en pourcentage des différents tamis présentant les ouvertures suivantes :

Le sable : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm

Le gravier : 10 - 20 - 40 - 80mm

Selon la norme les catégories de sables sont classées

- **Sable A : $M_f : 1,8 - 2,2$**

- **Sable B : M_f : 2,2 - 2,8**
- **Sable C : M_f : 2,8 - 3,8**

Le module est une caractéristique importante surtout pour le sable, le module moyen varie entre 2,2 et 2,8.

➤ **Forme et coefficient d'aplatissement**

La forme des grains a une incidence directe sur la malléabilité du béton, la forme souhaitée est la sphère alors que la forme plate est mauvaise (besoin d'eau plus grand).

Le coefficient d'aplatissement A qui caractérise la forme des granulats la grande dimension (G) et leur épaisseur (E), il est donné par le rapport de G/E celui-ci doit être supérieur à 1,58.

❖ **Caractéristiques physico-chimiques**

➤ **Masse volumique absolue au la masse spécifique**

La masse spécifique de granulats est la masse d'un granulat par l'unité de volume pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolue).

➤ **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente de granulats est la masse d'un granulat par l'unité de volume y compris les vides entre les grains (volume apparent).

➤ **Le coefficient d'absorption :**

Il est le rapport d'augmentation de la masse de granulat provoquée en 24h par imbibition partiel de granulat sec.

➤ **La propreté**

Le granulat doit être propre, la loi interdit tout déchet nuisible à la résistance de béton, et autorise un taux inférieur à 1%, le granulat ne doit pas contenir des huiles et des matières organiques.

La propreté du sable est mesurée par la détermination de l'équivalent de sable.

I.2.3-Eau de gâchage

Indispensable au durcissement du ciment et à la mise en œuvre du béton, mais attention, un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité de béton.

Tout comme les autres composants du mélange, l'eau doit être propre. Le dosage doit faire preuve d'une attention particulière: trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissures et une perte de résistance au moment du séchage.

Enfin toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton.

Il remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

La teneur en eau totale se compose de l'eau de gâchage, de l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que de l'eau adsorbée à la surface des granulats et l'eau absorbée par les granulats. On entend par eau efficace la somme de l'eau de gâchage, l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que l'eau adsorbée à la surface des granulats.

I.2.4-Les adjuvants

Les adjuvants sont ajoutés au béton en général sous forme liquide. Ils influent par leurs caractéristiques chimiques et/ou physiques sur les propriétés du béton. Selon le type d'adjuvant utilisé, il est possible de modifier de manière ciblée tant les propriétés du béton frais, par ex : le temps de prise et l'ouvrabilité, que les caractéristiques du béton durci, telles que la résistance à la compression et la durabilité.

L'emploi d'adjuvants est motivé par des considérations technologiques et économiques. L'addition de petites quantités de fluidifiants permet de réduire une partie de l'eau de gâchage. Il est ainsi possible de fabriquer un béton de bonne ouvrabilité, très dense, à faible porosité capillaire et à durabilité améliorée, en réduisant de cette manière le rapport E/C. Une multitude de substances organiques et inorganiques sont utilisées comme agents actifs des adjuvants. Pour produire un maximum d'efficacité, ils doivent être ajustés au ciment.

L'efficacité des adjuvants pour béton est aussi influencée par la teneur en eau, le sable, l'intensité et la durée de malaxage ainsi que la température.

On utilise les adjuvants surtout pour :

1. Diminuer le coût des constructions en béton.
2. Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
3. Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.
4. Obéir à certaines urgences durant le bétonnage.

I.2.4.1-Type d'adjuvant

➤ Les adjuvants modifiant la maniabilité du béton

Les plastifiants : à teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton

Les plastifiants réducteurs d'eau : à même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques. Ils facilitent la mise en place du béton dans les pièces fortement armées.

Les superplastifiants : ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange.

➤ Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Les accélérateurs de prise et de durcissement : ils diminuent les temps de prise ou de durcissement du ciment. Ils facilitent le bétonnage par temps froid.

Les retardateurs de prise : ils augmentent le temps de prise du ciment. Ils sont utiles par temps chaud.

➤ Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

Les entraîneurs d'air : ils entraînent la formation de micro bulle d'air uniformément réparties et améliorent la tenue au gel des bétons courants.

Les hydrofuges de masse : ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers et augmentent leur durabilité.

Le tableau ci-dessous résume les effets et les domaines d'utilisations des principaux adjuvants :

Tableau (I-8) : Effets et domaines d'utilisations des différents adjuvants

Désignation	Actions	Effets	Domaines d'utilisations
Plastifiants	Modifient la rhéologie du mélange	-Améliore l'ouvrabilité -Améliore l'homogénéité -Réducteur d'eau	- Béton haute résistance -Béton très ferraillé - Béton prêt à l'emploi -Béton injecté et projeté -Béton pompé
Fluidifiants			
Entraîneurs d'air		-Améliore l'ouvrabilité et l'homogénéité -Améliore la résistance mécanique -Réducteur d'eau et ciment	
		-Augmente la résistance aux gels et l'imperméabilité -Diminue la capillarité et la ségrégation	-Béton pour travaux publics -Béton soumis à la gélivité -Béton transporté
Accélérateurs	Modifient la prise et le durcissement	-Diminue le temps de prise ainsi que la résistance mécanique - Augmente la productivité des moules	-Bétonnage par temps froid -Béton de préfabrication -Béton pour travaux sous eaux
Retardateurs		-Augmente le temps de prise -Augmente la résistance finale	-Bétonnage par temps chaud -Béton transporté à grande distance -Bétonnage répété
Antigels	Modifient la résistance aux actions physiques et chimiques	-Protège le béton durci	-Bétonnage par temps froid -Béton de préfabrication -Béton prêt à l'emploi
Hydrofuges		- Augmente l'étanchéité - Diminue l'absorption capillaire	-Béton pour travaux hydrauliques -Canalisation hydraulique

I.3-Les propriétés des bétons

Le béton possède deux comportements: l'état frais et l'état durci. Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est à grâce à l'eau que le béton peut être manipulé. Réduire son dosage permet:

- d'augmenter la résistance en compression et en flexion.
- réduire la perméabilité.
- Réduire la contraction volumique (retrait de séchage).
- Moins de risques d'attaques d'agents agressifs extérieurs.

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, cela devient possible.

I.3.1-Béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté de formes.

- La consistance d'un béton est la grandeur qui caractérise son ouvrabilité.

- La composition du béton et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés.

- La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité.

Le béton est dit frais lorsqu'il n'a pas entamé son processus de prise et de durcissement. Le béton frais a la capacité de se déformer et de s'écouler, ce qui permet de le transporter ou de le pomper et de remplir les moules ou les coffrages.

I.3.1.1-La maniabilité ou l'ouvrabilité

Les caractéristiques de l'ouvrage et les moyens de mise en œuvre du béton déterminent une composition dont la consistance est ajustée par l'essai au cône d'Abrams.

Cette propriété est indispensable pour garantir un parfait remplissage des moules et des coffrages dont les formes sont parfois complexes et un bon enrobage des armatures.

De nombreux paramètres influent sur la maniabilité: nature et dosage en ciment, forme des granulats, dosage en eau et emploi des adjuvants.

➤ La mesure de l'ouvrabilité :

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

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

➤ L'influence de la composition

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

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

I.3.2-Bétons durcis

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois.

C'est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat.

➤ Résistance mécanique

A la compression : Elle est le mode usuel de chargement du béton de par la bonne résistance de ce matériau à ce type de sollicitation par rapport à sa résistance à la traction. La résistance (contrainte) maximale en compression du béton donnée en MPa est par conséquent une des propriétés les plus importantes. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur le béton à 28 jours d'âge afin de vérifier la qualité du béton produit. La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif.

A la flexion : On s'intéresse aussi beaucoup à la résistance en flexion lors de la conception des chaussées et autres dalles ou béton de pavages. On établit souvent approximativement la résistance en flexion ou module de rupture d'un béton de masse volumique normale entre $0,7$ et $0,8\sqrt{f_c}$.

Quant à la résistance à la traction elle est comprise entre 8 et 12% fois la résistance à la compression.

➤ Masse volumique

La masse volumique d'un béton ordinaire utilisé dans les chaussées, les bâtiments et autres structures usuelles est comprise entre 2240 à 2400 kg/m³. Elle dépend de la quantité et de la densité des matériaux, des quantités d'air emprisonné et entraîné. Le béton combiné avec des

armatures donne naissance à un béton armé de masse volumique généralement accepté dans les calculs de 2400 kg/m^3 . La masse d'un béton sec est égale à la masse du béton frais – la masse d'eau évaporable. Une partie de l'eau de gâchage se combine chimiquement avec le liant pour former des hydrates et une autre partie est emprisonnée dans les pores et capillaires qui s'évaporent lentement dépendamment des conditions environnantes du béton.

➤ **La durabilité**

Le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique....).

I.4-Notions de durabilité

Un ouvrage durable indique que cet ouvrage doit résister au cours de temps aux divers agressions ou sollicitations, c'est à dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur le milieu ambiant.

L'ouvrage doit conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement, Sécurité, confort d'usagers), avec des frais de maintenance et d'entretien réduits que possible.

I.4.1-La perméabilité

La perméabilité d'un matériau correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression.

Une faible perméabilité conduit à une grande résistance aux agressions chimique comme les bétons en milieu marin ou en milieu agressif (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides...).

Bien que la perméabilité d'un milieu poreux dépende fortement de sa porosité, d'autres paramètres du réseau poreux l'influencent également. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : la connectivité, la tortuosité, ainsi que la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores [20].

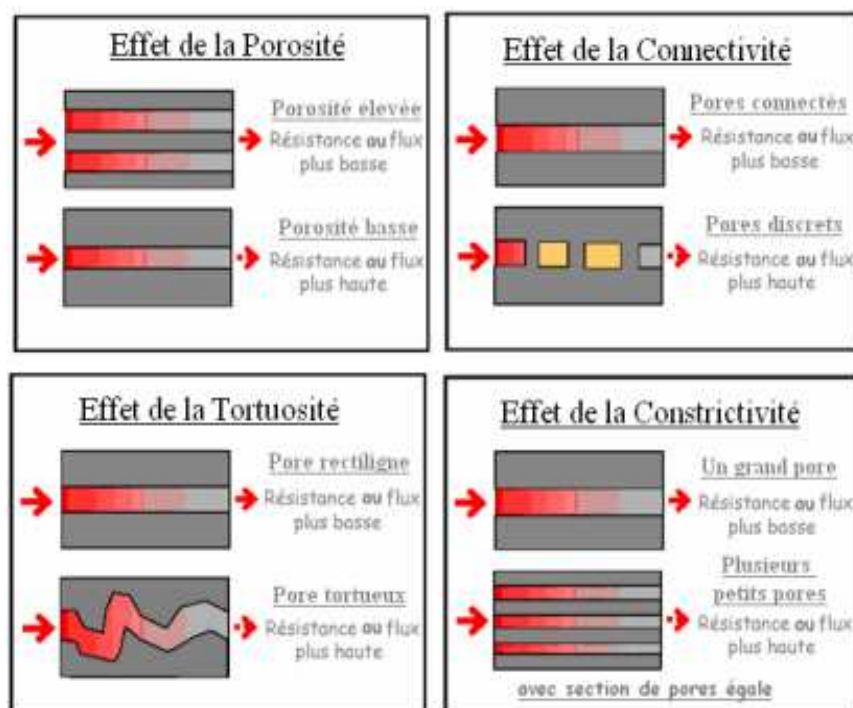


Figure (I-2) les paramètres physiques influant la résistance aux flux [20]

➤ **La porosité :** La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat. La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux.

I.4.2-Paramètres de la durabilité chimique

I.4.2.1-Paramètres liés au matériau

➤ **Composition chimique et minéralogique du ciment**

- **Teneur potentielle en portlandite Ca(OH)_2 :** vis-à-vis des attaques chimiques (acides, sulfate..), la portlandite est la plus facilement solubilisable.

C'est pourquoi dans les milieux agressifs, des bétons élaborés avec des ciments composés ou contenant des additions consommatrices de chaux comme le laitier, cendres volantes, fumées de silice....etc. la teneur potentielle en hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 est considéré comme un indicateur majeur de durabilité, plus la teneur en chaux est faible, plus la résistance chimique est bonne[17].

- **Teneurs en aluminat tricalcique C_3A et en silicate tricalcique C_3S :** au contact de l'eau de mer et dans les milieux fortement chargés en sulfates, le C_3A anhydre résiduel qui n'a pas réagi avec le gypse régulateur de prise peut se transformer en étringite expansive, dans ces cas, sa teneur doit être limitée, la même chose pour le C_3S [17].

- **Teneurs en additions minérales :** les laitiers, les cendres volantes, les pouzzolanes, les fumées de silice sont généralement favorables à la résistance chimique du béton, d'une part parce qu'ils réduisent la basicité globale du matériau en consommant la chaux libérée par l'hydratation des silicates C_3S et C_2S , d'autre part, par leur effet positif sur la microstructure du béton[17].

➤ **Nature minéralogique des granulats**

On distingue 3 types de réaction qui diffèrent suivant la nature minéralogique des granulats durant la conception du béton :

- Réaction alcali-silice.

- Réaction alcali-silicate.

- Réaction alcali-carbonate[17].

➤ Formulation et propriétés de transfert du béton

Les propriétés de transfert dont dépend la capacité du béton à résister à la pénétration des agents agressifs liquides ou gazeux, sont déterminantes pour la durabilité. Elles sont représentées essentiellement par les deux indicateurs majeurs de durabilité qui sont la diffusivité et la perméabilité. Toutes deux en relation avec la compacité. La compacité elle-même assurée par une formulation optimisée du squelette granulaire de béton.

Dans les cas des bétons à haute performances, la compacité maximale est obtenue par une large étendue granulaire associée à l'utilisation des fines (calcaire, laitier, cendres volantes, fumée de silice).

I.4.2.2-Paramètres liés à l'environnement

Paramètres liés à l'environnement à prendre en compte :

➤ La nature physique de l'agent

Qui peut être liquide, gazeux :

Les milieux liquides sont essentiellement les eaux pures plus ou moins chargées et des solutions d'acides, de bases et de sels d'origine naturelle ou artificielle.

Les milieux gazeux sont d'origine naturelle, industrielle ou domestique, par exemple CO, SO₂, NO_x, H₂S, dans les ouvrages d'assainissement, le chlore dégagé lors d'incendies.

➤ La nature chimique de l'agent agressif

Sa concentration, son mode d'action (dissolution, hydrolyse, lixiviation, dissolution/précipitation).

➤ Les conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales :

Exposition atmosphérique, immersion totale, semi immersion, zone de marnage ou encore de enfouissement[18].

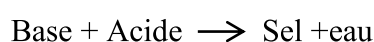
- **La température** : qui est généralement un facteur d'accélération des réactions.
- **Les cycles climatiques** : les cycles humidification séchage accélérant considérablement les dégradations du béton.
- **La mobilité du milieu agressif** : qui accélère les échanges chimiques et qui peut éventuellement induire en effet mécanique supplémentaire (érosion, chocs), est un facteur aggravant.

I.4.2.3-Paramètres liés à la structure

Il prend en compte, les effets des contraintes mécaniques au fonctionnement de l'ouvrage; chargement, fatigue, dilatation et retraits différentiels. Les contraintes peuvent engendrer des fissurations qui seront susceptibles d'accélérer et d'aggraver d'éventuelles attaques chimiques qui vont affaiblir la structure.

I.4.3-Revue des principaux milieux agressifs**➤ Milieux acides**

Le béton est un matériau basique très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagit suivant la réaction bien connue :



Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution qui peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base +acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant[2].

○ Acides minéraux

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif [2].

○ Acides organiques

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes[2].

I.4.3.1-Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides

a- Protection supplémentaire par la mise en œuvre d'une résine, bitume et autre revêtement.

b- Bien identifier les risques : nature de(s) sel(s), concentrations, mode d'action (mobilité, renouvellement, température...)

c- Utiliser des ciments à faible teneur en chaux, en particulier des ciments avec ajout minéraux consommateurs de chaux comme le laitier, cendres volantes, silico-alumineuse, pouzzolane réactives, fumée de silice.

d- La mise en œuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton.

I.4.3.2-Attaque par les ions chlorures

Dans les bétons les chlorures proviennent pour l'essentiel du milieu extérieur, mais il est important de limiter les sources internes chlorures. Pour l'acier, le processus de corrosion généralement admis et débute par la dissolution du métal et la formation des ions ferreux.

L'hydrolyse de ces derniers entraîne l'acidification de la matière et la formation d'hydroxyde ferreux insoluble dont l'évolution donne la rouille.

La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de complexes mécanismes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important.

- La capacité de fixation des ions Cl^- par le ciment dépend de la nature du ciment utilisé, principalement de la quantité d'aluminate C_3A présente dans le clinker.
- D'autres espèces ioniques peuvent provenir sur la fixation chimique des chlorures.
- La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte du ciment, elle décroît avec le rapport E/C, de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante en sels[20].

➤ Définition de l'attaque par les ions chlorures

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique.

➤ Source de l'attaque des ions chlorures

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle.
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores.

On considère que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépasseivation et de corrosion des armatures.

I.4.3.3-Milieu sulfaté

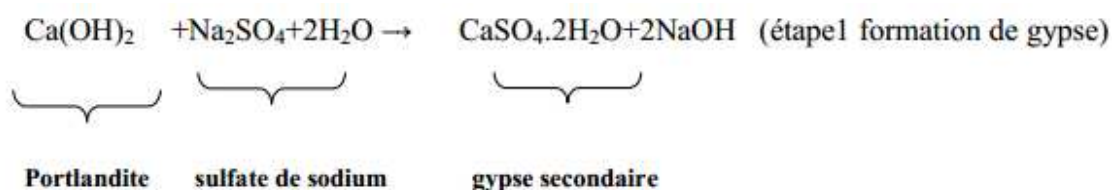
Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques ou industrielles.

Les réactions sulfatiques constituent une source importante de désordres pour les ouvrages. Ces réactions mettent en jeu les ions sulfates présents dans la solution interstitielle et les aluminates du ciment (anhydres ou hydratés). Elles conduisent à la formation dans le béton durci d'ettringite secondaire) potentiellement expansive ($3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 32\text{H}_2\text{O}$) la formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive, et sous certaines conditions, les CSH peuvent réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasite ($\text{CaCO}_3, \text{CaSiO}_3, \text{CaSO}_4, 15\text{H}_2\text{O}$) entraînant des phénomènes expansifs et désagrégation de l'ensemble du liant. Les sulfates peuvent être internes ou externes[16].

Les réactions chimiques des différents sulfates avec la pâte de ciment durci sont les suivantes :

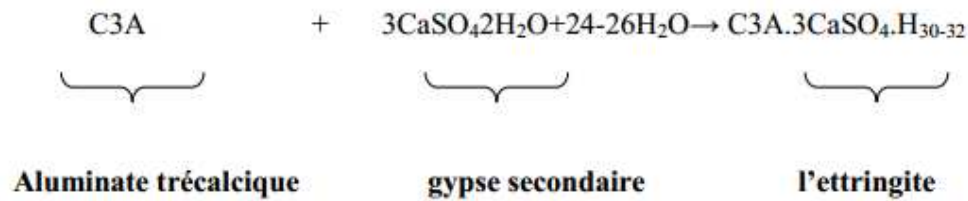
➤ Le sulfate de sodium

Très soluble, entraîne des dégradations par formation de gypse et d'ettringite expansive[17]



La réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite[20] :

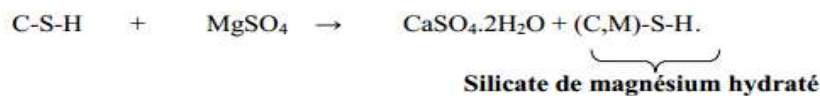
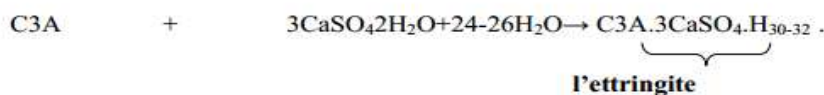
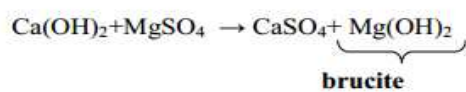
- Soit par le C3A anhydre :



- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_4AH_{13} où de monosulfoaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$.

➤ Le sulfate de magnésium :

Attaque le béton par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{+2} et l'anion SO_4^{-2}



Le silicate de magnésium hydraté M-S-H n'a pas des propriétés liantes en plus de la cristallisation d'ettringite qui est instable en présence de sulfate de magnésium[20].

➤ Le sulfate de calcium

Se trouve dans le sol sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses. Son attaque produit des dégradations au béton qui est due à la formation d'ettringite expansive.

I.4.3.4-Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements agressifs

a- Une analyse approfondie sur les conditions environnementales générales et locales est indispensable afin de définir la classe d'exposition de la structure ou des éléments de la structure qui permet de s'adapter au mieux la formulation du béton.

b- la résistance chimique du béton croît avec le dosage en ciment.

c- La Compacité : La compacité détermine les capacités de transfert du béton vis-à-vis de l'eau et des ions agressifs, la compacité dépend du dosage en ciment du rapport E/C, et l'étendue granulaire en relation avec un dosage optimal en fines.

d- Teneur en C3A : la vitesse de dégradation du béton est proportionnelle au pourcentage en C3A du ciment portland, non seulement le C3A mais surtout du rapport C3A/SO3.

e- Pour limiter la vulnérabilité des constituants riches en chaux Ca(OH)_2 et C-S-H la NF P15-317 limite la teneur en C3S des ciments de type CEM I et CEM II/A sous forme d'indice dit « indice de Sarden », cet indice est égal au $\% \text{C3A} + 0.27 \% \text{C3S}$ [20].

f- Effet des additions sur la durabilité du béton : les additions minérales de laitier, de cendre volantes silico alumineuse, de pouzzolane naturelle et de fumée de silice améliorent la durabilité des bétons, l'amélioration est due à la dilution des aluminates et à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact[20].

-Ajout de laitiers : l'ajout de laitier influent positivement sur la résistance du béton. Ce comportement est dû aux effets de dilution, de réduction de la teneur en chaux et de la modification de la microstructure de la pâte du ciment dont la densification très importante au cours du temps, réduit notablement la capacité de transfert des ions agressifs dans le béton.

-Cendres volantes : Elles ont des effets bénéfiques sur la tenue des bétons aux sulfates. Cet effet est dû à la consommation partielle par les cendres de la portlandite libérée lors d'hydratation des silicates du ciment portland et réduction du rapport CaO/SiO_2 des C-S-H, due aussi aux modifications de microstructure par la réduction des rayons des pores.

-Fumée de silice : elles ont des effets très bénéfiques sur la résistance des bétons aux sulfates dus à leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des C-S-H qu'elles forment.

-Les pouzzolanes : Leurs effets sont voisins de ceux décrits pour les autres additions, consommation de la chaux et de production de C-S-H moins basiques et accroissement de compacité.

I.5 : Généralités sur les barrages

Par leur complexité, les barrages imposantes construction du génie civil, peuvent être considérés comme des ouvrages particuliers. Ils présentent par ailleurs la caractéristique de pouvoir être affectés à différentes fonctions. Ils jouent cependant deux rôles principaux : celui, d'une part, de stocker les apports d'eau afin de répondre aux besoins vitaux et économique des populations (eau potable, irrigation, fournitures d'énergie, navigation) et celui, d'autre part, de protection contre des effets destructeurs de l'eau (maîtrise des crues, rétention de sédiments, protection contre les avalanches) ou de recours pour le cas de pénurie en eau[17].

Au cours du temps la technique des barrages s'est bien entendu développée et des progrès sensibles ont été réalisés en ce qui concerne, entre autres, le mode d'exécution et la sécurité.

Le nombre et la hauteur des ouvrages de retenue n'ont donc pas cessé de croître.

Les matériaux généralement utilisés pour la construction des barrages sont des sols naturels meubles ou des enrochements (barrages en remblai) et le béton conventionnel (barrages poids, voûte, à contreforts) ou compacté au rouleau (avant tout, barrages-poids). Il existe donc plusieurs profils d'ouvrages selon les matériaux choisis, qui doivent être disponibles en quantité suffisante à proximité des sites[17].

I.5.1-Les barrages, c'est quoi ?

Les barrages sont, par définition, des ouvrages hydrauliques qui barrent sur toute la largeur une section d'une vallée et créent ainsi une cuvette artificielle géologiquement étanche. De manière générale et dans la plupart des cas, la hauteur du barrage dépasse le niveau d'eau atteint par les cours d'eau en période de fort crue[17].

Les barrages sont des ouvrages de génie civil singuliers par bien des points :

- Ce sont des structures complexes qu'il faut traiter comme des systèmes. Leurs études et réalisation prennent en compte un grand nombre de paramètres et de données. Chaque barrage doit être considéré comme un prototype.
- Le comportement d'un barrage durant son cycle de vie est complexe, il dépend de plusieurs phénomènes et facteurs bien définis : la modification des caractéristiques des matériaux (vieillessement), la tenue de la fondation, les conditions météorologiques et thermiques (variables), les effets chimiques de l'eau, les sollicitations sismiques (imprévisibles), les risques hydrologiques et le mode d'exploitation de la retenue[17].

▪ Finalement, les exigences quant à la sécurité des barrages sont extrêmes, dans toutes les phases d'un projet : la planification, la conception, la réalisation et l'exploitation.

I.5.2-Le rôle des barrages

Par la construction de barrages, l'homme influence de manière prépondérante l'écoulement naturel des eaux ruissellement.

- La création d'une retenue : selon le volume utile de la retenue.
- La régulation des apports. Dans la plupart des régions du monde, les précipitations sont concentrées sur des périodes courtes
- Ces apports sont souvent très irréguliers d'une année à l'autre alors que les besoins en eau sont répartis de manière beaucoup plus homogène sur l'année. Il s'ensuit donc une succession de périodes de pénurie et d'excès que seule la réalisation d'une retenue permet de compenser. Par ailleurs, la régulation permet de prévenir des inondations en cas de crue.
- La surélévation du plan d'eau d'une rivière : la mise en place d'un barrage en travers d'un cours d'eau a pour effet de surélever le plan d'eau à l'amont. Cet effet est bien entendu utilisé pour la production hydroélectrique, mais également pour gérer la dérivation des eaux d'une rivière vers une prise d'eau, puis un canal d'amenée pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable.
- La création d'un plan d'eau : la réalisation d'un lac artificiel permet de disposer d'une surface qui peut entre autres être destinée aux loisirs, au tourisme à la pisciculture, à la navigation, à la protection incendie.[17]

I.5.3-Les particularités de la construction des barrages

En premier lieu, les études préliminaires sont particulièrement importantes et coûteuses. Elles traitent différents domaines : l'hydrologie, la géologie, l'hydraulique, la science des matériaux, la topographie, la géographie, la biologie, la chimie, l'économie rurale, l'économie énergétique, l'économie hydraulique... Ces études se distinguent souvent par leur durée, atteignant souvent plus dizaines d'années[17].

L'analyse des impacts sur l'environnement est entreprise très tôt pour évaluer les différentes solutions, puis pour prendre des mesures de limitation des impacts ou de compensation.

En outre, la démesure des quantités de matériaux nécessaires a une influence considérable sur la durée, les moyens à mettre en œuvre et sur les paramètres techniques du projet. Il ne s'agit pas, comme avec d'autres types de structures, de trouver des matériaux satisfaisant aux critères ou normes fixés comme données du projet, mais de définir un ouvrage pouvant être

réalisé avec les caractéristiques des matériaux à disposition. Ainsi, chaque barrage est unique parce qu'il est réalisé avec des matériaux qui lui sont propres[17].

Enfin, il faut mentionner que quel que soit le type de barrage, les exigences relatives à la sécurité sont primordiales durant toute la vie de l'ouvrage. Les barrages sont continuellement auscultés et soumis à une surveillance attentive. C'est pour cela qu'on doit avoir une certaine idée sur la durabilité du barrage et de ses structures, pour anticiper des fissures ou n'importe quelle autre dégradation qui auront des répercussions désastreuses sur la nature, l'environnement ou la population[17].

I.5.4-Types de barrages

Selon la nature du matériau de construction, on classe les barrages selon deux grandes catégories :

- Les barrages en béton.
- Les barrages en remblai.

➤ Les barrages en Béton

Les trois types de barrages en béton se distinguent par leur forme, la nature de leur système statique et leur manière de s'opposer à la poussée de l'eau :

Barrages poids : comme son nom l'indique, résiste à la poussée de l'eau par son propre poids. Le barrage-poids est constitué d'éléments massifs juxtaposés, nommés plots. Dans le but de réaliser une économie du béton, il est possible d'aménager des alvéoles entre les plots, dans ce cas on parle de barrage-poids évidé. Une autre solution consiste à concevoir un barrage-poids voûte dont la stabilité est assurée en partie par son poids propre et en partie par ses appuis sur les rives[17].

Les types de barrage appartenant à la famille du barrage-poids :

Barrage-poids massif, barrage-poids évidé, barrage-poids voûte, barrage-poids incurvé, barrage en béton compacté au rouleau (BCR) [17].

Barrages à contreforts : résiste également à la poussée de l'eau par son poids propre, mais un certain nombre de dispositions permettent de diminuer le volume de béton par rapport au barrage-poids. Ce type de barrage est formé d'éléments juxtaposés nommés contreforts, dont la géométrie est complexe. Chaque contrefort est constitué d'un masque continu à l'amont et d'une âme et reprend l'effort exercé par la poussée de l'eau. Les contraintes dans le corps du barrage et au contact avec la fondation sont plus élevées que pour un barrage-poids en même hauteur[17].

Les types de barrage appartenant à la famille du barrage à contreforts :

Barrage à contreforts à tête élargie, barrage à contreforts à dalles planes, barrage à voûtes ou dômes multiples, barrage évidé.

Barrage voûte : est une structure tridimensionnelle agissant comme un voile ou une coque. Il présente une forte courbure en plan et transmet une partie importante des efforts sur les flancs de la vallée. Lorsque toutes les conditions nécessaires sont réunies, il permet d'économiser un volume important de béton par rapport aux deux types précédents [17].

Les types de barrage appartenant à la famille du barrage voûte :

Barrage à voûte épaisse, barrage à voûte mince, barrage à voûte cylindrique, barrage à voûte à double courbure[17].

➤ Les Barrages en remblai

Les barrages en remblai (digues) sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage. On distingue deux catégories de barrage en remblai :

Les barrages en terre : réalisés essentiellement à partir de sols naturels meubles prélevés dans des gravières.

Les sous familles des barrages en terre :

Barrage en terre homogène, barrage en terre zonée, barrage en terre à noyau d'argile, barrage en terre à masque amont (béton ou bitume), barrage en terre à membrane interne en béton bitumineux[17].

Les barrages en enrochements : dont la majeure partie est constituée de matériau de carrière concassé.

Les sous familles des barrages en enrochements :

Barrage en enrochements à noyau d'argile, barrage en enrochements à masque amont (en béton ou bitume) ; barrage en enrochements à écran interne d'étanchéité (membrane) en béton bitumineux.[17]

➤ Les ouvrages annexes dans les barrages en remblai :

Relégués à l'arrière-plan par la structure importante du barrage, mais en rien inférieures pour la sécurité de l'exploitation de l'aménagement. Ce sont des constructions souvent en béton armé, Ses constructions ont un rôle important sur le bon maintien des capacités et de la sécurité du barrage, ils sont comme suit :

-Dérivation provisoire :

- Vidange de fond.
- Prise d'eau.
- Evacuateur de crues.[17]

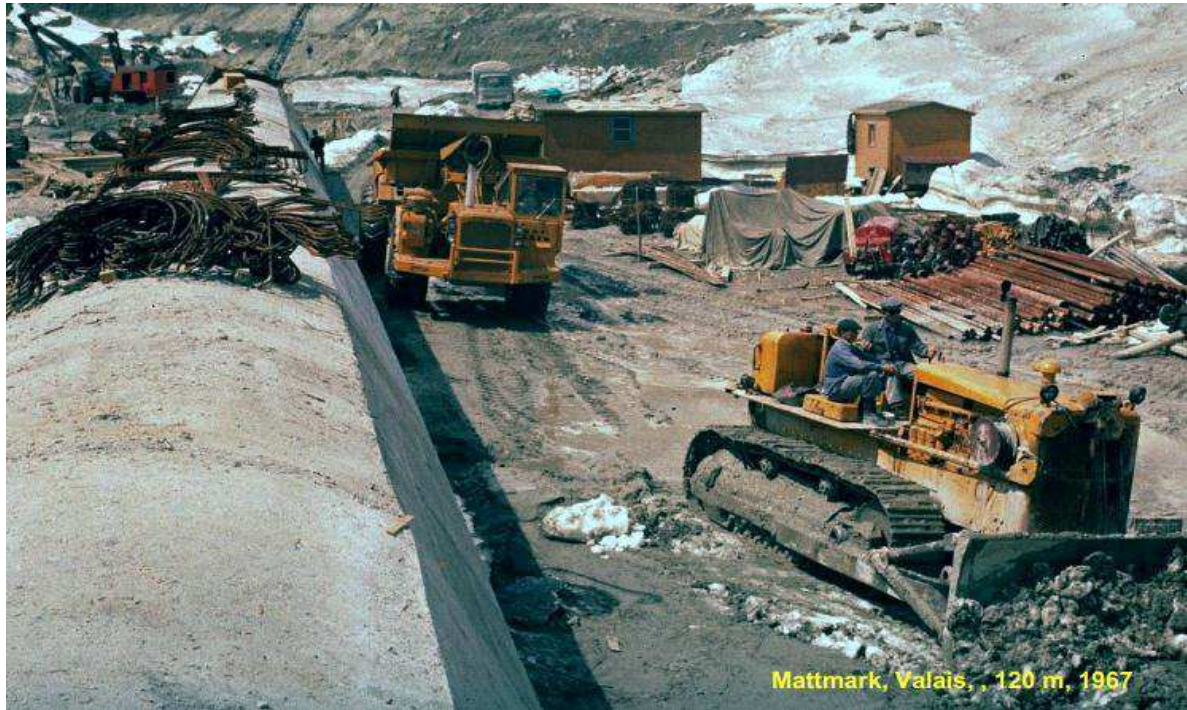


Figure (I-3) : Construction d'une dérivation provisoire (barrage de Valais, Suisse)

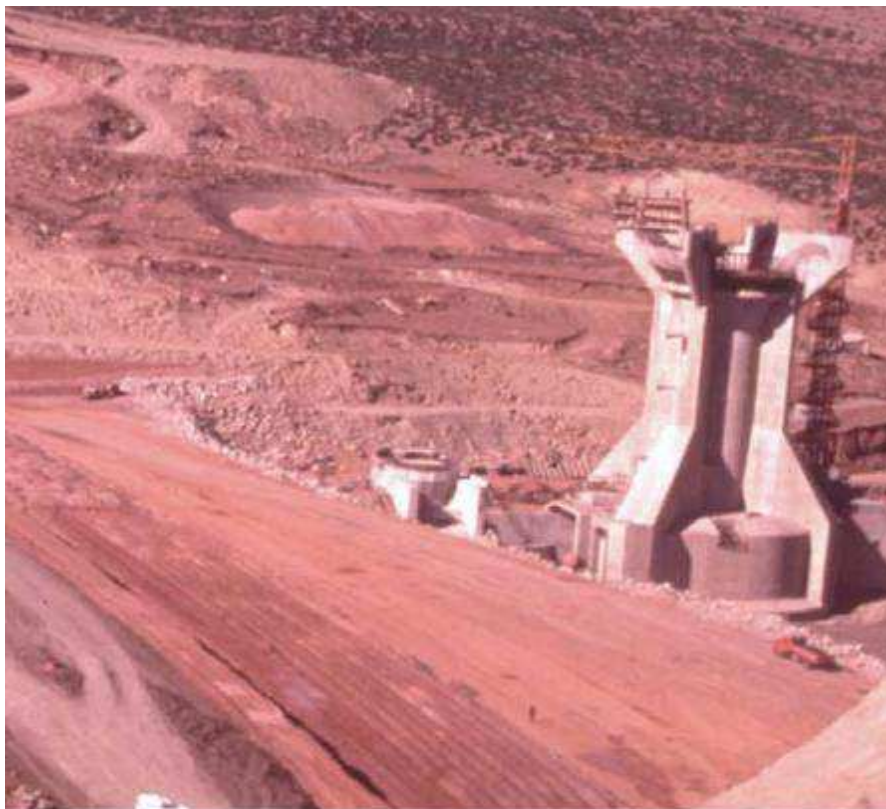


Figure (I-3) : Tour de prise (barrage de El Makhazine, Maroc)



Figure (I-4) : Construction d'une tour de prise (Barrage de Béni slimane, Algérie)

II.1-Problématique et objectif du travail

L'une des préoccupations majeures d'un grand nombre de pays demeure le spectre de la pénurie d'eau surtout dans les régions à faible pluviométrie.

D'où la nécessité de constituer des réserves de sécurité en eau suffisantes à travers la construction de barrages, retenues d'eau, digues...

Mais le contrainte de ces ouvrages à elle seule ne suffit pas, ils doivent pouvoir assurer leurs fonctionnement aussi longtemps que possible et dans des milieux agressifs (zones sismiques, pollution chimique et atmosphériques, salinité...)

La durabilité de ces constructions est un des paramètres fondamentaux qui dépend de plusieurs critères tel que : l'emplacement géophysique de l'ouvrage, la qualité de l'eau à stocker, la nature et la qualité des matériaux à utiliser pour la construction, la formulation du béton qui servira à réaliser l'ouvrage...

Notre travail de recherche s'est intéressé à ce dernier paramètre compte tenu des défis qu'offrent la durabilité des ouvrages annexes en béton, ordinaire ou armé, du barrage en remblai de Béni Slimane (Médeä) et leur potentielle fragilité vis-à-vis : la pénétration d'eau et l'attaque chimique des milieux auxquels ils sont exposés.

➤ Caractéristiques générales du barrage de Béni Slimane :

Retenue d'Oued Mellah dans la Wilaya de Médeä à environ 7 km au sud de la ville de Béni Slimane, ses caractéristiques sont les suivants :

Type de barrage : en remblai : terre zonée ;

Capacité totale : $28,7 \text{ hm}^3$;

Surface totale : 176 km^2 ;

Hauteur maximale : 66m ;

Tous les ouvrages en béton du barrage de Béni Slimane sont confrontés à un défi de durabilité vis-à-vis de potentiels attaques chimiques de diverses sources, spécialement celles en provenance de Oued Mellah (une rivière présentant des taux de sels et sulfates assez élevés).

Une détérioration de la matrice ou des armatures du béton armé sera alors possible, ce qui a conduit le bureau d'études serbe (COBA) de proposer une formulation de béton avec la méthode de Bolomey en utilisant un ciment répondant aux exigences du CRS : le ciment CEMIII-CHF/A.

Sera-t-il suffisant pour assurer la longévité de ces structures (Tour de prise, évacuateur de crues...) qui rappelons le, jouent un rôle important au niveau de la sécurité de cette retenue ?

➤ **Objectif de travail :**

Notre objectif consiste à améliorer le béton de structure des ouvrages annexes du barrage, dans tous les aspects possible, cela en confectionnant trois autres compositions semblables au béton témoin (même constituants) mais avec une partie liante différente.

Ce projet fera ensuite une étude comparative des quatre bétons pour avoir une idée globale sur leurs résistance mécano-chimiques, ça nous permettra de connaître la formulation la plus optimale envers différentes contraintes et attaques chimiques.

Note : vu le temps réduit qu'on avait pour la réalisation du projet expérimentale, on a préféré opté pour un milieu salin et un autre acide (à la place du milieu sulfaté que son étude prendra au minimum 1 an) avec des dosages qui nous permettront d'accélérer les résultats.

II.2-Caractérisation des matériaux

II.2.1-Les Ciments

Dans cette étude on a utilisé deux types de ciment :

❖ Ciment de haut fourneau (CHF-CEM III/A 42.5 N)

C'est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture du clinker et de laitier granulé de haut fourneau. Ce ciment présente des résistances normales à court terme.

Ce ciment répond aux exigences des normes algériennes **NA 442** et la **NA 443**

➤ Analyse chimiques

Tableau (II-1) : Analyse chimique du CHF-CEM III/A

Perte au feu (%) (NA5042)	0.50-2.50
Teneur en sulfate (SO ₃)(%)	2.00-2.60
Teneur en oxyde de Magnésium (MgO) (%) (NA5042)	2.30-0.030
Teneur en chlorures (%) (NA5042)	0.010-0.030

➤ Composition minéralogique du clinker

Tableau (II-2) : Composition minéralogique du clinker du CHF-CEM III/A

C ₃ S (%)	57-61
C ₂ S (%)	14-18
C ₃ A (%)	06-08
C ₄ AF (%)	10-12

➤ Propriétés physiques et mécaniques

Tableau (II-3) : Propriétés physiques et mécaniques du CHF-CEM III/A

Surface spécifique (Blaine) (cm ² /g)	3500-4300
Consistance normal (%)	28-32
Retrait à 28 jours (μm/m)	<800
Chaleur d'hydratation (j/g)	<220
Expansion (mm)	<05
Début de prise (min)	>200

➤ Résistance à la compression

Tableau (II-4) : Résistance à la compression du CHF-CEMIII/A

02 jours (MPa)	>10
28 jours (MPa)	>42.5 - <62.5

➤ Domaine d'utilisation du ciment CHF

- Travaux en milieux agressifs.
- Travaux hydrauliques.
- Travaux souterrains.
- Travaux d'injection.
- Ouvrage massifs et bétonnage par temps chaud : Fondation, voiles épais ou encore les barrages et piliers massifs de ponts ou autres ouvrages d'art.

❖ Ciment blanc (CEM II / A-L 52,5N)

➤ Analyse chimiques

Tableau (II-5) : Analyse chimiques du ciment blanc

Perte au feu (%) (NA5042)	6.0±2
Teneur en sulfate (SO ₃) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de Magnésium (MgO) (%) (NA5042)	1.7±0.5
Teneur en chlorures (%) (NA5042)	0.02-0.09

➤ Composition minéralogique du clinker

Tableau (II-6) : Composition minéralogique du clinker du ciment blanc

C ₃ S (%)	55±3
C ₃ A (%)	09±01

➤ Propriétés physiques et mécaniques

Tableau (II-7) : Propriétés physiques et mécaniques du ciment blanc

Surface spécifique (Blaine) (cm ² /g) (NA5042)	4300-5200
Consistance normal (%)	28±3.0
Retrait a 28 Jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	<3.0
Début de prise (min)	160±40

➤ Résistance à la compression

➤ Tableau (II-8) : Résistance à la compression du ciment blanc

02 jours (MPa)	>20.0
28 jours (MPa)	>52.5

➤ Domaine d'utilisation

- Béton structurel.
- Béton coloré.
- Fabrication de carreaux de dalles.
- Balustrades.

II.2.2- Les Granulats (NF P18-650)

➤ Les Sables

Nous avons utilisé deux types de sables, un sable de la carrière du chantier (CP04 Béni Slimane) il est de couleur gris et de granulométrie 0/4, et un sable de dune de BOUSAADA de granulométrie 0/1.

Les caractéristiques principales requises pour les sables à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité déterminée par le module de finesse qui est déterminé par l'analyse granulométrique.

○ Sable 0/4

Analyse granulométrique (NFP 18-560)

Poids sec avant lavage g=1000,0	Poids sec après lavage g =911,8
---------------------------------	---------------------------------

Tableau (II-9) : Analyse granulométrique du sable 0/4

Module N	Diamètre mm	Poids cumulé g	Refus cumulé %	Passant %
38	5	1.2	0.12	99.9
37	4	34.04	3.40	96.6
36	3.15	190.7	19.07	80.9
35	2.5	374.4	37.44	62.6
32	1.25	608.3	60.83	39.2
29	0.63	768.3	76.83	23.2
26	0.315	852.4	85.24	14.8
23	0.16	898.6	89.86	10.1
20	0.08	910.5	91.05	9.0
	Fond	910.9		
		MF	3.50	

Essai D'équivalent De Sable (NF EN 933-8)

Tableau (II-10) : Essai d'équivalent du Sable 0/4

Prise d'essai No	1	2
Hauteur de la colonne H1 cm	11.3	11.7
Hauteur de la colonne H2 cm	8.4	8.4
Hauteur de piston H2' cm	8.1	8.1
ES à vue %	74.3%	71.8%
ES à piston %	71.7%	69.2%
ES à vue moyen %	73%	
ES à piston moyen %	70%	

○ Sable 0/1

Analyse granulométrique (NFP 18-560)

Poids sec avant lavage g=1000,0	Poids sec après lavage g =971.8
---------------------------------	---------------------------------

Tableau (II-11): Analyse granulométrique du sable 0/1

Module N	Diamètre mm	Poids cumulé g	Refus cumulé %	Passant %
38	5	00	0.00	100.0
37	4	00	0.00	100.0
36	3.15	00	0.00	100.0
35	2.5	00	0.00	100.0
32	1.25	0.1	0.01	100.0
29	0.63	0.2	0.02	100.0
26	0.315	21.5	2.15	97.9
23	0.16	910.4	91.04	9.0
20	0.08	969.4	96.94	3.1
	Fond	970.6		
		MF	0.93	

Essai d'équivalent de sable (NF EN 933-8)

Tableau (II-12): Essai d'équivalent de sable 0/1

Echantillon No	1	
Prise d'essai No	1	2
Hauteur de la colonne H1 cm	15.7	15.4
Hauteur de la colonne H2 cm	9.8	9.5
Hauteur de piston H2' cm	8.9	9.1
ES à vue %	62.4%	61.7%
ES à piston %	56.7%	59.1%
ES à vue moyen %	62%	
ES à piston moyen %	58%	

○ **Sable corrigé**Selon la loi de **BOLOMEY** :

$$M_{fd} = 2,65 \quad M_{f_{0/1}} = 0,86 \quad M_{f_{0/4}} = 3,336$$

$$\%S_{0/4} = (M_{fd} - M_{f_{0/1}}) / (M_{f_{0/4}} - M_{f_{0/1}}) = \boxed{70\%}$$

$$\%S_{0/1} = 100\% - \%S_{0/4} = (M_{f_{0/4}} - M_{fd}) / (M_{f_{0/4}} - M_{f_{0/1}}) = \boxed{30\%}$$

$$S_{\text{corrigé}} = 70\% S_{0/4} + 30\% S_{0/1}$$

Poids sec avant lavage g=1000,0

Poids sec après lavage g =911,8

Tableau (II-13): Analyse granulométrique du sable corrigé

Module N	Diamètre mm	Poids cumulé g	Refus cumulé %	Passant %
38	5	1.9	0.19	99.8
37	4	31.7	3.17	96.8
36	3.15	128.9	12.89	87.1
35	2.5	223.7	22.37	77.6
32	1.25	422.0	42.20	57.8
29	0.63	537.5	53.75	46.3
26	0.315	606.4	60.64	39.4
23	0.16	861.1	86.11	13.9
20	0.08	896.7	89.67	10.3
	Fond	897.2		
		MF=	2.65	

Tableau (II-14) : Caractéristiques des sables

	Sable 0/1		Sable 0/4	
Équivalent de sable (%)	ESV=62	ESP =58	ESV=73	ESP=70
Module de finesse	0,86		3,34	
Densité absolue	2,637		2,685	
Densité apparente	1.45		1,52	
Taux d'absorption (%)	1,2		0,60	
Taux des fines (%)	1,75		8,76	

➤ Graviers

Nous avons utilisé trois fractions de gravier : 3/8, 8/15, 15/25.

Le tableau (II-14) présente les propriétés physico-chimiques des granulats utilisés pour la confection de notre béton

○ Gravier 3/8

Analyse granulométrique

Poids sec g=2653,7

Tableau (II-15): Analyse granulométrique du gravier 3/8

Module N	Diamètre mm	Poids cumulé g	Refus cumulé %	Passant %
42	12.5	0		
41	10	0	00,00	100.00
40	8	261.8	9.87	90.13
39	6.3	1129.5	42.56	57.44
38	5	1991.4	75.04	24.96
37	4	2546.6	95.96	4.04
36	3.15	2633.6	99.24	0.76
35	2.5	2640.8	99.51	0.49
32	1.25	2646,6	99.73	0.27
20	0.08	2649	99.86	0.14

○ Gravier 8/15

Analyse granulométrique

Poids sec g=3956.9

Tableau (II-16): Analyse granulométrique du gravier 8/15

Module N	Diamètre (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
44	20	0	0.00	100.00
43	16	692.2	17.49	82.51
42	12.5	2170.2	54.85	45.15
41	10	3274.3	82.75	17.25
40	8	3850.5	97.31	2.69
39	6.3	3948.4	99.79	0.21
38	5	3951.2	99.86	0.14
20	0.08	3955.5	99.96	0.04

○ Gravier 15/25

Analyse granulométrique

Poids sec g=3956.9

Tableau (II-17): Analyse granulométrique du gravier 15/25

Module (N)	Diamètre (mm)		Poids cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
46	31.5		0	0.00	100.00
45	25		238.1	4.16	95.84
44	20		3267.1	57.13	42.87
43	16		5500	96.18	3.82
42	12.5		5702	99.71	0.29
41	10		5712.1	99.89	0.11
40	8	5717.9	99.99	0.01	
20	0.08	5717.9	99.99	0.01	

Tableau (II-18) : caractéristiques des granulats

	Gravillon 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
M.volumique absolue (Kg/m ³)	2690	2690	/
M.volumique apparente (Kg/m ³)	1360	1340	/
Taux d'absorption (%)	0,48	0,40	/
Taux des fines (%)	1,33	1,38	/

➤ Interprétation des résultats :

L'équivalent de sable du 0/4 est de 73% visuel et 70% par piston, ES >70%, c'est un sable propre.

Vu que le module de finesse de ce sable est égale à 3,50 : grossier, on est mené donc à faire intervenir un sable correcteur qui est le sable 0/1 de BOUSSADA pour améliorer la nature des particules fines de notre béton.

L'équivalent de sable du sable 0/1 est de 62% visuel et 58% par piston.

La granulométrie est bien étalée ne dépassant pas 1 mm, et de ce fait, une garantie d'une meilleure présence des particules fines dans notre béton.

On peut qualifier le sable 0/1 de BOUSSADA comme un sable qui convient parfaitement au béton de haute qualité.

On remarque que :

La courbe granulométrique du gravier 3/8 est bien étalée variant de 1.25 jusqu'à 8 mm ;

La courbe granulométrique du gravier 8/15 est bien étalée variant de 5 jusqu'à 15 mm ;

La courbe granulométrique du gravier 15/25 est bien étalée variant de 8 jusqu'à 31.5 mm ;
Ils ont donc une granulométrie continue.

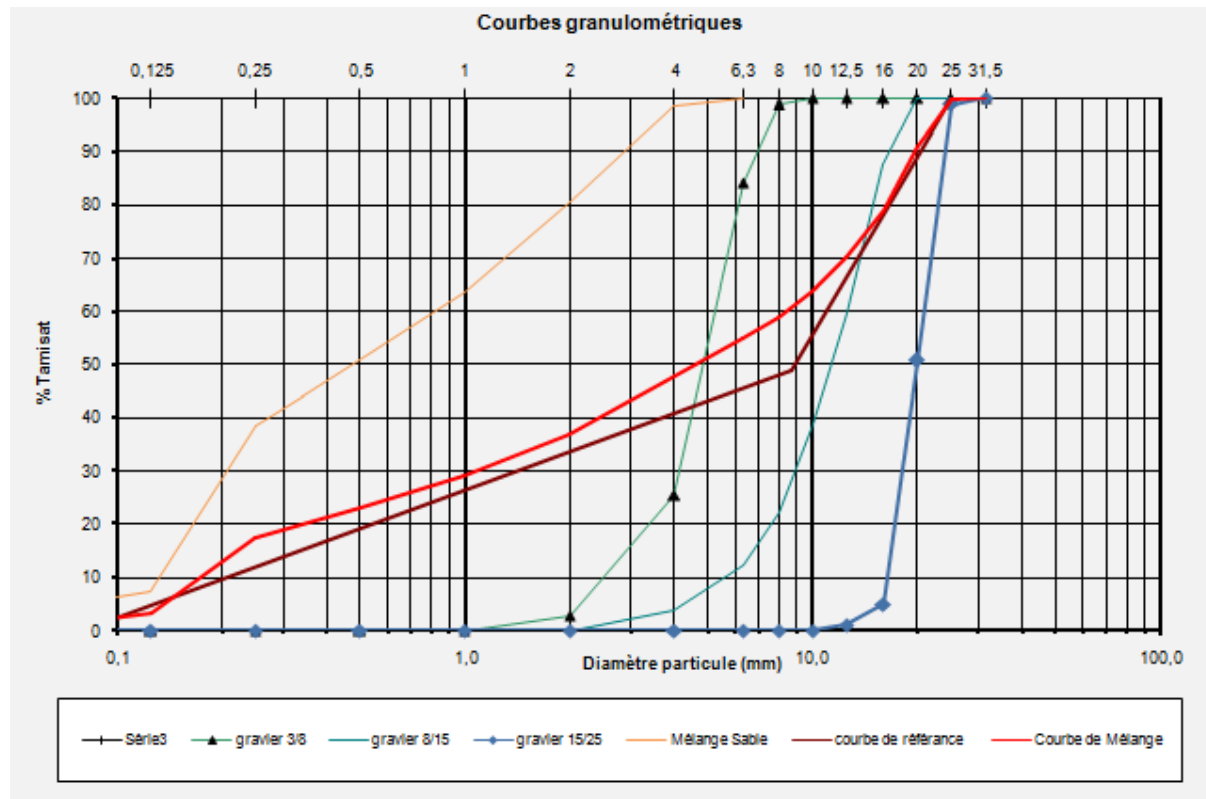


Figure (II-2) : Courbe granulométrique des granulats

II.2.3-L'adjuvant

Dans notre travail nous avons utilisé un superplastifiant Viscocrete Tempo 12 fabriqué par l'entreprise SIKA.

➤ Présentation

Sika Viscocrete Tempo 12 est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

➤ Domaines d'application

-Sika Viscocrete Tempo 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.

-Dans les bétons autoplaçants, Sika Viscocrete Tempo 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

-Sika Viscocrete Tempo 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

➤ Caractères généraux

Sika viscocrete tempo 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h),
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement.

➤ Les caractéristiques

Tableau (II-19): Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant

Aspect	liquide
Couleur	Brun claire
densité	1.06±0.01
PH	6±1
Teneur en chlorures	<0.1%
Extrait sec	30.2±0.01
Na₂Oeq	<1%
Conditionnement	-Futs de 230kg - CP de 1000l -Vrac

➤ **Conditions d'application**

○ **Dosage**

Plage de dosage : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

○ **II.2.3.5.2-Mise en œuvre**

Sika Viscocrete Tempo 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

II.2.4-Fumée de silice (SIKA-CONDENSIL S95 DP)

La fumée de silice utilisée dans ce travail commercialisée sous le nom CONDENSIL S95 DP, ses caractéristiques chimiques et physiques sont regroupées dans le tableau ci-dessous:

Tableau (II-20): Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice

Aspect	Poudre
Densité réelle	2.24
Surface spécifique	23 m ² /g
Teneur SiO ₂	95%
Teneur en SiC	1.50%
Teneur en C libre	1.50%
Teneur en S total	0.10%
Teneur en oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1.00%
Teneur en Cl ⁻	0.06%

II.2.5-Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable du robinet, exempte de toutes impuretés pouvant altérer la qualité du béton. Elle convient parfaitement pour la confection de béton.

Suivant les spécifications de la norme NF P 18-211, l'eau étant potable, elle est considérée comme appropriée pour la confection du béton et ne nécessite aucun essai, l'analyse n'est pas nécessaire.

II.3-Formulation de la composition du béton et essais réalisés**II.3.1-Formulation de la composition du béton**

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en cause.

Dans le chantier du barrage de Béni Slimane, la méthode de formulation adoptée est celle de Bolomey. Cette méthode a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m³, ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

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

Le principe de la méthode consiste à :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs.
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale.
- Déduire la composition d'un mètre cube de béton.

Le tableau (II-19) présente la masse en kg des différents constituants du béton de structure des parties annexes du barrage de Béni Slimane pour le volume d'un mètre cube.

Les 3 autres bétons sont des variations du béton témoin, au niveau de la partie liante : en ajoutant par substitution 10% de Fumée de silice, en modifiant le type de ciment utilisé ou en modifiant le type de ciment tout en ajoutant les 10% de fumée de silice.

Tableau (II-21): les masses en Kg des différents constituants des 4 types de béton pour 1m³

Constituants	Volume	Béton G (L : 100% CHF-CEM III / A 42.5N)*	Béton GF (L : 90% CHF- CEM III/A 42.5N + 10% Fumée de silice)	Béton B (L : 100% Ciment Blanc 52.5N)	Béton BF (L : 90% Ciment Blanc 52.5N + 10% Fumée de silice)
Sable 0/3	1000L	773			
Gravier 3/8		322			
Gravier 8/15		379			
Gravier 15/25		436			
CHF-CEM III/A 42.5N		350	315	/	/
Ciment Blanc 52.5N		/	/	350	315
Eau		160			
Adj. Viscocret		3.50			
Fumée de silice		/	35	/	35
E/C		0.5			
G/S		1.5			

* : La formulation du béton témoin utilisé dans la construction des principaux ouvrages annexes de barrage de Béni Slimane (Tour de prise, évacuateur de crue...)

II.3.2-Confection des éprouvettes

Toutes les formulations étudiées ont été confectionnées avec des moyens matériels identiques et dans des conditions similaires suivant le même mode opératoire qui suit :

➤ Préparation des matériaux

La première étape pour la confection des éprouvettes consiste en la préparation des matériaux nécessaires pour le malaxage, de ce fait on doit prélever ensuite peser chaque constituant du béton et le disposer devant le malaxeur.



Figure (II-3) : Les différents constituants du béton BF prêts pour le malaxage.

➤ **Malaxage**

Le béton est malaxé dans une bétonnière de capacité de 90L, selon la séquence de malaxage suivante :

- 1-introduction dans l'ordre des fractions de gravier 15/25, 8/15, 3/8 puis le sable « mélange » ensuite le ciment.
- 2-Malaxage à sec des ingrédients pendant 2min.
- 3-introduction de 70% d'eau de gâchage et malaxage pendant 1min.
- 4-ajout du superplastifiant puis du reste de l'eau de gâchage.
- 5-malaxage pendant 2min.

Note : pour les bétons avec fumée de silice le malaxage à sec était de 3min.



Figure (II-4) : béton après malaxage

➤ Préparation des éprouvettes

A la fin du malaxage le béton est déversé dans deux types de moules:

- 1) Cubiques ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$): nécessaires pour les essais de compression à 28j et de perméabilité, ils sont fournis par le laboratoire de béton du chantier de Béni Slimane.
- 2) Prismatique ($10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$): nécessaires pour les essais de flexion et de durabilité (après découpage en $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$) ils sont fabriqués dans l'atelier de menuiserie du chantier de Cosider M21 « Métro d'Alger », par un type de bois non absorbant d'eau et neutre au contact de la matrice cimentaire aux parois particulièrement lisses.

La paroi des moules en question sera humidifiée avec un produit huileux facilitant le démoulage.

Le coulis des gâchées dans les moules se fera en deux couches. Après chaque couche on pique le béton frais horizontalement à 25 reprises au minimum et on tapote des coups secs les parois du moule avec une tige en acier jusqu'à ce qu'aucune grosse bulle d'air n'apparaisse à la surface et que les traces laissées par cette tige de piquage disparaissent. Cette pratique vise à enlever les bulles d'air emprisonnées dans la masse pour obtenir par la suite un béton durci plus compact donc plus performant.

Au final on procède au surfacage de chaque moule par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure de celui-ci, pour enlever l'excès de pâte et avoir la forme finale voulue.

La conservation des moules remplis de béton se fera dans une salle où la température sera de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 95%.



II.3.2.4-Démoulage et cure du béton durci

Le démoulage est effectué 24h après le moulage, il sera fait grâce à un appareil à air comprimé en appliquant une pression d'air à travers un tuyau dans les trous des moules cubiques et prismatiques, cette force nous permettra de démouler notre béton, encore fragile, en préservant sa forme et sans l'endommager.



Figure (II-6) : L'appareil à air compresseur pour démoulage



Figure (II-7) : démoulage d'une éprouvette cubique 15x15x15cm

Les éprouvettes seront alors marquées convenablement avec un marqueur résistant à l'eau par les notations suivantes :

G : Béton comme liant le CHF-CEM III/A (MOUKAOUEM) (Béton Témoin)

GF : Béton avec comme liant 90% CHF-CEM III/A et 10% de Fumée de silice.

B : Béton avec comme liant le Ciment Blanc (MALAKI)

BF : Béton comme liant 90% Ciment Blanc et 10% de Fumée de silice.

Ces éprouvettes marquées seront alors immergées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour être conservées convenablement jusqu'au moment de l'essai.



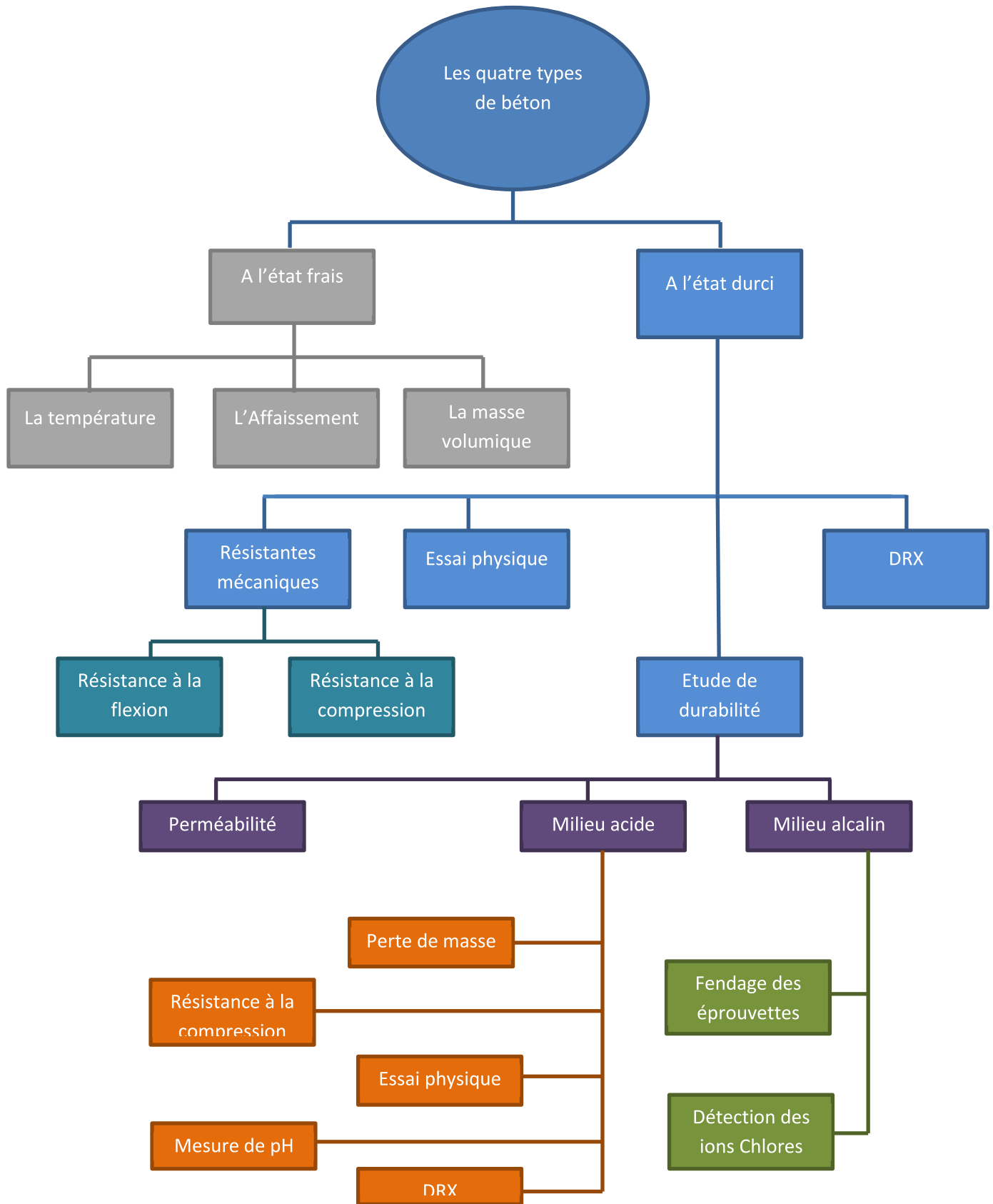
Figure (II-8) : Conservation des éprouvettes

II.3.3-Essais réalisés

II.3.3.1-Choix des essais

Nous nous intéressons à l'influence de la partie liante du béton et aux diverses performances apportées à celui-ci à différents états (frais et durci), les nombreux paramètres qui caractérisent l'usage de notre produit final (Béton qui sera incorporé par des fibres métalliques) dans le chantier du barrage en question nous pousse à étudier davantage le risque de corrosion des armatures en choisissant des essais de durabilité pour avoir une idée globale de la longévité de la structure à titre comparatif.

L'organigramme qui suit Figure (II-9) résume les essais effectués :



Figures (II-9) : Organigramme des essais réalisés

II.3.3.2-Béton à l'état frais**❖ La masse volumique (Norme NF EN 12350-6)**

Le béton frais sera mis en place dans un récipient, celui-ci doit être rigide et étanche à l'eau et avec une masse et un volume connu déjà.

Après remplissage du béton dans le récipient en deux couches avec piquages, on arase sa surface avec une truelle et on le pèse ensuite pour calculer sa masse volumique selon la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Où :

D est la masse volumique du béton frais, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3 ou gr/cm^3) ;

m_1 est la masse du récipient, en kilogrammes (kg ou gr) ;

m_2 est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kilogrammes (kg ou gr) ;

V est le volume du récipient, en mètres cubes (m^3 ou cm^3).

❖ La température

Paramètre non-négligeable pour les bétons destinés aux ouvrages hydrauliques pour connaître approximativement la chaleur dégagée par celui-ci lors du coulage, au cours de notre projet nous l'avons calculé avec un thermomètre en enfonçant son bout dans le béton frais et on la comparant avec la température de l'air.



Figure (II-10) : calcul de température.

❖ L'affaissement ou essai au cône d'Abrams (Norme NF P 18-451)

Le cône d'Abrams est un outil de mesure normalisé. Il détermine le taux d'affaissement du béton frais et donc sa consistance. La hauteur de l'affaissement du béton est mesurée en cm. La mesure de l'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle souhaitée.

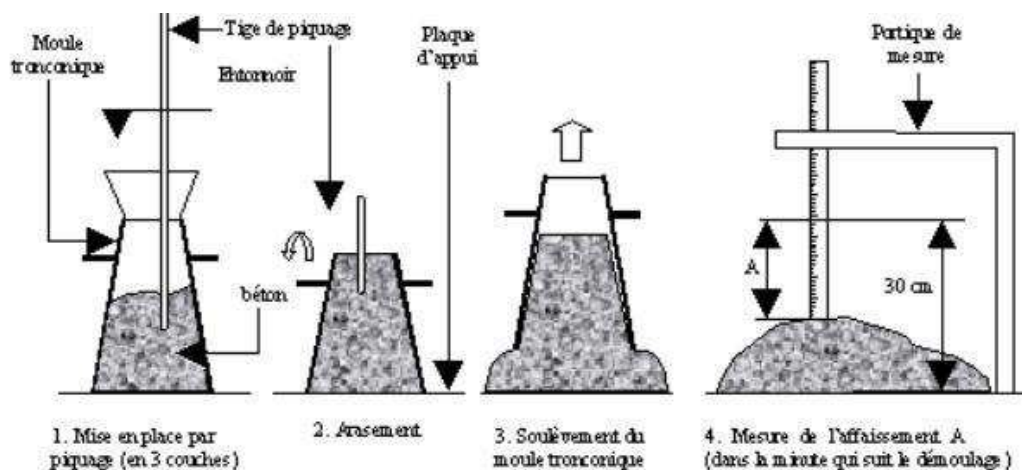


Figure (II.11) : le test d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams (NF P 18-451)

Tout d'abord le cône doit être légèrement huilé. On le remplira de béton, en trois couches, Chaque couche est piquée par 25 coups de façon répartie avec une tige de piquage. Le cône de béton est immédiatement démoulé. Le béton s'affaisse selon sa consistance, l'affaissement sera mesuré à l'aide d'une règle sur portique.

Tableau (II-22) : les classes de consistance suivant l'affaissement au cône d'Abrams

Typologie de béton	Ferme	Plastique	Très plastique	Fluide
La hauteur A (mm)	De 0 à 40	De 50 à 90	De 100 à 150	+ de 150
Classe de consistance	S1	S2	S3	S4

;



Figure (II-12) : le Cône d'Abrams.

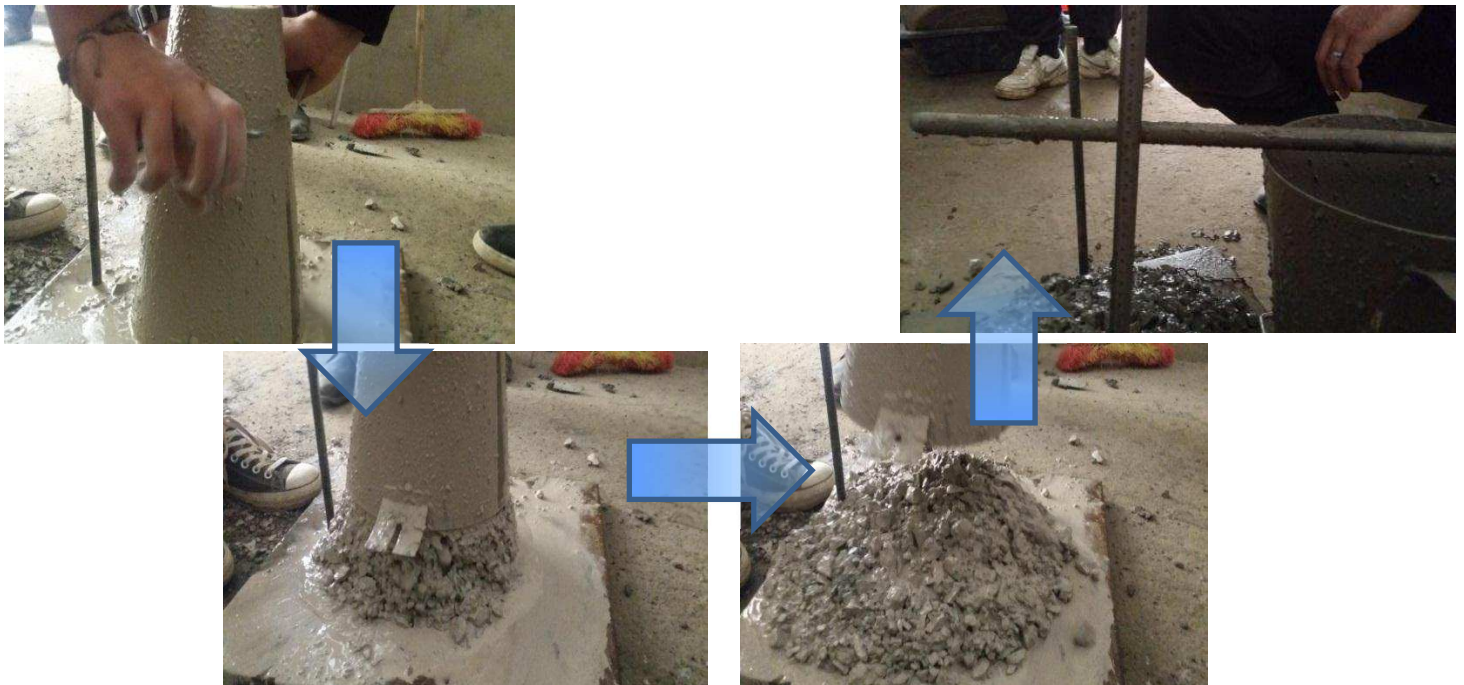


Figure (II-13) : Conduite de l'essai d'affaissement (NF P 18-451)

II.3.3.2-Béton à l'état durci**❖ Essais mécaniques**

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des bétons, dans notre projet on a réalisé deux essais mécaniques :

a) Résistance à la compression

Les éprouvettes cubiques étudiées (15x15x15cm) sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

L'essai se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage, il aura pour but de connaître la résistance des 4 formulations de béton à la compression.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$F_c = \frac{F}{A}$$

Ou :

F_c : est la résistance à la compression, exprimée en MégaPascals (N/mm) ;

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons ;

A : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, exprimée en millimètres carrés.



Figure (II-14) : essai de compression sur une éprouvette du béton BF

b) Résistance à la flexion (NF EN 12390-5) :

Des éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée et la résistance en flexion est calculée.

On place l'éprouvette d'essai (10x10x50cm) sur la machine, en vérifiant qu'elle est convenablement centrée, en respectant l'espacement entre les appuis inférieurs.

Pour notre cas l'espacement entre les appuis sera de 380mm, la charge appliquée sur notre éprouvette d'essai sera émise de l'appui supérieur.

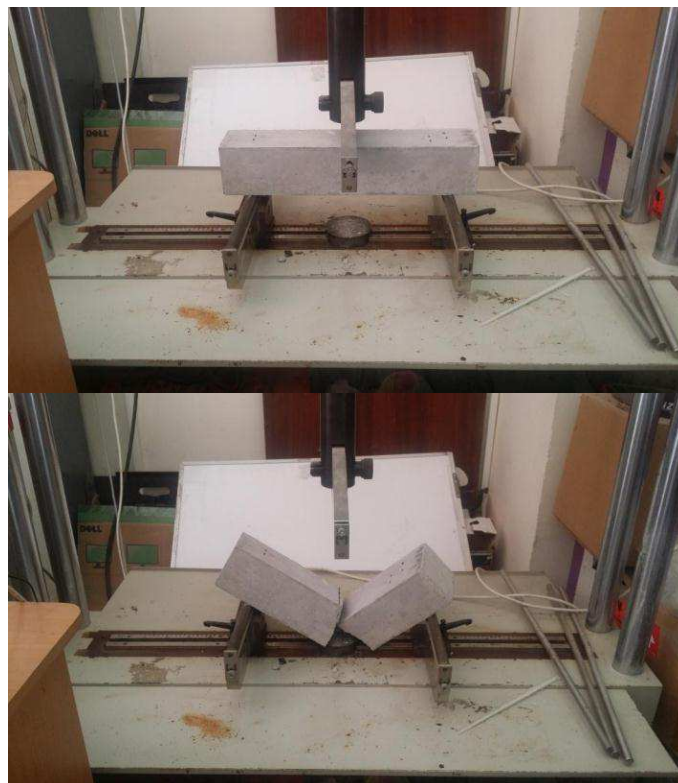
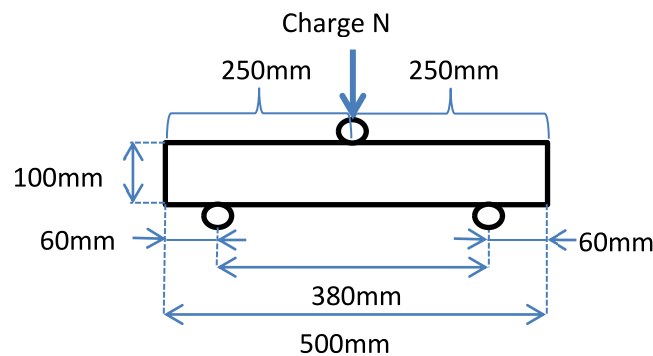


Figure (II-15) : essai de flexion

La résistance à la flexion est donnée par l'équation suivante :

$$R_f = \frac{3FL}{2b^2h}$$

Ou :

R_f : est la résistance à la flexion exprimée en MégaPascal ou en Newton/mm² ;

F : la charge maximale exprimée en Newton ;

L : écartement entre les appuis inférieurs (380mm) ;

b : épaisseur de l'éprouvette (100mm) ;

h : largeur de l'éprouvette (100mm).

❖ Essai Physique (Porosité accessible/Absorption d'eau)

Cet essai a pour but de calculer les pourcentages : de l'absorption d'eau du béton et des pores à la surface du béton. Il nous fournira des informations sur la compacité des 4 types de bétons tout en utilisant de simples moyens.

On prend un morceau de chaque béton après écrasement et on suit le mode opératoire suivant :

-Sécher les morceaux dans une étuve à 105°C pendant 24h, on obtiendra alors la masse sèche de chaque morceau après pesée(M_s).



Figure (II.16) : morceaux de bétons



Figure (II.17) : séchage des morceaux à l'étuve

-Ensuite on les immerge dans l'eau jusqu'à masse constante.

-On pèse la masse de ces morceaux à l'air(M_a), et on les pèse aussi immergés dans l'eau par la méthode de la pesée hydrostatique(M_a).



Figure (II.18) : Bâti pour pesée hydrostatique.

On calculera la porosité accessible par la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} * 100$$

Quant à l'absorption d'eau elle sera calculée par la formule suivante :

$$Abs(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_a} * 100$$

❖ Analyse minéralogique (diffractométrie à Rayons X : DRX):

La diffractométrie par rayon x est une méthode d'analyse d'éléments, elle étudie les processus diffusion, d'absorption et d'émission des rayons X.

L'échantillon à analyser est irradié par un faisceau de rayons x primaires. L'analyse des rayons x secondaires caractéristiques émis par l'échantillon renseigne sur la composition de ce dernier.

Pour effectuer une analyse de DRX, on procède de la manière suivante :

-Broyage des échantillons : Nous allons broyer 4 morceaux des 4 bétons étudiées : G, GF, B, BF ;

-Préparation des pastilles ;

-Analyse des pastilles par DRX.

Cette méthode fournit des spectres particulièrement simples, mais qui ne nous renseignent que sur la composition élémentaire.



Figure (II-19) : morceaux de béton de chaque formulation



Figure (II-20) : broyeur à boulets



Figure (II-21) : poudre de béton après broyage

❖ Essai de Durabilité du béton

Notre but principal étant d'améliorer la durabilité du béton de structure utilisé dans les ouvrages annexes dans le barrage en remblai de Béni Slimane, qui sera immergé dans l'eau et potentiellement exposé aux milieux agressifs, on a procédé aux essais suivants :

a) Profondeur de pénétration d'eau sous pression (NF EN 12390-8)

Cet essai a pour principe d'appliquer de l'eau sous pression sur la surface du béton durci, et après rupture de l'éprouvette par fendage on mesure la profondeur de pénétration de l'eau.

Comme mentionné auparavant 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.

L'essai était appliqué sur des éprouvettes cubiques, de chaque formulation, qui ont été conservés dans l'eau pendant 60 jours après leurs démoulage.

On va placer les éprouvettes dans le dispositif d'essai et appliquer une pression d'eau de (500 ± 50) kPa pendant (72 ± 2) h, ensuite on va fendre ses éprouvettes en deux, perpendiculairement à la face exposée à l'eau sous pression. Dès que la zone fendue est suffisamment sèche pour qu'il soit possible de discerner le front de pénétration de l'eau, on va mesurer la profondeur maximale de pénétration au millimètre près.



Figure (II-22) : Dispositif d'essai de l'essai de profondeur de pénétration d'eau sous pression

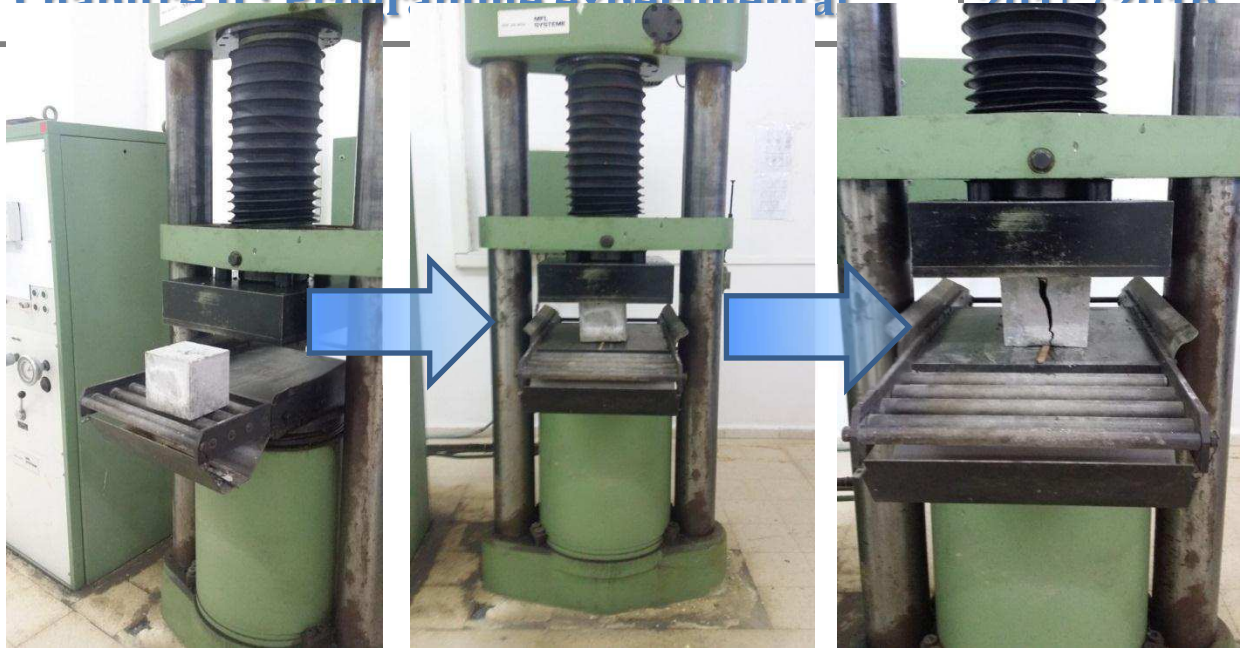


Figure (II-23) : Fendage de l'éprouvette après application d'une pression d'eau pendant 72h

b) Conservation dans les milieux agressifs

En raison du temps réduit qu'on avait pour la réalisation de notre projet et pour avoir des résultats concrets en un temps réduit, on a opté pour deux milieux différents, le premier est un milieu acide avec une concentration massique de 10% de HCl, et le deuxième est un milieu salin à 5% de NaCl.

On a découpé les éprouvettes prismatiques 10x10x50 cm qui ont suivi une cure de 28 Jours, en éprouvettes cubiques 10x10x10 cm, cela pour avoir des cubes de taille réduite et donc consommé moins de volume du milieu dans lesquelles les éprouvettes vont être conservées. Pour chaque formulation on aura besoin de 6 éprouvettes cubiques 10x10x10cm : 2 pour le milieu acide, 2 pour le milieu salin et 2 dans l'eau potable comme témoins.

Pour la préparation des milieux on a choisi des bassines pouvant contenir 5.5L de solution agressif avec des éprouvettes immergées dedans. Les éprouvettes en question seront totalement immergées pour garantir un contact maximal avec ces milieux.

La température de la salle, où les éprouvettes étaient conservés, était de $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$.



Figure (II-24) : Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs

➤ Attaque des acides (HCl)

–Préparation du milieu à 10% de HCl

On doit préparer 5.5L de milieu acide pour chaque formulation, donc 4 bassines au total contenant 2 éprouvettes chacune.

Les milieux à 10% de HCl ont été préparés dans les laboratoires de notre faculté par des personnes qualifiées et avec le matériel nécessaire (Hotte, Verrerie...). On a apporté une solution mère de concentration industrielle (37% de concentration massique) pour la diluer jusqu'à 10% de concentration massique.

Au Final on aura 4 bassines pour 4 formulations différentes : dans chacune d'elles y'a deux éprouvettes de la même formulation complètement immergées dans la solution à 10% de HCl



Figure (II-25) : L'acide chlorhydrique à 37% de concentration massique

–Calcul de perte de masse

Chaque 7J et ce depuis le moment de l'immersion on va peser les éprouvettes et calculer leurs perte de masse par rapport à la masse initial.

La pesée se fera les jours suivants: 1^{ier}j, 7^{ième}j, 14^{ième}j, 21^{ième}j et 28^{ième}j.

On calculera la perte de masse d'après l'équation suivante :

$$P_m(\%) = \frac{M_i - M_j}{M_i} \times 100$$

Ou :

Pm : la perte de masse en % ;

Mi : la masse initial ;

Mj : la masse pesée le jour-J (7, 14, 21 et 28).

–Mesure de pH

On a mesuré le pH du milieu acide à 10% de HCl à deux reprises : avant l'immersion des éprouvettes, et après 28j d'immersion, cela nous permettra de connaître les changements ionique ont étaient faits entre l'acide et la matrice.

–Essai de compression

On va faire subir aux échantillons plongés dans l'acide après 28j, un essai de compression (leurs formes légèrement modifiées par l'attaque acide, mais toujours apte pour cet essai) pour voir si l'acide a affecté leur caractéristique mécanique à la compression.

–Essai physique (Porosité accessible à l'eau/Absorption d'eau)

Le même essai qui a été fait auparavant, a été réalisé pour des morceaux des 4 bétons plongés dans l'acide

L'attaque des acides a modifié les propriétés physiques du béton, on veut connaître via cet essai l'ampleur de cette attaque sur les 4 types de bétons.

–DRX

On veut connaître la nouvelle composition minéralogique des bétons après immersion.

(Résultats présentés le jour de la soutenance vu le nombre élevé d'essais réalisés en une période trop restreinte, on n'a pas encore récupéré et interprété les données)

➤ Attaques des chlorures**Préparation du milieu à 5% de NaCl**

Ce milieu est à 5% de NaCl qui veut dire que y'a 5mg de NaCl dans 100ml d'eau donc pour 5.5L on aura :

$$\left. \begin{array}{l} 0.1L \longrightarrow 5mg \\ 5.5L \longrightarrow X \end{array} \right\} X = \frac{5.5 \times 5}{0.1} = 275mg$$

Donc pour chaque bassine on doit mettre 275mg de NaCl 100% pur dans 5.5L d'eau distillé.

2 éprouvettes de chaque formulation seront complètement immergées dans 4 bassines différentes.

–Préparation des éprouvettes

Nous allons sécher les huit (8) huit éprouvettes dédiées au milieu salin à l'étuve pour éliminer toute trace d'eau à la surface, ensuite nous allons imprégner 4 faces de chacune d'elle avec une résine époxy (fournit par Granitex elle est constituée de deux éléments A et B) qui créera une étanchéité à toute sorte de solution en contact avec la surface, les deux autres faces seront

en contact direct avec le milieu salin, cette méthode nous assurera une intrusion des ions chlores que de deux cotés parallèles.

Les éprouvettes préparées seront immergées dans le milieu salin pendant 60j.

–Calcul de la profondeur de pénétration des ions chlores

Pour connaître la profondeur de pénétration des ions chlores on a procédé au fendage des éprouvettes puis on a appliqué sur la surface interne du nitrate d'argent, de formule aqueuse



Figure (II-26) : application du nitrate d'argent (AgNO_3) sur les éprouvettes

($\text{Ag}^+_{(\text{aq})}$, $\text{NO}_3^-_{(\text{aq})}$) qui va identifier les ions chlorures Cl^- en formant un précipité blanc qui noircit à la lumière du jour.

La réaction se produisant est alors : $\text{Ag}^+_{(\text{aq})} + \text{Cl}^-_{(\text{aq})} \rightarrow \text{AgCl}_{(\text{s})}$

On calculera ensuite la distance coloré par une règle au millimètre près.

II.3.4-Lieu de réalisation des différents essais

Tableau (II-23): lieu de réalisation des différents essais

Essai réalisé	Lieu de réalisation
Préparation des constituants du béton	-Laboratoire de béton et granulats du chantier de Béni Slimane
Confection des éprouvettes	-Laboratoire de béton et granulats du chantier de Béni Slimane
Conservation des éprouvettes dans l'eau après démoulage	-Laboratoire de béton et granulats du chantier de Béni Slimane
Essai sur béton frais (Affaissement, Température...)	-Laboratoire de béton et granulats du chantier de Béni Slimane
Essai de compression	- Laboratoire de béton et granulats du chantier de Béni Slimane -Unité de recherche de la FSI
Essai de flexion	-Unité de recherche de la FSI -C.E.T.I.M*
Préparation des milieux agressifs	-Un laboratoire à la FSI
Imprégnation des éprouvettes cubiques avec la résine Epoxy pour le milieu salin	-Un laboratoire à la FSI
Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs	-Un laboratoire à la FSI
Essai profondeur de pénétration d'eau sous pression	-C.E.T.I.M*
Essai de Porosité/Absorption	-C.E.T.I.M*
Broyage des échantillons pour le test de DRX	-C.E.T.I.M*
DRX	-Unité de recherche de la FSI -C.E.T.I.M*

* : Centre d'étude et de services Technologiques de l'industrie des Matériaux de construction – Boumerdes.

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats et l'analyse des différents essais effectués durant notre stage sur des bétons confectionnés sous les mêmes conditions mais en modifiant la nature du ciment et en incorporant la fumée de silice tout en fixant tous les autres constituants (Granulats, eau, adjuvant...)

Rappel des notations :

G : Béton avec comme liant le CHF-CEM III/A (MOUKAOUEM) (Béton Témoin)

GF : Béton avec comme liant 90% CHF-CEM III/A et 10% de Fumée de silice.

B : Béton avec comme liant le Ciment Blanc (MALAKI)

BF : Béton avec comme liant 90% Ciment Blanc et 10% de Fumée de silice.

III.1-Béton à l'état frais :

Les résultats obtenus pour les quatre types de béton sont comme suit :

Tableau (III-1) : les résultats des essais pour les bétons à l'état frais

Type de béton	Affaissement (mm)	Classe de consistance	Température (C°)			Masse volumique (Kg/m ³)
			T° Salle	T° Béton	Diff. de T°	
G	185	S4 (Fluide)	15,5	20,1	4.6	2395
GF	165	S4 (Fluide)	16,8	19,4	2.6	2409
B	200	S4 (Fluide)	17,1	22,6	5,5	2429
BF	175	S4 (Fluide)	18,3	21,3	3	2440

La figure (III-1) illustre l'affaissement des différents types de béton à l'état frais:

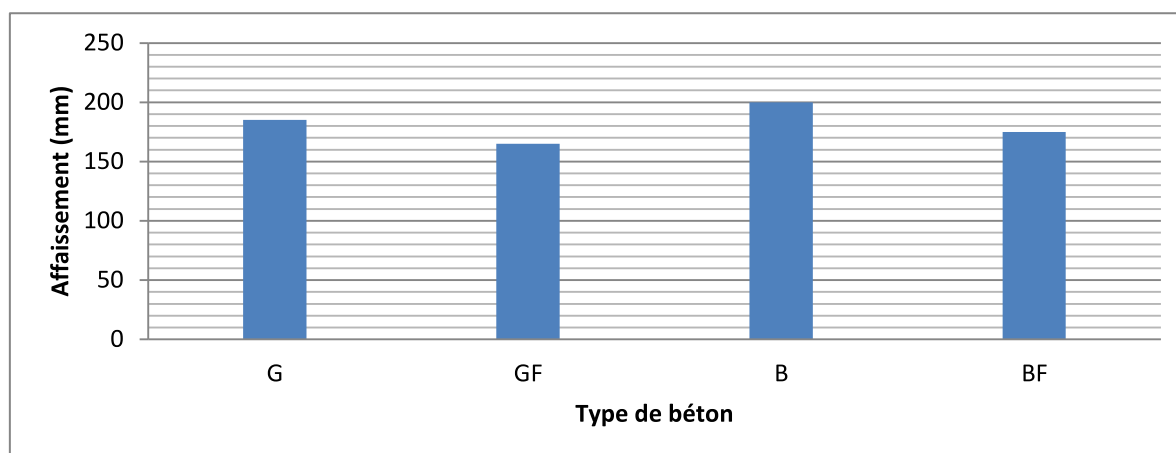


Figure (III-1) : L'affaissement des différents types de béton

La figure (III-2) illustre la différence de température entre le béton et la salle d'essai types de bétons à l'état frais:

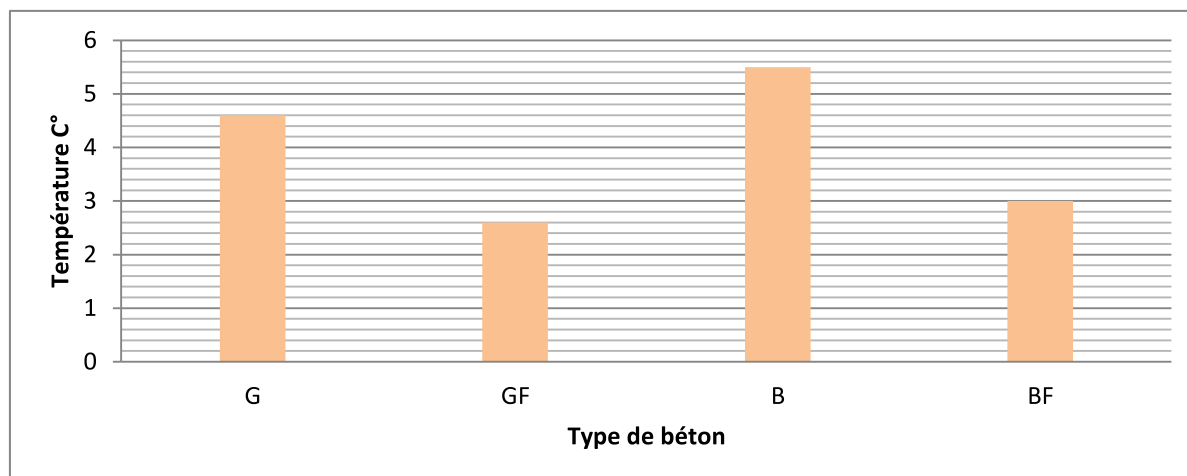


Figure (II-2) : La différence de T° des différents types de béton

La figure (III-3) illustre la masse volumique des différents types de béton à l'état frais:

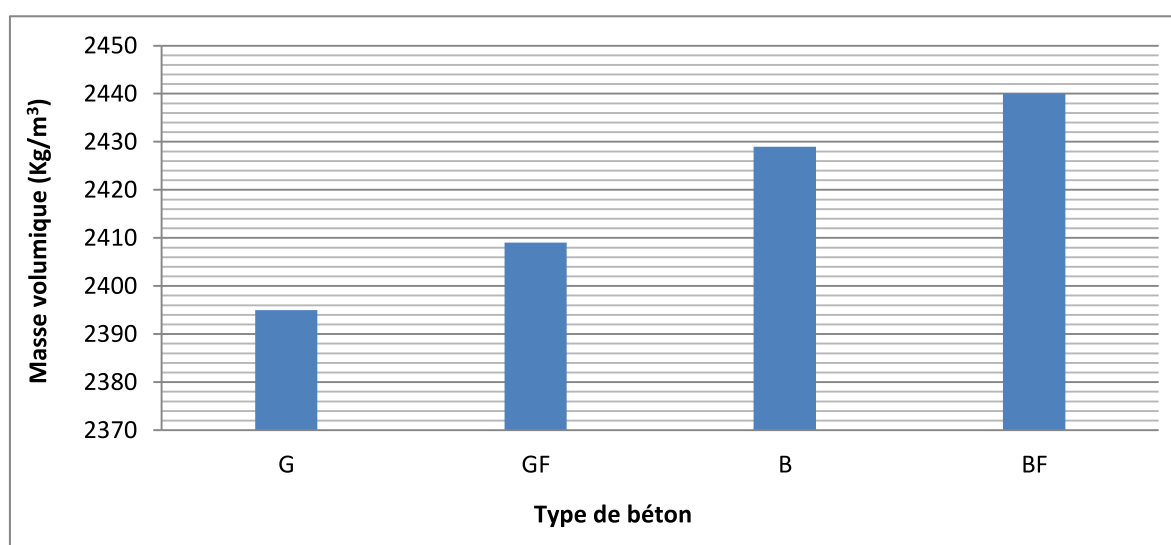


Figure (III-3) : La masse volumique des différents types de béton

➤ Interprétations des résultats

On peut dire que l'affaissement obtenu est fluide pour les quatre (4) types de béton à l'état frais.

Le béton à base de ciment blanc (B) a présenté un affaissement plus élevé que le béton à base de ciment CHF-CEMIII/A (G) cela peut être expliqué par la finesse du ciment blanc ($4300-5200\text{cm}^2/\text{gr}$) qui est nettement plus grande que celle du CHF-CEMIII/A ($3500-4300\text{cm}^2/\text{gr}$) ce qui confère au béton à base de ciment blanc une fluidité garantie, et une plus grande surface de contact avec l'eau et l'adjuvant.

Par contre l'ajout de la fumée de silice dans les bétons (GF et BF) a réduit la fluidité par rapport aux bétons sans ajouts substitutionnels (B et G), cela est dû au fait que la fumée de silice a un besoin d'eau beaucoup plus important que les ciments utilisés, ce qui confirme les conseils d'utilisation des producteurs et qui est d'augmenter la quantité d'adjuvant au cours du malaxage (Voir annexe – Fiche technique Condensil S95 DP)

Malgré cette maigre diminution les quatre bétons ont un affaissement très performant pour la conception de l'ouvrage souhaité.

Pour la chaleur dégagée (diff. de température) on remarque une légère différence entre les bétons B et G, en effet la teneur en C_3A dans le ciment blanc (8-10%) est supérieure à celle dans le CHF-CEMIII/A (6-8%) en sachant que le C_3A est la phase responsable du dégagement de chaleur lors de l'hydratation.

En substituant 10% du ciment par 10% de fumée de silice dans les deux types de béton on a réduit la chaleur dégagée, chose logique vu la réduction de la quantité de C_3A dans la partie liante.

La masse volumique pour les 4 formulations est dans les normes ($2395-2440\text{kg/m}^3$), puisque sa valeur pour les quatre bétons est assez proche de la valeur de la masse volumique théorique (2429kg/m^3) ce qui convient de dire que la formulation utilisée est optimale pour la

III.2-Béton à l'état durci**III.2.1-Essai mécaniques****III.2.1.1-Essai de compression**

Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'essai de compression à 28j obtenus pour les 4 types de béton pour des éprouvettes cubiques 15x15x15cm³ :

Tableau (III-2) : résultat des essais de compression

Type de béton	Masse (Kg)	Charge appliquée (KN)	Résistance à la compression (MPa)	Moy. Résistance à la compression (MPa)
G	G ₁	8,080	950,1	42.22
	G ₂	8,110	981,6	43.62
	G ₃	8,200	975,2	43.34
GF	GF ₁	8,295	1066,5	47.38
	GF ₂	8,165	1093,27	48.59
	GF ₃	8,230	1199,6	53.32
B	B ₁	8,195	1353,7	60,16
	B ₂	8,165	1230,5	54,68
	B ₃	8,290	1175,95	52,26
BF	BF ₁	8,350	1371	60,93
	BF ₂	8,215	1208,7	53,72
	BF ₃	8,310	1573,7	69,94

Remarque: durant l'écrasement des éprouvettes BF₁ BF₃ et B₁, on a remarqué que leurs comportements était similaire à celui d'un BHP (béton à hautes performances); une explosion a retentit au moment de leurs ruptures, en d'autres termes : il a une rupture fragile (voir Figure (III-4))



Figure (III-4) : Mode de rupture : explosion instantanée de l'éprouvette B₁ durant l'écrasement

La figure (III-5) illustre la résistance à la compression au bout de 28j pour les 4 types de béton:

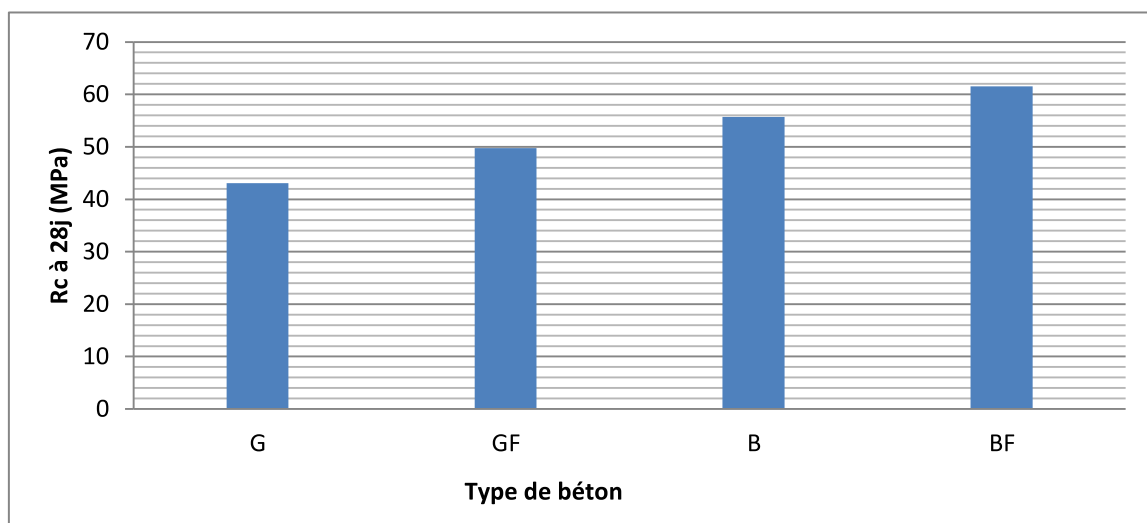


Figure (III-5) : résultat des essais de compression pour les 4 types de béton

III.2.1.2 -Essai de flexion

Le tableau suivant présente les résultats de l'essai de flexion à 28j obtenus pour les 4 types de béton pour des éprouvettes cubiques 10x10x50cm³ :

Tableau (III-3) : résultat des essais de flexion

Type de béton		Masse (Kg)	Charge appliquée (KN)	Résistance à la flexion (MPa)	Moy. Résistance à la flexion (MPa)
G	G ₁	12,230	8,310	4,73	4,6
	G ₂	12,150	7,330	4,17	
	G ₃	12,190	8,480	4,83	
GF	GF ₁	12,235	8,920	5,08	5,2
	GF ₂	12,320	9,920	5,65	
	GF ₃	12,300	8,430	4,80	
B	B ₁	12,265	10,010	5,70	5,7
	B ₂	12,350	9,870	5,62	
	B ₃	/	/	/	
BF	BF ₁	12,470	10,170	5,79	6,1
	BF ₂	12,510	11,070	6,30	
	BF ₃	12,450	10,870	6,19	

La figure (III-6) illustre la résistance à la flexion au bout de 28j pour les 4 types de béton:

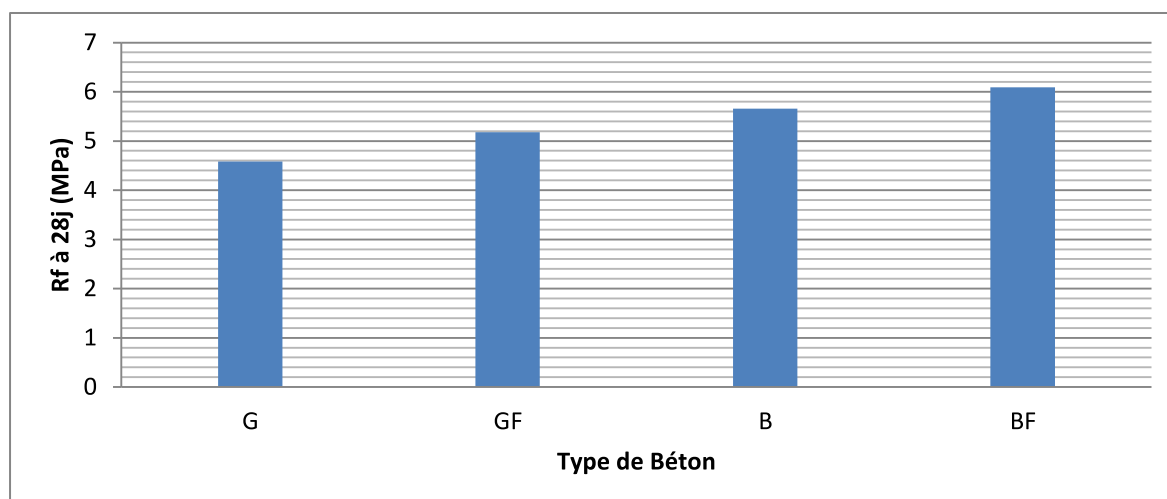


Figure (III-6) : résultat des essais de flexion pour les 4 types de béton

➤ Interprétations des résultats

En comparant les résultats des essais de compression et de flexion, on distingue une certaine relation proportionnelle entre ces deux paramètres mécaniques.

Le béton B a présenté une résistance mécanique plus élevée de **23%** à la compression et de **19%** à la flexion par rapport au béton G, cette différence est liée à la classe de résistance des ciments utilisés (52,5 pour le ciment blanc et 42,5 pour le CHF-CEMII/A) et aux propriétés physico-mécaniques du ciment blanc qui sont nettement plus optimisés que celles du ciment CHF-CEMIII/A.

Quant aux bétons avec 10% fumée de silice on a noté une augmentation :

- A la résistance à la compression de : **10%** pour les bétons B et BF, **14%** pour les bétons G et GF.
- A la résistance à la flexion de : **7 %** pour les bétons B et BF, **12%** pour les bétons G et GF.

L'activité physico-chimique de la fumée de silice est un atout majeur qui contribue à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons, sa réaction pouzzolanique transforme la portlandite en de nouvelles C-S-H, le principal hydrate responsable de la résistance mécanique. Mais aussi sa finesse très élevée ($23000\text{cm}^3/\text{gr}$) a augmenté la compacité du béton en affinant ses pores.

Si la classe des résistances à la compression des BHP est de 60MPa, alors on peut dire que l'amélioration apportée au projet a converti le béton témoin (G) ordinaire en un béton BF à hautes performances (BHP) avec une amélioration de 30% au bout de 28j.

III.2.2-Essai Physique (Porosité accessible à l'eau/Absorption)

Le tableau (III-4) présente les pesées des masses pour le calcul de la porosité et de l'absorption d'eau :

Tableau (III-4) : les masses mesurées (en gr) pour le calcul de la porosité accessible et de l'absorption

Type de béton	Masse initial	Masse sèche	Masse imbibé à l'air	Masse imbibé dans l'eau
G	26,6	25,6	27,9	15,7
GF	207,1	196,2	212,6	121
B	128,6	123	133,2	76
BF	61	58,8	63	36,6

Après calculs on a obtenus les résultats suivants :

Tableau (III-5) : pourcentages de porosité et d'absorption d'eau pour les 4 formulations

Type de béton	Porosité (%)	Absorption (%)
G	18,85	8,98
GF	17,90	8,35
B	17,83	8,29
BF	15,73	7,14

La figure (III-7) illustre le pourcentage de la porosité accessible à l'eau pour les 4 types de béton :

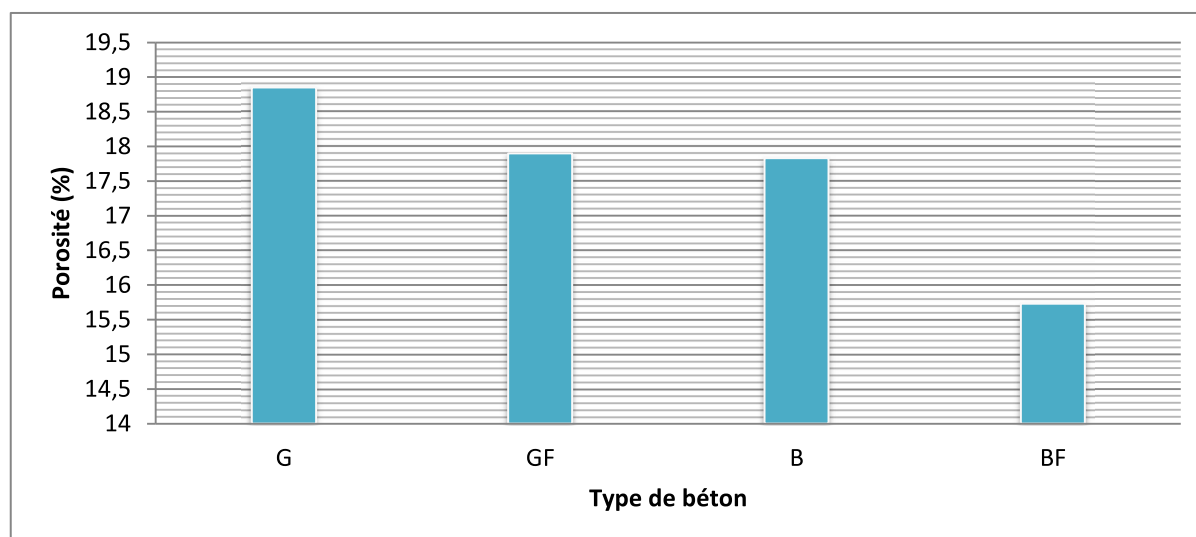


Figure (III-7) : Pourcentage de la porosité accessible à l'eau pour les 4 bétons

La figure (III-7) illustre le pourcentage d'absorption d'eau pour les 4 types de béton :

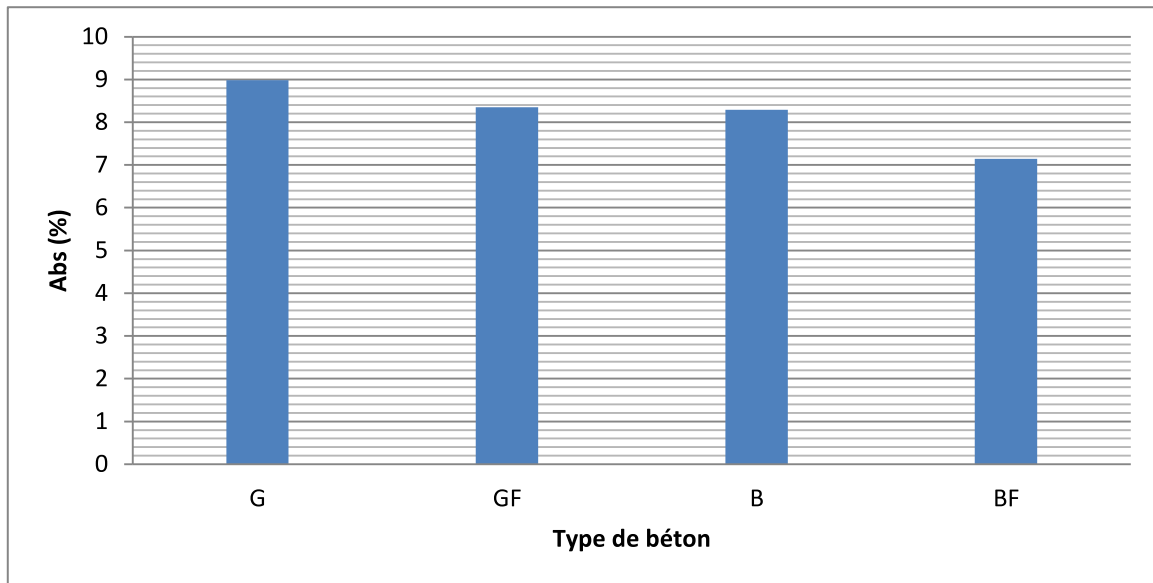


Figure (III-8) : Pourcentage d'absorption d'eau pour les 4 bétons

➤ Interprétations des résultats

L'analyse des figures (III-7) et (III-8) démontre que le béton B est bien plus compacte que le béton G avec des pourcentages d'absorption d'eau et de porosité accessible bien réduite, ce qui démontre la supériorité des propriétés physiques du ciment blanc à ceux du ciment CHF-CEMIII/A (module de finesse du ciment blanc bien élevé).

L'ajout de la fumée de silice a considérablement amélioré ces propriétés physiques par rapport aux bétons G et B. La taille des particules de celle-ci étant très petite, elle optimise le squelette granulaire tout en remplissant les interstices entre les particules de ciment, ce qui réduit amplement le pourcentage des pores ouvertes et améliore la compacité.

Cet essai confirme la supériorité des propriétés physico-mécaniques du béton B à celles du béton G, des propriétés qui seront davantage améliorées avec l'ajout de 10% de fumée de silice par substitution du ciment utilisé.

III.2.3-Analyse minéralogique (diffractométrie à Rayons X : DRX)

III.2.3.1-DRX du Béton G

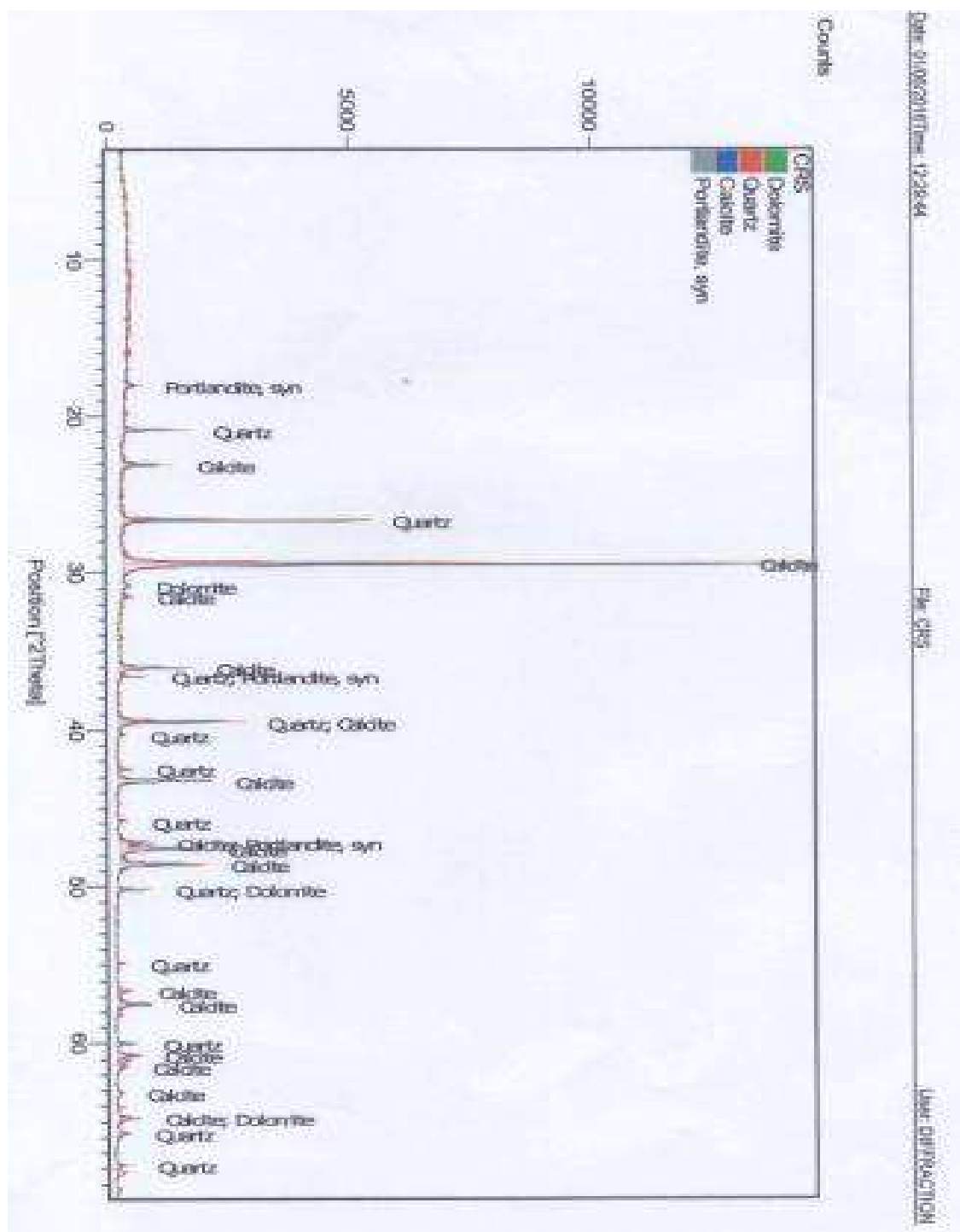


Figure (III-9) : Diffraction par rayons X du béton G

III.2.3.2-DRX du béton GF

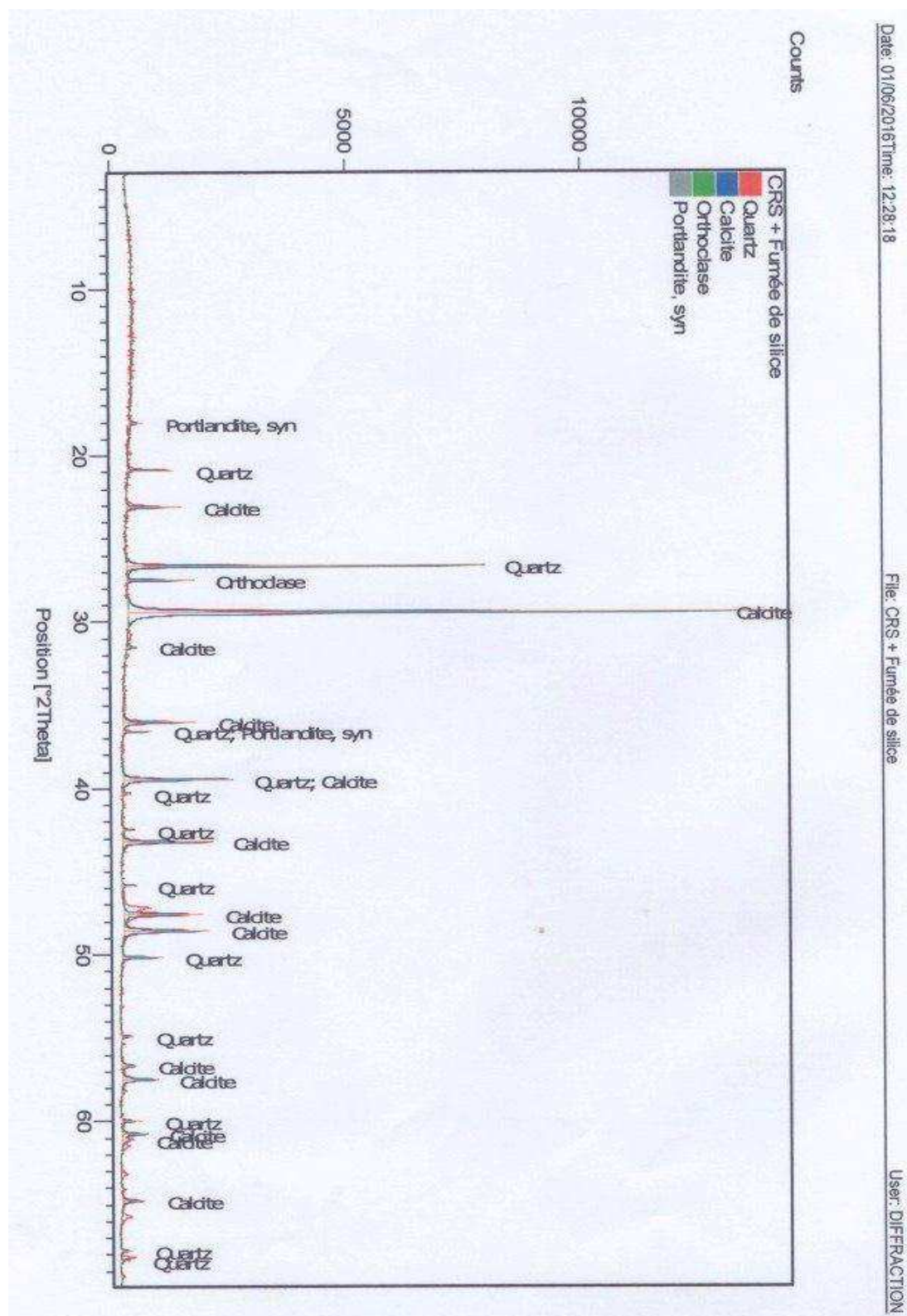


Figure (III-10) : Diffraction par rayons X du béton GF

III.2.3.3-DRX du béton B

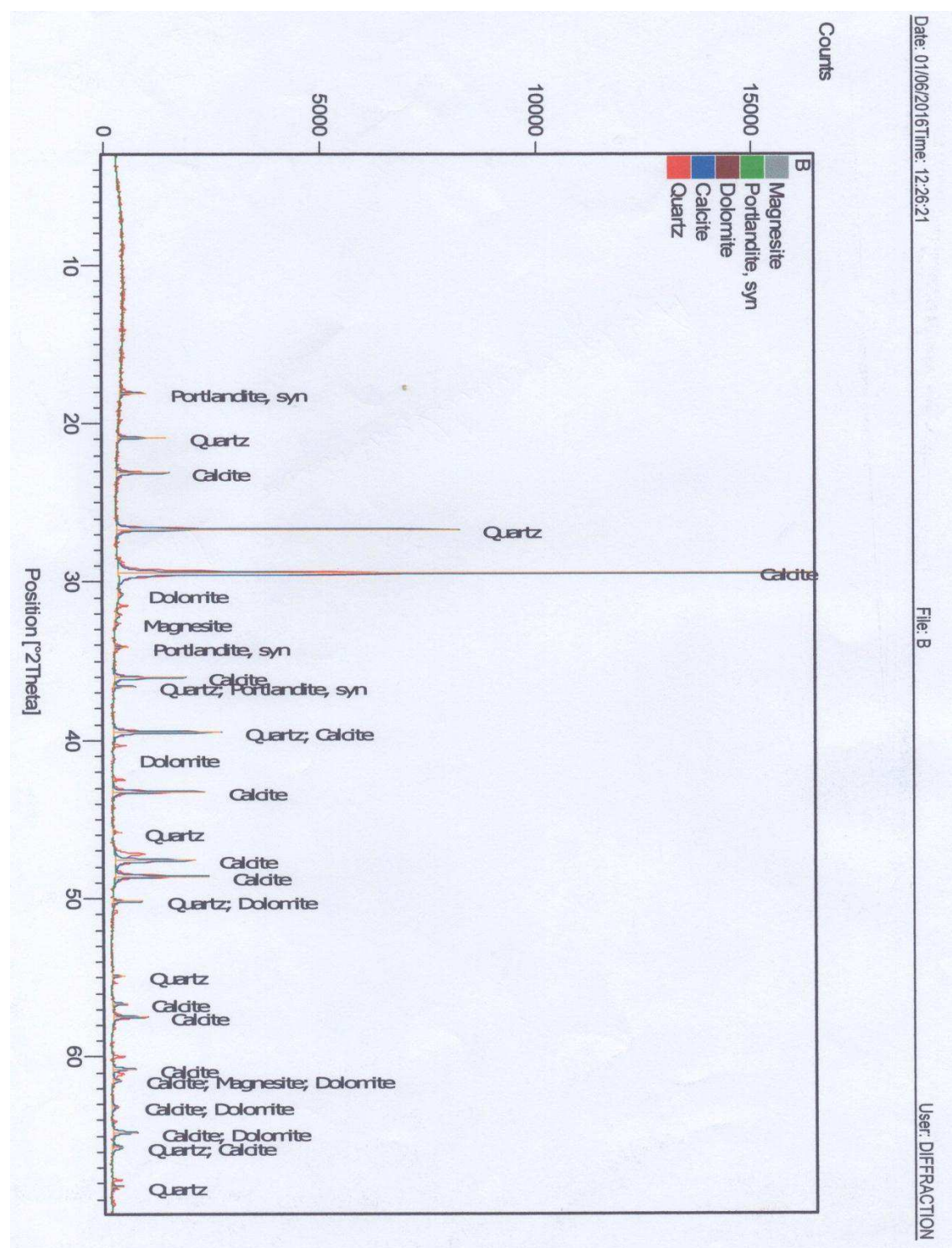


Figure (III-11) : Diffraction par rayons X du béton B

III.2.3.4-DRX du béton BF

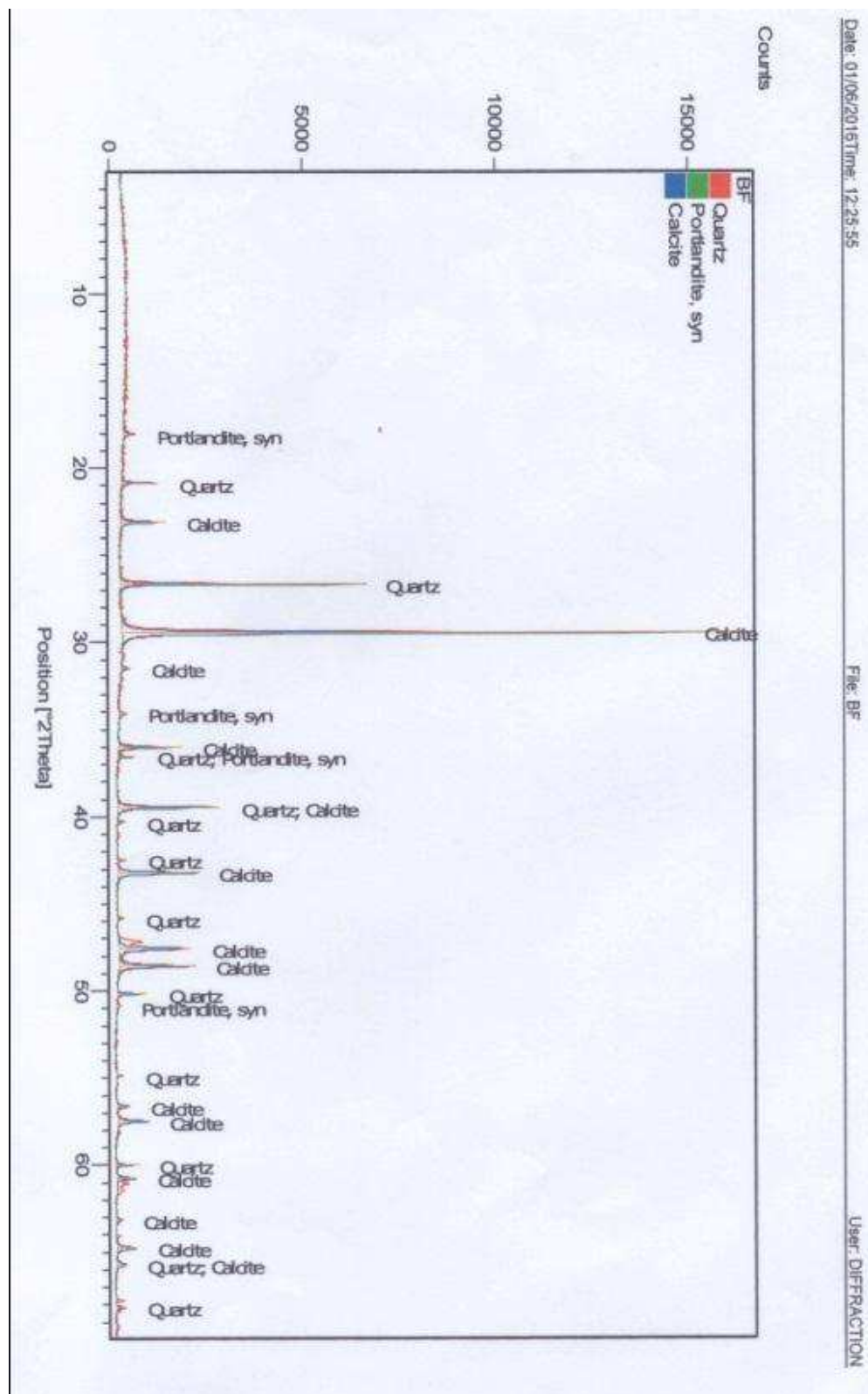


Figure (II-12) : Diffraction par rayons X du béton BF

➤ **Interprétations des DRX**

Tableau représentant la composition chimique des minéraux analysés par DRX

Tableau (III-6) : Minéraux détectés par les DRX des quatre bétons

Minéraux	Composition chimique	Intensité			
		G	GF	B	BF
Calcite	CaCO_3	+++	+++	+++	+++
Quartz	SiO_2	+++	+++	+++	+++
Portlandite	Ca(OH)_2	++		++	+
Dolomite	$\text{CaMg(CO}_3)_2$	+	-	+	-
Orthoclase	KAlSi_3O_8	-	+	-	-
Magnesite	MgCO_3	-	-	traces	-

+++ : Intensité forte, ++ : Intensité moyenne, + : Intensité faible

Etant donné la complexité des données reçus par ces diagrammes (non-détection des hydrates du ciment par ce DRX), nous poussons à plus s'intéresser au minéral le plus soluble du béton : la portlandite.

Les autres minéraux détectés peuvent provenir : soit des différents granulats du béton (sable et gravier) tout en caractérisant leurs origines, soit des particules anhydres du ciment.

Dans le diagramme du béton B on remarque une quantité assez importante de portlandite par rapport au béton G, cela est dû à la quantité importante de clinker (C_3S et C_2S) qu'a le ciment blanc en sa composition par rapport au ciment CHF-CEMIII/A, seul responsable de la formation de la portlandite lors de l'hydratation.

On peut dire aussi que la fumée de silice a déjà consommée une partie de la portlandite et cela en un court délai de 28j, cette réaction pouzzolanique peut être interpréter en comparant l'intensité et le nombre de pics de la portlandite du DRX de G et GF, et de B et BF.

La rapidité de réaction de la fumée de silice comme ajout a été confirmée, c'est d'ailleurs l'un des premiers critères de choix sur quoi nous nous sommes basés pour la réalisation de notre projet.

III.2.4-Essai de Durabilité du béton**III.2.4.1-Profondeur de pénétration d'eau sous pression**

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la profondeur de pénétration d'eau mis sous pression pendant une durée de 72h, et après fendage des éprouvettes cubiques 15x15x15cm, on a obtenus les résultats suivant pour les 4 types de béton:

Tableau (III-7) : la profondeur d'eau sous pression pour les 4 formulations

Type de béton		Profondeur de pénétration d'eau (mm)	Moy. profondeur de pénétration d'eau (mm)
G	G ₁	40	34.66
	G ₂	36	
	G ₃	28	
GF	GF ₁	14	10.33
	GF ₂	7	
	GF ₃	10	
B	B ₁	31	25.66
	B ₂	25	
	B ₃	21	
BF	BF ₁	9	8.66
	BF ₂	11	
	BF ₃	6	

Les figures (III-37) et (III-38) illustrent la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour les 4 types de béton :

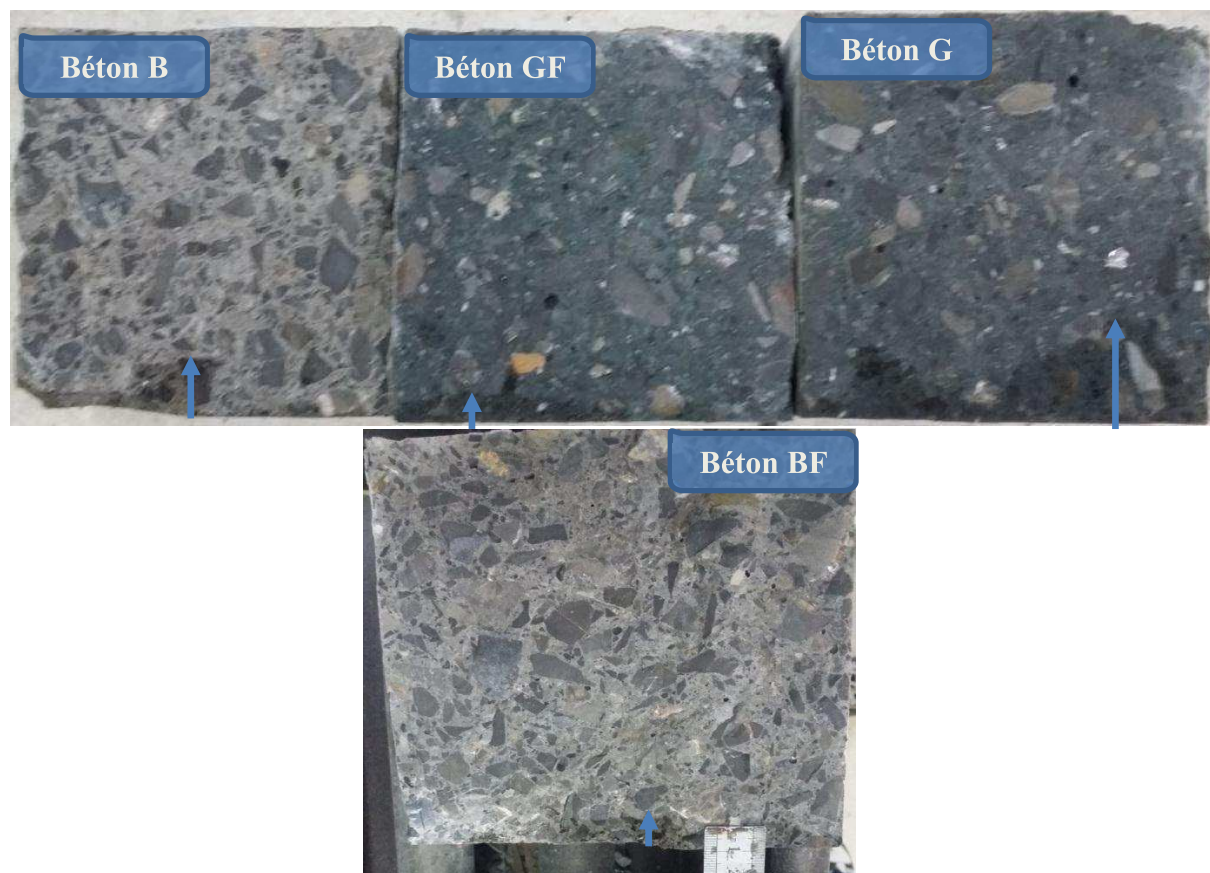


Figure (III-13) : la profondeur d'eau sous pression pour les quatre formulations

→ Profondeur de pénétration d'eau

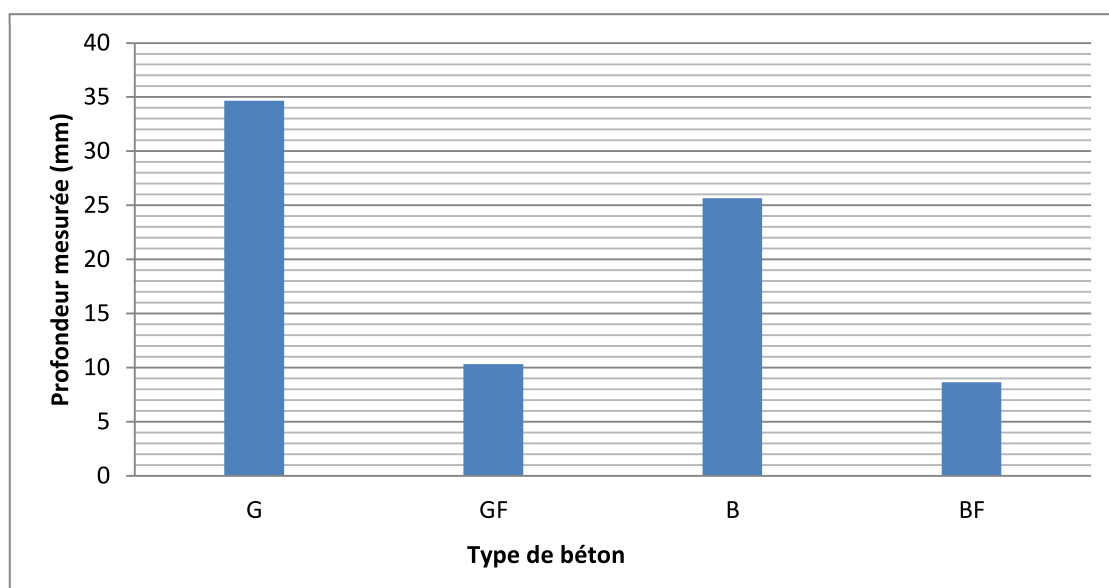


Figure (III-14) : Résultats de la profondeur d'eau sous pression pour les quatre formulations

➤ **Interprétations des résultats**

Les résultats obtenus de cet essai ont une relation directe avec le pourcentage de porosité du béton, plus le béton est compact et moins poreux et plus il est imperméable à l'eau.

De ce fait le béton BF présente des résultats bien plus optimaux, avec une réduction de 75% de la perméabilité à l'eau du béton G (témoin).

L'ajout de la fumée de silice a nettement amélioré la microstructure du béton en réduisant la perméabilité à l'eau de 67% (comparaison entre béton B et béton BF),

La réduction de la perméabilité à l'eau est l'un des paramètres les plus importants qui définissent la durabilité du béton vis-à-vis les milieux agressifs, vu de cet angle le béton B est bien plus durable que le béton G (réduction de la perméabilité de 26%) mais l'ajout de la fumée de silice a triplé ces performances, cette amélioration s'est faite en deux niveaux :

-Niveau physique : raffinement des pores et de leurs interconnexions en améliorant la structure granulaire (paramètre confirmé dans la partie **III.2.2-Essai physique**)

-Niveau chimique : un arrangement de la microstructure, en consommant de la portlandite pour produire les C-S-H.

III.2.4.2-Attaque des acides

a) Calcul de perte de masse

Le tableau suivant présente les résultats obtenus les pertes de masse des quatre bétons au cours des 28j d'immersion dans 10% de HCl.

Le tableau (III-8) : les résultats des pertes de masse

	Mass e initial M_0 (gr)	Après 7j			Après 14j			Après 21j			Après 28j		
		M_1 (gr)	Perte M (%)	Moy*	M_2 (gr)	Perte M (%)	Moy*	M_3 (gr)	Perte M (%)	Moy*	M_4 (gr)	Perte M (%)	Moy*
GF	$GF_1 = 2344$	2178	7,08	7,46	2175	7,20	7,56	2171	7,38	7,72	2169	7,46	7,78
	$GF_2 = 2393$	2205	7,85		2203	7,93		2200	8,06		2199	8,10	
G	$G_1 = 2449$	2302	6,00	5,94	2236	8,69	8,19	2232	8,86	8,31	2231	8,90	8,4
	$G_2 = 2378$	2238	5,88		2195	7,69		2193	7,77		2190	7,90	
BF	$BF_1 = 2463$	2333	5,27	5,53	2317	5,92	6,3	2314	6,04	6,4	2313	6,09	6,46
	$BF_2 = 2484$	2340	5,79		2318	6,68		2316	6,76		2314	6,84	
B	$B_1 = 2556$	2415	5,51	5,37	2400	6,10	6,07	2396	6,25	6,23	2395	6,29	6,27
	$B_2 = 2427$	2300	5,23		2280	6,05		2276	6,22		2275	6,26	

* : Moyenne des pertes de masse.

La figure (III-15) illustre les moyennes de pertes de masse pour les 4 types de béton :

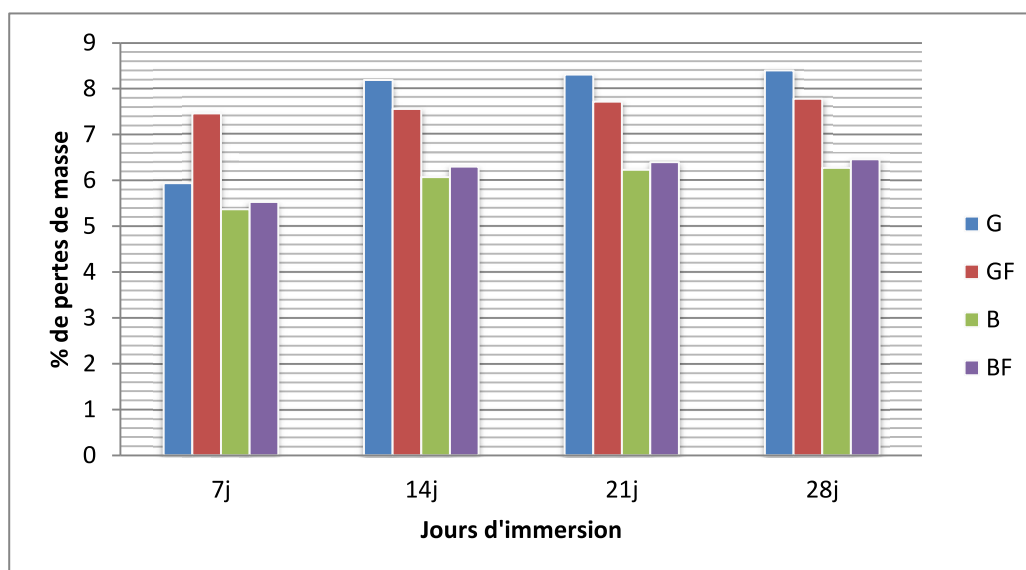


Figure (III-15) : les pertes de masse des quatre types de béton pendant 28j

➤ Interprétations des résultats

Les pertes de masse pour les 8 éprouvettes immergées dans la solution fortement acide étaient presque similaires : 6,09%-8,90%, la solution à 10% de HCl a directement attaqué les bétons au moment de l'immersion.

Le béton B a été le moins affecté par ces pertes puisqu'il n'a perdu que 6,09% de sa masse initial par rapport aux autres bétons notamment le béton G qui a perdu 8,4% de sa masse initial.

L'ajout de la fumée de silice au béton n'a changé en rien le paramètre de la perte de masse, même si elle se combine avec le minéral le plus fragile à ces attaques : la portlandite.

Cette perte de masse est accompagnée d'une perte d'alcalinité du béton, on présume que des échanges ioniques entre la portlandite et le HCl ont été faites pour la précipitation d'un sel très soluble très agressif au béton, c'est le chlorure de calcium.

b) Test de pH pour le milieu

On a calculé le pH pour le milieu acide à deux reprises : le premier jour avant immersion et le 28^{ième} jour après immersion, les données du test de pH sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (III-9) : les pH des milieux acides

Type de béton	pH avant immersion	pH après 28jours d'immersion
G	0,20*	5,11
GF	0,20*	4,93
B	0,20*	7,45
BF	0,20*	6,72

* : pH trop acide vu l'utilisation d'un acide fort.

La figure (III-16) illustre les moyennes de pertes de masse pour les 4 types de béton :

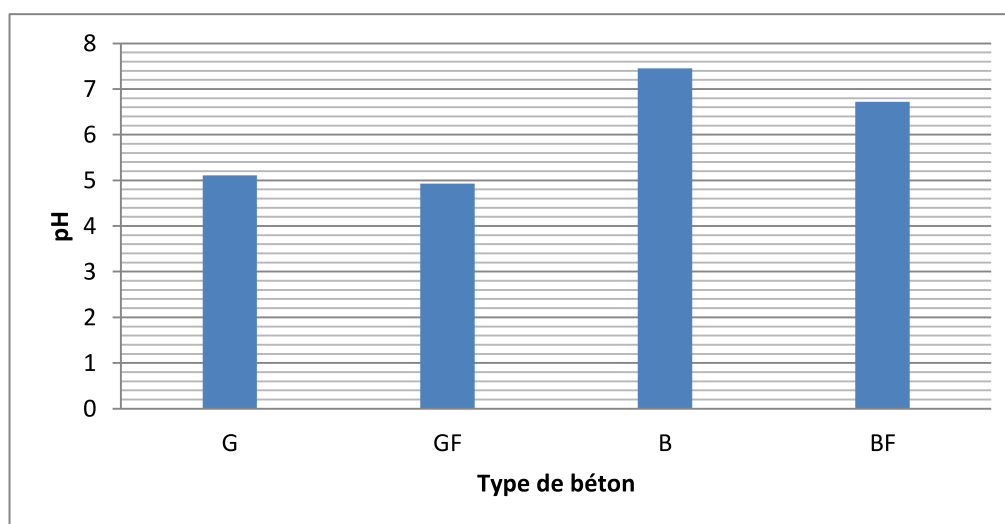


Figure (III-16) : le pH du milieu après 28j



Figure (III-17) : le pH du milieu à 10% de HCl



Figure (III-18) : Mesure de pH du milieu acide pour les différents bétons après 28 jours d'immersion

➤ Interprétations des résultats :

Le pH mesuré des différents milieux nous donnera une idée sur l'échange chimique au cours de l'immersion.

En effet la portlandite principale fournisseur d'alcalinité du béton, elle se dissout sous l'attaque des acides en formant un sel en contact avec l'acide en question, on conclue alors que plus le pH du milieu est élevé et plus la quantité du portlandite dans le béton était grande avant contact avec l'acide.

Le milieu ou le béton B a été conservé présente le pH le plus élevé par rapport à celui ou le béton G a été conservé, on peut dire que le clinker présent dans le ciment blanc est en plus grandes proportions que dans le CHF-CEMIII/A, plus de clinker veut dire plus d'Alite et de bélite donc plus de portlandite, de ce fait y'a une plus grande quantité de portlandite présente dans les bétons B, qui a réagi avec le milieu acide pour équilibré le pH, que dans les bétons G. En revanche la mesure du pH du milieu ou les éprouvettes avec fumée de silice (BF et GF) ont été conservés présentent des pH plus acides par rapport aux bétons sans ajouts, ces résultats démontrent la réaction pouzzolanique de la fumée de silice avec la portlandite.

Au final on dira que, plus le pH du milieu acide après 28 J d'immersion des bétons est faible plus les bétons en question présentent des quantités en portlandite, avant l'immersion, faibles aussi. (Informations confirmés par le DRX des bétons)

c) Essai de compression :

Après 28j d'immersion dans le milieu acide, on a testé les éprouvettes mécaniquement, les résultats sont exprimés dans le tableau suivant :

Tableau (III-10) : les résistances mécaniques à la compression après 28j d'immersion dans le HCl

Type de béton	Charge appliquée (KN)	Résistance à la compression (MPa)
G	363,48	36,34
GF	421,42	42,14
B	436,97	43,69
BF	512,14	51,21

La figure (III-19) illustre les résistances à la compression pour les 4 types de béton :

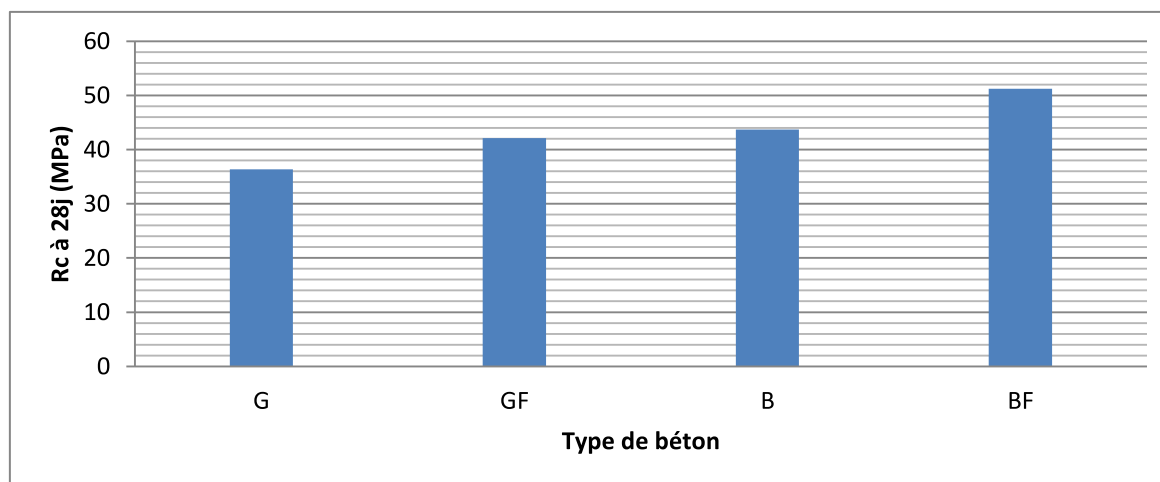


Figure (III-19) : les résistances mécaniques à la compression des différents types de béton après 28j d'immersion dans le HCl

➤ Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus on note que la résistance à la compression a chuté pour les 4 bétons.

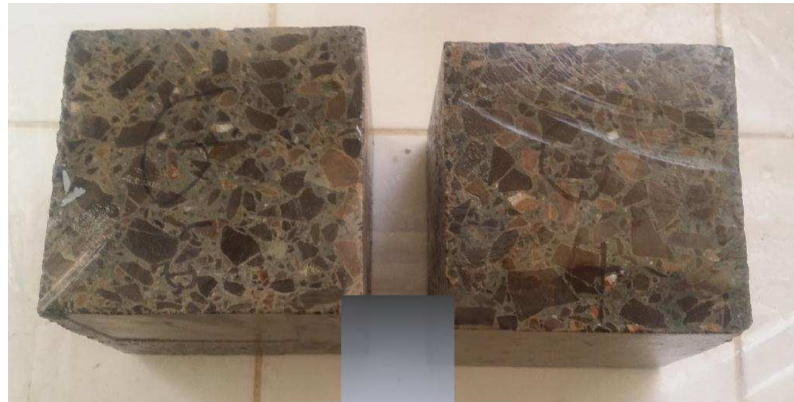
Le béton BF s'est révélé être toujours le plus performant sous compression par rapport aux autres bétons.

La formation des nouveaux hydrates (C-S-H) par réactions pouzzolaniques de la fumée de silice avec la portlandite, aide le béton à garder en grande partie ses caractéristiques mécaniques, même après 28 jours d'immersion dans la solution acide.

d) Analyse macroscopique des éprouvettes :

Béton G :

Jour 1



Après 7j



Après 28j



Figure (III-20) : l'état des éprouvettes du béton G à 1, 7 et 28 jours d'immersion en milieu fortement acide

Béton GF :

Jour 1



Après 7j



Après 28j



Figure (III-21) : l'état des éprouvettes du béton GF à 1, 7 et 28 jours d'immersion en milieu fortement acide

Béton B :

Jour 1



Après 7j



Après 28j



Figure (III-22) : l'état des éprouvettes du béton B à 1, 7 et 28 jours d'immersion en milieu fortement acide

Béton BF :

Jour 1



Après 7j



Après 28j



Figure (III-23) : l'état des éprouvettes du béton BF à 1, 7 et 28 jours d'immersion en milieu fortement acide

Après séchage :

Béton G

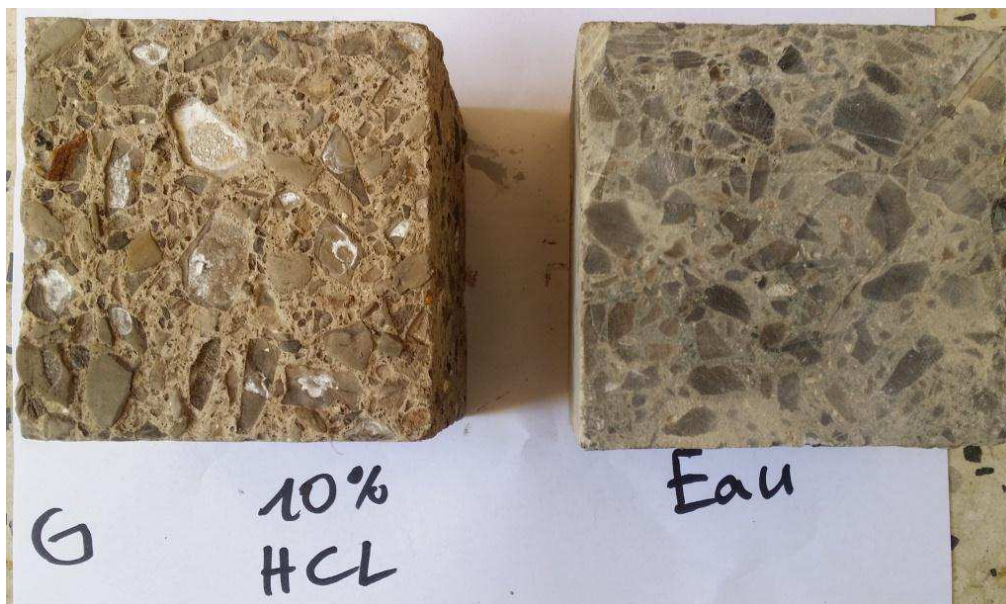


Figure (III-24) : Comparaison entre deux éprouvettes du béton G l'une immergée dans l'eau et l'autre immergée dans 10% de HCl pendant 28j

Béton GF



Figure (III-25) : Comparaison entre deux éprouvettes du béton GF l'une immergée dans l'eau et l'autre immergée dans 10% de HCl pendant 28j

Béton B :

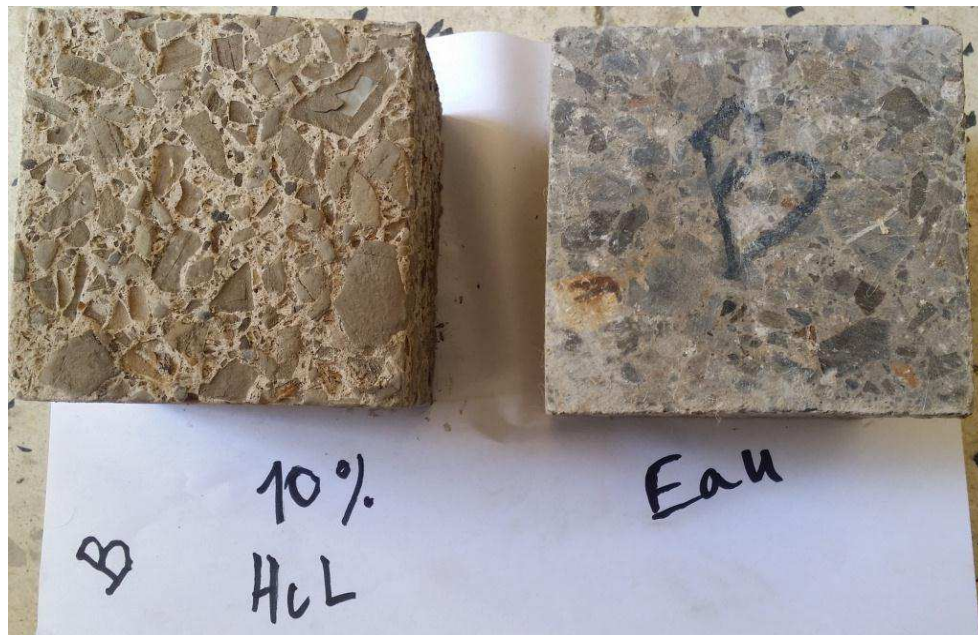


Figure (III-26) : Comparaison entre deux éprouvettes du béton B l'une immergée dans l'eau et l'autre immergée dans 10% de HCl pendant 28j

Béton BF :

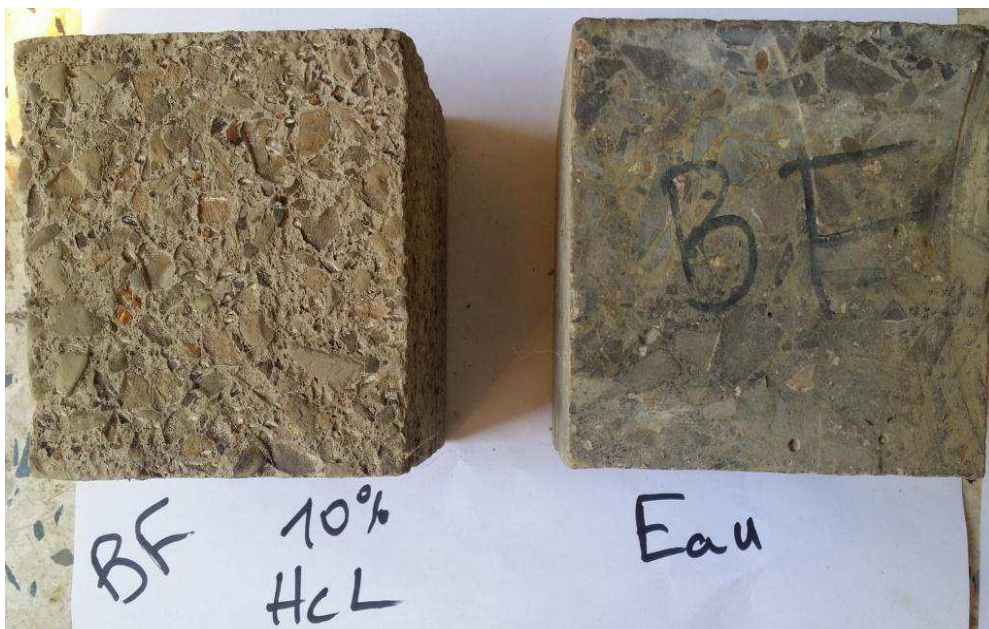


Figure (III-27) : Comparaison entre deux éprouvettes du béton BF l'une immergée dans l'eau et l'autre immergée dans 10% de HCl pendant 28j

➤ **Interprétation de l'analyse visuelle :**

A première vue on remarque que tous les bétons ont le même stade de dégradation vis-à-vis des attaques chimiques, la première semaine se caractérise par une forte dégradation des éprouvettes, après cette première semaine le rythme de dégradation se stabilise petit à petit, avec aucune grande différence dans un intervalle de 7j.

L'action de l'acide sur les 4 bétons est d'en modifier la structure et la teinte de la surface.

Celle-ci devient plus rugueuse en raison des différences de résistance à l'acide des constituants des bétons.

e) Essai physique (porosité accessible à l'eau/Absorption d'eau)

Le tableau suivant représente les résultats des pesées pour l'essai physique :

Tableau (III-11) : les masses mesurées (en gr) pour le calcul de la porosité accessible et de l'absorption

Type de béton	Masse initial	Masse sèche	Masse imbibé à l'air	Masse imbibé dans l'eau
G	45.90	43,5	46,8	27
GF	58.2	55	58	34,2
B	105.50	99,2	107	61,2
BF	39	37,1	39,2	23,1

Tableau (III-12) : La porosité et absorption pour les quatre formulations

Type de béton	Porosité (%)	Absorption (%)
G	16.88	7.58
GF	12.60	5.45
B	17.03	7.86
BF	13.04	5.66

On va s'intéresser qu'à la porosité et suivre les dégradations apportées par l'acide.

La figure (III-27) illustre la porosité des quatre formulations immergées pendant 28j dans l'acide :

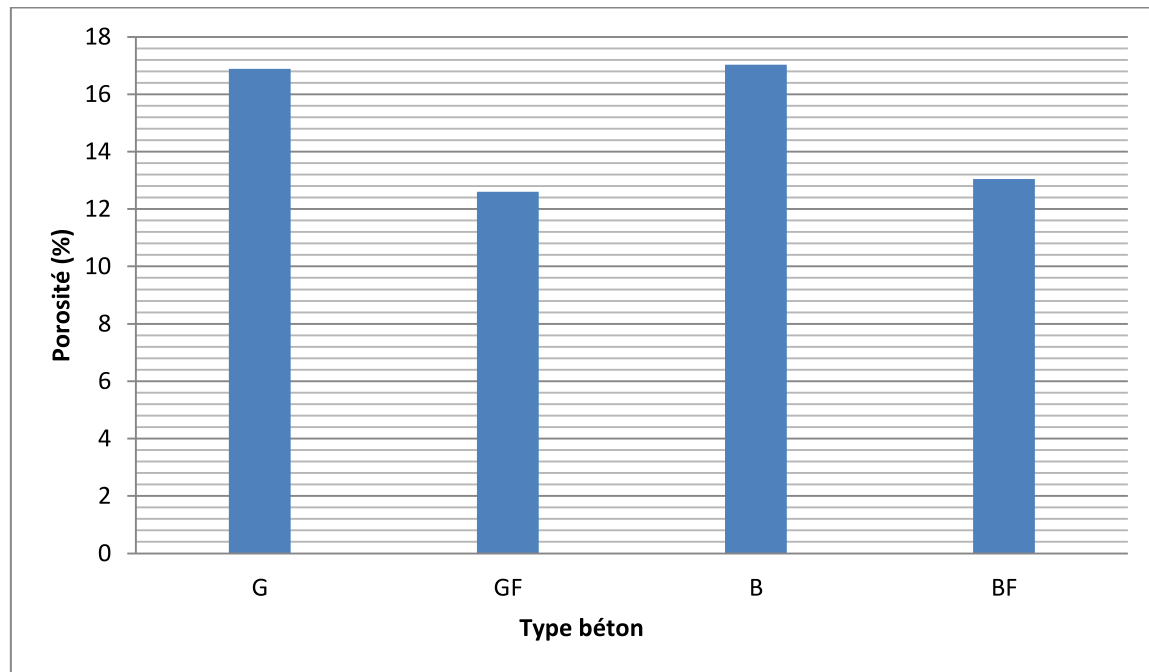
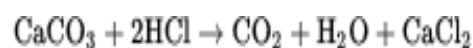


Figure (III-27) : Porosité des éprouvettes mis dans l'acide pendant 28jours

➤ Interprétations des résultats

En comparant ces résultats avec les résultats obtenus auparavant pour les bétons mis dans l'eau (voire figure (III-7)), on remarque que la porosité a diminué pour toutes les formulations.

Cette amélioration de la structure poreuse est due à la formation d'un nouveau sel qui est le produit de la combinaison de la portlandite et du l'acide chlorhydrique :



Ce sel a un effet colmatant il occupe les pores des bétons temporairement puisque c'est un sel très soluble.

On a voulu confirmé la présence du sel dans l'éprouvette, alors on a appliqué une solution de nitrate d'argent pour avoir une coloration prévisible du produit final voir figure (III-28) :



Figure (III-28) : coloration de la surface des éprouvettes en blanc (à l'abri de la lumière) caractérisant l'AgCl

f) DRX des échantillons :

Données en cours de traitement, mais on prévoit l'absence totale (ou presque) des pics de portlandite.

III.2.4.3-Milieu Salin :

Après fendage des éprouvettes, on a appliqué du nitrate d'argent (de formule AgNO_3) sur les faces internes du béton, ensuite on a calculé la moyenne de la distance colorée pour connaître l'ampleur de la pénétration des chlorures :

Le tableau (III-13) présente la profondeur de pénétration des chlorures, mesurée par une règle, pour les 4 types de béton après 2 mois d'immersion :

Tableau (III-13) : Profondeur de pénétration des ions Chlores

Type de béton	Profondeur de pénétration (mm)
G	8
GF	3
B	9
BF	2

La figure (III-29) illustre les profondeurs de pénétration pour les 4 types de béton :

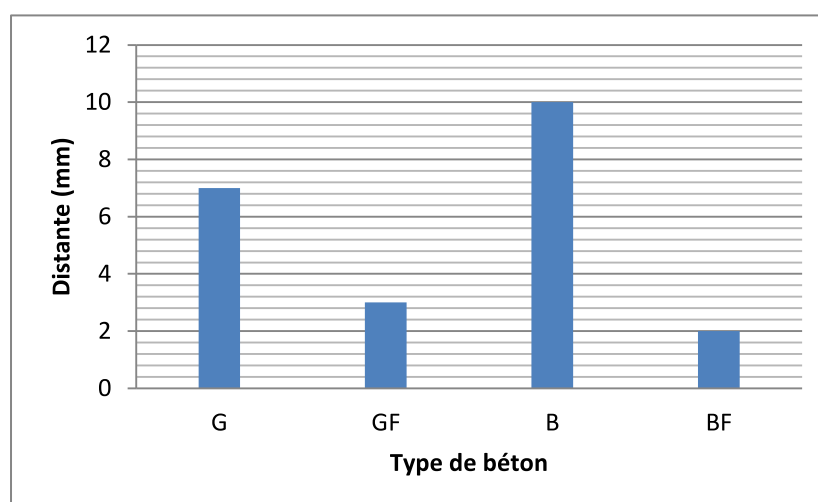


Figure (III-29) : Profondeur de pénétration des ions Chlores

➤ Interprétations des résultats:

La figure (III-30) démontre l'influence significative de l'ajout de la fumée de silice à 10% de substitution sur la pénétration des ions chlorures dans le béton.

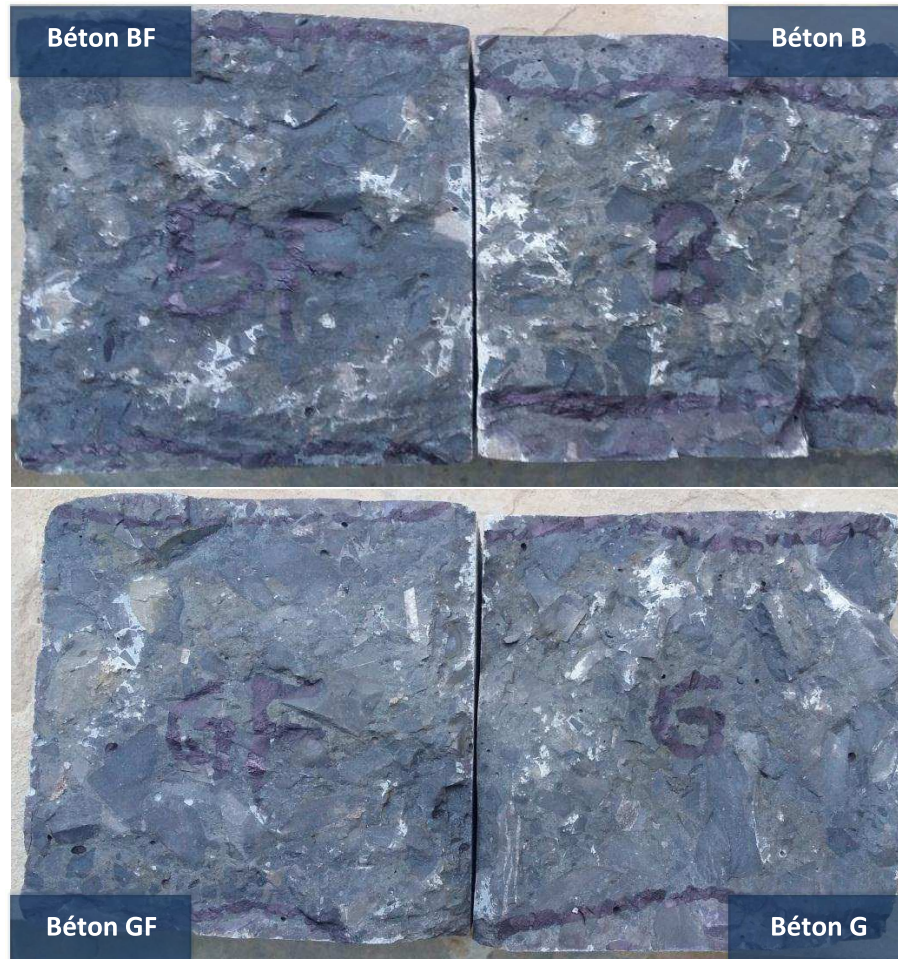


Figure (III-30) : l'influence de la fumée de silice dans la réduction de la pénétration des ions chlorures

Malgré les propriétés physiques et mécaniques élevées du béton B par rapport au béton G, on remarque que la profondeur de pénétrations des chlorures dans la structure interne est presque similaire, on déduit que la finesse des ciments n'a pas joué de rôle significatif dans la réduction de pénétration.

Certaines recherches [23] démontrent le lien qui existe entre la composition du liant et l'attaque des chlorures, en effet ils ont montré l'impact de la phase C_3A sur la pénétration des ions chlorures et sur leurs fixations chimiques, plus le ciment contient de C_3A plus les chlorures se fixent. Cela explique le fait que le béton B a présenté le taux de pénétration le plus élevé.

En revanche l'ajout de la fumée de silice a considérablement réduit cette profondeur pour les deux bétons GF et BF respectivement comparés à G et B.

La fumée de silice a développé une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorés en réduisant la taille des pores et apporté une certaine imperméabilité au béton en limitant l'accès des chlorures.

Cette mesure assez simple et approximative nous a permis de connaître l'effet qu'apporte la finesse des matériaux cimentaires ou de la fumée de silice, sur la diffusion des ions chlorés au sein du béton.

Conclusion

Les résultats obtenus à travers les diverses essais réalisés dans des conditions assez difficiles, ont largement dépassé nos attentes en termes de performances, en effet la fumée de silice a confirmé son rôle prépondérant dans l'amélioration des caractéristiques du béton notamment sa durabilité. La résistance mécanique a été améliorée, avec une augmentation de 10% à 14% des résistances à la compression et de 7% à 12% des résistances à la flexion. La fumée de silice a nettement prouvé son efficacité dans la réduction de perméabilité : avec une réduction de 66% à 72%. Cette imperméabilité a été encore observée vis-à-vis des ions Chlores, une réduction de pénétration des ions de de 62% jusqu'à 77%.

Par ailleurs, la substitution du ciment résistant aux sulfates (CHF-CEMIII/A) par du ciment blanc (CEM II/A-L) a également montrer une plus grande résilience quel que soit le milieu dans lequel il est exposé, Avec une résistance mécanique bien plus supérieure (23% en compression et 19% en flexion) et une compacité qui a réduit la perméabilité de 30%.

Bien mieux, la combinaison de ces deux matériaux à raison de 90% de ciment blanc et 10% de fumée de silice a abouti à des résultats très performants, suggérant ainsi une possibilité d'applicabilité dans les projets à venir. Les performances du béton BF ont présentés une supériorité bien distinguée et cela dans tous les essais effectué par rapport au béton G. Avec des résistances mécaniques bien plus améliorés (30% à la compression et 25% à la flexion), le béton BF a montré des comportements de BHP. Un constat confirmé lors des essais de durabilité, le béton BF étant plus compacte et moins poreux que le béton G, il a réduit la perméabilité à l'eau de et la pénétration des ions Chlores de 75%. Ce qui convient de dire que la longévité du béton BF (même après incorporation des fibres d'acier) est bien plus supérieur que celle du béton G. A titre comparatif sa durabilité a été nettement confirmée, une exigence dans un ouvrage tel que le barrage de Béni Slimane où le béton armé pourra être détérioré par corrosion, à travers diverses attaques chimiques.

Toutefois, considérant les surcouts engendrés par ces matériaux, et bien que les résultats aient montré un intérêt quasi-certain favorable à leurs utilisations, nous recommandons de confirmer, à travers une étude de faisabilité, les impacts financiers qui n'ont pas été pris en compte durant notre projet.

Perspective

Afin de bien compléter cette étude on suggère une étude bien plus prolongée sur la combinaison du ciment blanc et de la fumée de silice, avec une recherche bien plus approfondie sur la durabilité du matériau, avec variation du milieu (notamment milieu sulfatique) avec une durée d'immersion bien plus grande.

On recommande aussi d'aborder les points suivants :

- Combinaison des autres ajouts (cendres volantes, laitier, pouzzolane...) avec le ciment blanc.
- Etude de cycle gel/dégel pour le béton BF.
- Conservation du BF dans une solution à acidité constante (renouvellement du milieu au changement du pH)
- Reproduire les essais avec un matériel plus avancé.
- Mener une étude de rentabilité (le Coût du matériau par rapport à sa durabilité) pour connaître les exigences exactes à l'utilisation d'un tel béton (Ciment blanc + Fumée de silice).
- Avoir une production de fumée de silice nationale et limiter l'importation, pour réduire son coût et augmenter sa disponibilité.

Bibliographie

- [1] GHOSH, S.N. (ed.) *Advances in Cement Technology*, Pergamon, Oxford, 804 p., 1983.
- [2] Oueslati Olfa *DURABILITÉ DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES* - 2011.
- [3] PETROV N. Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite, Thèse de doctorat, université Sherbrooke (Québec) Canada, 2003, 189p.
- [4] REGOURD M. Cristallisation et réactivité des aluminates tricalciques dans les ciments Portland, *Il Cemanto*.3, 1978, p.323-336.
- [5] KOSMATKA S.H. Dosage et contrôle des mélanges de béton, *Bulletin d'ingénierie EB101* , Association canadienne du ciment, 7^{ème} édition canadienne, 2004.
- [6] DUCHESNE J. Le rôle des ajouts minéraux face aux réactions alcalis-granulats dans le béton : mécanismes de réaction, performance et essais d'évaluation de la performance.
Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 1993, 238p.
- [7] BARON J., OLLIVIER J.P., *La durabilité des Bétons*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1992.
- [8] LAFOREST G. stabilisation de poussière de four à arc électrique dans la matière cimentaires, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 2006, 216 p.

- [9] DELAGRAVE A., Étude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et a haute performance, Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada, 1996.
- [10] STEOPOE A., La durabilité du béton, Éditions Eyrolles, Paris, 1970.
- [11] KÜHL, H. Zement-Chemie, Vol. III, 1958, p. 219-220.
- [12] BASF document de « The Chemical Company of France », "la technologie du béton" 2009.
- [13] Jean-Pierre OLIVIER, Angélique VICHOT, "La durabilité des bétons", presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-8(2e édition), avril 2008.
- [14] OUYONG C , NANNI A, CHANG W, "Internal and external sulfate sources of sulfate ions in portland mortar : two types of chemical attack" CCR, vol 18 n° 5, 1988, p. 699-709.
- [15] BERTRON A , ESCADEILLAS G ,DUCHESNE J. "Cement pastes alteration by liquid manure organic acids : chemical and mineragical characterization" CCR., vol.34, n°10, 2004,pp 1823-1835.
- [16] Francois de LARRARD,"Construire en béton", presses de l'école nationale des ponts et chaussées ISBN 2-85978-366-0, 2002.
- [17] Jean-Pierre OLIVIER, Angélique VICHOT, "La durabilité des bétons", presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-8(2e édition), avril 2008.
- [18] FD P 18-011, "Fascicule de documentation "définition et classification des environnements chimiquement agressifs"
- [19]ANTON J.Schieiss et Henri Pougatsch, "LES BARRAGE du projet à la mise en service ",traité de génie civile de l'école polytechnique fédérale de lausanne.

[20] KADRI ABDELATEF , Contribution de l'amélioration de la durabilité du béton dans les zone enterrées de la wilaya de Ouargla par l'ajout des minéraux locaux

[21] WEAST R.C., ASTEL M.J., BEYER W.H., CRC handbook of chemistry and Physics, 67

th edition, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1986

[22] Journal officiel de la république Algérienne n°27

[23] T.SUMRANWANICH, S. TANGTERMSIRIKUL ; A model for prediction time-independent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system -Material and structures , Vol.37, 2004