

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou



Faculté Du Génie De La Construction
Département De Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT LMD

Spécialité : Calcul Avancé des Structures de Génie Civil

Présentée Par

Melle HASSANI Nacera

Sur le thème

**ANALYSE EXPERIMENTALE DE LA
DEGRADATION DES ELEMENTS EN BETON ET
BETON ARME EN SERVICE.**

Thèse soutenue publiquement le 25/02/2024

Devant le jury composé de :

Mme	KHELOUI	Fatma	Présidente	Professeur	Université de Tizi-ouzou
Mr	DEHMOUS	Hocine	Directeur de Thèse	MCA	Université de Tizi-ouzou
Mr	TAHAKOURT	Abdelkader	Examineur	Professeur	Université de Béjaïa
Mr	CHELOUAH	Nasser	Examineur	Professeur	Université de Béjaïa
Mr	GHOUILEM	Kamel	Examineur	MCA	Université de Tizi-ouzou
Mr	KHELIL	Nacim	Examineur	MCA	Université de Tizi-ouzou

Dédicace

Je dédie ce travail A la femme la plus chère au monde pour moi, celle qui m'a donné la vie, ma mère **Sadia**.

Ma moindre réussite est le fruit de son sacrifice.

Merci pour tous les dévouements à tes enfants pour qu'ils puissent grandir en prospérité.

Faites comme les arbres : changez vos feuilles et gardez vos racines....., ✍

Remerciements :

Dieu merci

Nous tenons à exprimer notre gratitude vis-à-vis des différents acteurs qui nous ont aidés de loï ou de près pour la réalisation de ce travail, et qui méritent ici remerciés. A cet effet, il nous est tout naturel d'exprimer notre reconnaissance :

A :

Je tiens en premier lieu à remercier, de tout mon cœur, à mon directeur de thèse *Dr DEHMOUS Hocine* pour avoir dirigé ce travail de thèse, aussi pour ses immenses compétences scientifiques, ses conseils « en or » et ses corrections qui ont beaucoup apporté à mon travail ainsi que son suivi patient de mes travaux du début jusqu'à la fin. Tout ce travail n'aurait abouti sans son soutien et ses encouragements constants. J'ai énormément apprécié ses nombreuses qualités humaines parmi lesquelles notamment son enthousiasme et sa très grande gentillesse.

J'exprime ma profonde gratitude à *Pr Noureddine MELIKECHI, Mr JOSHUA Landis* (laboratoire de NASA from USA), Je leur adresse toute ma reconnaissance pour ses réflexions scientifiques et ses nombreux conseils qui ont contribué au bon avancement de ce travail. J'ai notamment grandement apprécié ses remarques et ses relectures attentives de cette thèse.

Je tiens à remercier *Dr Helene Welemene* de l'ENIDE Tarbes-France pour ses conseils et ses orientations.

J'adresse également mes remerciements à *Pr KHELOUI Fatma* pour avoir accepté de présider le jury, *Pr TAHAKOURT Abdelkader*, *Pr CHELOUAH Nasser*, *Dr GHOUILEM Kamel* et *Dr KHELIL Nacim* pour avoir accepté de juger ce travail

Je tiens à exprimer mes sincères reconnaissances envers Madame *AIT NAMANE Farida*, Madame *HASSANI Farida*, Madame *AGOUJILE Nabila* qui m'ont encouragé. Je les remercie de m'avoir aidé et d'être patient avec moi durant la réalisation de ce travail. J'adresse également mes sincères remerciements à Mr *BAHTAN Amar*, Mr *AIT AIDER Hacene*, Mr *MOHELLEBI Mouloud*, Mr *BOUHRAOUA Rachid*, Mr *MESSAD Ahmed* pour leurs encouragements d'avoir répondu à mes questions avec une grande disponibilité.

Enfin, je voudrais exprimer une grande reconnaissance à mes parents, qui ont toujours été présents et qui m'ont toujours soutenu, pour leur dévouement et surtout pour leurs amours et leurs sacrifices, mon frère **Bousaad** et leurs enfants Remaïssa, Lyna, Amar, ma sœur **Ouïza** et leurs enfants Abdeslam, Ayoub, ma sœur **Farida** et leurs enfants Mohamed Islam, Djana. Aussi je dois passer un grand merci à mes étudiants de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

SOMMAIRE

RESUME

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : PATHOLOGIES DES ELEMENTS EN BETON ARME	
1. INTRODUCTION	4
2. LE MATERIAU BETON ?	5
3. CONSTITUANTS DU BETON	6
3.1. LES GRANULATS	6
3.2. LE CIMENT	8
3.3. EAU DE GACHAGE	9
4. FORMULATION DU BETON	9
5. REACTION D'HYDRATATION DU CIMENT	10
6. LE BETON ARME	11
7. LES PATHOLOGIES DU BETON	12
7.1. LES CAUSES MECANIQUES	13
7.1.1. LES CHOCS	13
7.1.2. LES SURCHARGES	13
7.1.3. LE FEU	13
7.1.4. LES VIBRATIONS	13
7.2. LES CAUSES PHYSIQUES	14
7.2.1. LES CYCLES GEL/ DEGEL	14
7.2.2. ABRASION	14
7.2.3. EROSION	14
7.2.4. CAVITATION	14
7.2.5. LE RETRAIT	15
7.3. LES CAUSES CHIMIQUES	16
7.3.1. REACTIONS ALCALIS-GRANULATS (RAG)	16
7.3.2. ATTAQUES SULFURIQUES	17
7.3.3. LA LIXIVIATION	18
7.3.4. ATTAQUES ACIDES	18
7.3.5. ATTAQUES PAR LES IONS CHLORURES	19
7.4. LA CORROSION DES ARMATURES	19
7.4.1. AMORÇAGE ET PROPAGATION DE LA CORROSION	20
7.4.2. CORROSION EN MILIEU SALIN DES ACIERS	21
7.4.3. CHLORURES ET CORROSION DES ARMATURES DANS LE BETON	22
7.4.4. NATURE ELECTROCHIMIQUE DE LA CORROSION	23
7.5. AUTRES CAUSES DE DEGRADATION DES BETONS	24
7.5.1. MAUVAIS POSITIONNEMENT DES ARMATURES	24
7.5.2. MAUVAISE QUALITE DU BETON	24

7.5.3. VIBRATION TROP IMPORTANTE	25
7.5.4. ABSENCE DE CURE DU BETON	25
7.5.5. CYCLE HUMIDITE / SECHERESSE	25
7.5.6. ENROBAGE	25
8. MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DU BETON	25
9. DURABILITE ET DUREE DE VIE D'UN OUVRAGE	26
10. DIAGNOSTIC DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL	27
11. TECHNIQUES DE REPARATION ET DE PROTECTION DES OUVRAGES EN BETON ARME	27
12. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	29
13. CONCLUSION	32
BIBLIOGRAPHIE	

CHAPITRE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE DES COLONNES COURTES SOUS L'EFFET HYGROTHERMO-MECANIQUE

1. INTRODUCTION	34
2. MATERIAUX ET PROGRAMME EXPERIMENTAL	35
2.1. MATERIAUX UTILISES	35
2.1.1. CARACTERISATION DES MATERIAUX	37
2.1.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	37
2.1.1.2. MODULE DE FINESSE	38
2.1.1.3. EQUIVALENT DE SABLE	38
2.1.2. FORMULATION ET CONFECTION DU BETON	40
2.1.3. CARACTERISATION DU BETON FRAIS	41
2.1.3.1. ESSAI D'AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS	41
2.1.4. CARACTERISATION DU BETON DURCI	43
2.2. PREPARATION ET DESIGNATION DES EPROUVETTES	44
2.3. DESCRIPTION DU PROCESSUS HYGROTHERMO-MECANIQUE	45
3. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE DE MESURE DES VITESSES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES	49
4. RESULTATS ET DISCUSSION	53
4.1. VITESSES INITIALES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES	53
4.2. EVOLUTION DANS LE TEMPS DES VITESSES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES	58
4.2.1. EFFET DU NIVEAU DE CHARGEMENT	58
4.2.2. EFFET DES CONDITIONS D'EXPOSITION	60
4.2.3. EFFET DE L'ELANCEMENT DES EPROUVETTES	62
4.3. EVOLUTION DANS LE TEMPS DU DOMMAGE SUIVANT L'ESSAI ULTRASONIQUE	64
4.3.1. EFFET DU NIVEAU DE CHARGEMENT	64
4.3.2. EFFET DES CONDITIONS D'EXPOSITION	66
4.4. COURBES CHARGEMENT-DEPLACEMENT	68
4.5. EVOLUTION DANS LE TEMPS DU DOMMAGE SUIVANT LES COURBES	73

CHARGEMENT-DEPLACEMENT	
5. CONCLUSION	77
BIBLIOGRAPHIE	
CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE D'UNE POUTRE EN BETON ARME SOUS L'EFFET HYGRO-THERMO-MECANIQUE & CHLORURES	
1. INTRODUCTION	80
2. MATERIAUX ET PROGRAMME EXPERIMENTAL	83
2.1. MATERIAUX	83
2.2. PREPARATION ET DESIGNATION DES EPROUVETTES	83
2.3. DESCRIPTION DU PROCESSUS COMBINE HYGROTHERMO-MECANIQUE & CHLORURES	85
2.3.1. DESCRIPTION DU MILIEU AGRESSIF A BASE DE CHLORURES	86
2.3.2. DESCRIPTION DU CYCLE THERMIQUE	86
2.3.2. DESCRIPTION DU CYCLE MECANIQUE	86
3. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE DE MESURE DU POTENTIEL DE CORROSION	88
4. DESCRIPTION DU TEST DE CARBONATATION	91
5. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.	92
6. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE PAR LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS)	94
7. RESULTATS ET DISCUSSION	95
7.1. EVOLUTION DU POTENTIEL DE CORROSION EN FONCTION DES CONDITIONS D'EXPOSITION	95
7.2. EVOLUTION DU POTENTIEL DE CORROSION EN FONCTION DU POINT DE MESURE	97
7.3. RESULTATS DE L'ESSAI DE CARBONATATION	101
7.4. ANALYSE VISUELLE DES EPROUVETTES	101
7.5. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR MEB	104
7.6. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR DRX	106
7.6.1. EPROUVETTE IMMERGEE DANS LES CHLORURES	106
7.6.2. EPROUVETTE SOUMISE AU CYCLE HYGRO-THERMOMECHANIQUE & CHLORURES	107
7.6.3. EPROUVETTE TEMOIN	109
7.7. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR MEB-EDX	111
7.7.1. EPROUVETTE SOUMISE A L'AIR AMBIANT.	111
7.7.2. EPROUVETTE IMMERGEE DANS L'EAU	115
7.7.3. EPROUVETTE SOUMISE A UN EFFET COMBINE HYGROTHERMO- MECHANIQUE	119
7.7.4. EPROUVETTE IMMERGEE DANS LES CHLORURES	123
7.7.5. EPROUVETTE SOUMISE A UN EFFET COMBINE HYGROTHERMO- MECHANIQUE & CHLORURES	128

7.8. ANALYSE DES RESULTATS LIBS	134
8. CONCLUSION	139
BIBLIOGRAPHIE	
CONCLUSION GENERALE	141
ANNEXES	

Résumé

Le béton est toujours considéré comme un matériau très durable. Cependant, de nombreuses constructions ont montré des dégradations au cours de leur durée de vie. Pour assurer la sécurité, la stabilité et l'aptitude au service des structures de génie civil, il est nécessaire de comprendre les processus de dégradations et leurs effets sur la capacité portante résiduelle. Tout d'abord, ce travail est basé sur l'étude expérimentale de courtes colonnes prismatiques en béton soumises à un processus de vieillissement hygrothermo-mécanique. Pour étudier les effets des conditions d'exposition sur la résistance des spécimens, des essais combinés de vitesse d'impulsion ultrasonique et de chargement en compression ont été utilisés. Les résultats indiquent que dans un premier temps, la dégradation des échantillons est légère. Ensuite, la dégradation devient notable. Deuxièmement, nous étudions le comportement des éléments en béton armé dans le cadre d'un processus de vieillissement hygrothermo-mécanique et aux chlorures. Pour évaluer le risque de corrosion, différentes méthodes d'essai sont utilisées. La dégradation des éléments en béton armé est confirmée par une réduction du potentiel de corrosion des éprouvettes.

Mots clés : béton armé, dégradations, corrosion, effet hygrothermomécanique, vitesse ultrasonique, potentiel de corrosion

Abstract

Concrete is still considered to be very durable material for a long time. However many constructions have shown degradations during their service life. To ensure safety, stability and serviceability of civil engineering structures, understanding of deterioration processes and their effect on the residual structural load capacity is necessary. First, this work is based on the experimental study of short prismatic concrete columns under the hygrothermo-mechanical aging process. To investigate the effects of the exposure conditions on the strength of specimens, combined Ultrasonic Pulse Velocity testing and compression loading testing was used. Results indicate that in first time, degradation of specimens occurs slightly. After that the degradation becomes notable. Second, we study reinforced concrete element behavior under hygrothermo-mechanical and chlorine aging process. For assessment the risk of corrosion different testing methods are used. The degradation of reinforced concrete element is confirmed by a reduction in the corrosion potential for specimens testing.

Key words : reinforced concrete, degradations, corrosion, hygrothermomechanical effect, UPvelocity, potentiel of corrosion.

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Différents constituant du matériau béton	05
Figure 1.2 : Image MEB des produits de l'hydratation du ciment	10
Figure 1.3 : Schéma d'un élément en béton armé	11
Figure 1.4 : Récapitulatif des causes de désordres dans le béton	12
Figure 1.5 : Effet du gel de l'eau sur le béton [42]	14
Figure 1.6 : Différents type de retrait du béton [41].....	15
Figure 1.7 : Détérioration du béton par réactions chimiques [41].....	16
Figure 1.8 : Phénomène d'alcali-granulat	17
Figure 1.9 : Phénomène d'attaques Sulfatiques	17
Figure 1.10 : Phénomène de lixiviation des liants	18
Figure 1.11 : Phénomène de d'Attaques Acides	18
Figure 1.12: Poutre située en bord de mer [38]	19
Figure 1.13 : Diagramme de Tutti modifié [29]	20
Figure 1.14 : Profil d'initiation de la corrosion en fonction du rapport $[Cl^-]/[OH^-]$ (Source : COTITA) [30]	21
Figure 1.15 : Facteurs de corrosion	22
Figure 1.16 : Corrosion par les chlorures, mise en évidence des zones cathodiques saines et anodiques corrodées (Source : CERIB)[30].	23
Figure 1.17 : Exemple de désordre du à une mauvaise mise en œuvre du béton : mauvaise vibration du béton	24
Figure 1.18 : Endommagement d'une structure causé par la corrosion	26
Figure 1.19 : Différents types de fissurations	26
Figure 1.20 : Schéma des étapes du diagnostic d'un ouvrage en béton armé [39].....	28
Figure 1.21 : Quelques techniques de réparations et de protections des ouvrages [39].	28

Figure 1.22 : Evolution du potentiel en fonction du temps pour un béton ordinaire et mortier dans 3 différents milieux.	29
Figure 1.23 : Evolution du potentiel en fonction du temps pour un béton dans différents milieux.	30
Figure 1.23 : Evolution du potentiel dans un pieu dans différents degrés de corrosion 5,10 et 15%.	31
Figure 1.23 : Evolution du potentiel en fonction du temps d'exposition d'un béton pour différents milieux.	32

Chapitre 2

Figure 2.1: Image du ciment et des granulats utilisés pour la confection des éprouvettes.	37
Figure 2.2: Image de la procédure de l'analyse granulométrique des granulats..	38
Figure 2.3: Analyse granulométrique des granulats utilisés pour la confection des éprouvettes.	38
Figure 2.4: Essai d'équivalent de sable	40
Figure 2.5: Malaxage des ingrédients à sec et en présence d'eau.....	41
Figure 2.6: Préparation des Moules pour éprouvette en béton et béton armé ...	42
Figure 2.7: Confection des éprouvettes utilisées dans cette étude. 7x7x28 en béton et en béton armé	42
Figure 2.8: Essai de consistance au cône d'Abrams	43
Figure 2.9: Image de la machine d'essai IBERTEST-200kN.	44
Figure 2.10: Description de la géométrie des éprouvettes utilisées dans le cadre de cette étude expérimentale.	46
Figure 2.11: Description du cycle hygrothermique.....	47
Figure 2.12: Description du Cycle Thermique appliqué aux éprouvettes.	48
Figure 2.13: Schéma du dispositif de Chargement-Déchargement en compression simple.	48
Figure 2.14: Image du dispositif d'application aux éprouvettes du cycle mécanique statique en compression axiale : Chargement-Déchargement.....	49
Figure 2.15: Schéma de principe de l'essai à Ultrason	50
Figure 2.16: Principe et composants de la mesure des vitesses ultrasoniques avec l'appareil Proceq Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Test (Proceq PUNDIT Lab+)	51

Figure 2.17: Description de la position et de la procédure de mesures de la vitesse des impulsions ultrasoniques dans les cinq points de l'éprouvette.....	52
Figure 2.18: Représentation graphique des valeurs de la vitesse de propagation des impulsions ultrasonique, mesurées sur les différentes éprouvettes selon les trois configurations : Longitudinale, Transversale et Semi-direct. mesures des vitesses ultrasoniques.	55
Figure 2.19: Histogramme des fréquences des mesures longitudinales des vitesses ultrasoniques initiales.....	57
Figure 2.20: Histogramme des fréquences des mesures transversales des vitesses ultrasoniques initiales	57
Figure 2.21: Histogramme des fréquences des mesures directes des vitesses ultrasoniques initiales.....	58
Figure 2.22: Histogramme des fréquences des mesures semi-directe des vitesses ultrasoniques initiales	58
Figure 2.23: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens longitudinal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement	60
Figure 2.24: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens transversal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement.....	60
Figure 2.25: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens semi-direct des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement	61
Figure 2.26: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques longitudinales en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.	62
Figure 2.27: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques transversales en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition	63
Figure 2.28: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition	63
Figure 2.29: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens longitudinal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différentes valeurs de l'élanement h/b des éprouvettes.	64
Figure 2.30: Evolution dans le temps du dommage D longitudinal en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement.	66
Figure 2.31: Evolution dans le temps du dommage D transversal en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement	66
Figure 2.32: Evolution dans le temps du dommage D semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement.....	67

Figure 2.33: Evolution dans le temps du dommage D longitudinal en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.	67
Figure 2.34 : Evolution dans le temps du dommage D transversal en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.....	68
Figure 2.35: Evolution dans le temps du dommage D semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition	68
Figure 2.36: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette avec un niveau de chargement de 70%Rd.	69
Figure 2.37: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 30% de Rd	70
Figure 2.38: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 50% de Rd	70
Figure 2.39: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles hygrothermo-mécanique avec un niveau de chargement de 50% de Rd	71
Figure 2.40: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 70% de Rd	71
Figure 2.41: Evolution des courbes Chargement-Déplacement en compression pour différents niveaux de chargement.	73
Figure 2.42: Evolution des courbes Chargement-Déplacement en compression pour différentes conditions d'exposition.....	73
Figure 2.43: Courbes Chargement-Déplacement des éprouvettes comparées au béton témoin pour différents niveau de chargement et différentes conditions d'exposition.	74
Figure 2.44: Courbes Chargement-Déplacement des éprouvettes comparées au béton témoin pour différents niveau de chargement et différentes conditions d'exposition.	75
Figure 2.45 : Evolution du dommage d/d_{max} en fonction des cycles pour différents niveau de chargement et différentes conditions d'exposition.....	76
Figure 2.46: Evolution du dommage d/d_{max} en fonction des cycles pour différentes conditions d'exposition dans le cas d'une éprouvette soumise à 50% de Rd.	76
Figure 2.47: Comparaison entre les différentes estimations de la variable endommagement D dans le cas d'une éprouvette soumise à 70% de Rd	77

Figure 3.1 : Facteurs affectant la pénétration des chlorures et les processus de corrosion dans les éléments en béton armé [1].	82
Figure 3.2 : Dispositif de confection des éprouvettes utilisées.	85
Figure 3.3 : Description de la géométrie des éprouvettes utilisées. après 90 jours.	85
Figure 3.4 : Description du cycle combiné hygrothermo-mécanique & chlorures.	88
Figure 3.5 : Description du Cycle Thermique appliqué aux éprouvettes	89
Figure 3.6 : Schéma du dispositif de Chargement-Déchargement en flexion trois points	89
Figure 3.7 : Principe et composants de la mesure du Potentiel de corrosion par demi-pile : Appareil Canin+ proceq.	91
Figure 3.8 : Description des trois points de mesures du potentiel de corrosion.	91
Figure 3.9 : Principe et composants de l'analyse par Microscope Electronique à Balayage (MEB)	94
Figure 3.10: Principe et principaux composants du dispositif du Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS).	95
Figure 3.11: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du bas en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition	96
Figure 3.12: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du milieu en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition.	96
Figure 3.13: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du haut en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition	97
Figure 3.14: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise à l'air ambiant, selon la zone de mesure. Comme le montre la Figure 3.15 dans le cas de l'éprouvette position dans laquelle est immergée l'éprouvette (voir figure 3.4.a)	98
Figure 3.15: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette immergée dans l'eau, selon la zone de mesure.	99
Figure 3.16: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise au cycle hygrothermo-mécanique, suivant la zone de mesure.	99
Figure 3.17: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette immergée dans l'eau salée (Chlorures), selon la zone de mesure.	100

Figure 3.18: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise au cycle hygrothermo-mécanique & chlorures, suivant la zone de mesure	100
Figure 3.19: Image de l'essai de carbonatation à la Phénolphtaléine selon les conditions d'exposition (Après 1110 jours	101
Figure 3.20: Image des coupes transversales des éprouvettes selon les conditions d'exposition (Après 1110 jours).....	103
Figure 3.21: Image MEB d'une éprouvette témoin.....	105
Figure 3.22: Image MEB de l'éprouvette immergée dans l'eau	105
Figure 3.23 : Image MEB de l'éprouvette soumise à l'effet hygrothermo-mécanique	105
Figure 3.24: Image MEB d'un échantillon de l'éprouvette immergée dans les chlorures.	106
Figure 3.25: Image MEB d'un échantillon de l'éprouvette soumise à l'effet Hygrothermo-mécanique & Chlorures.....	106
Figure 3.26: Résultat de l'analyse par DRX – Epreuve immergée dans la solution de chlorures.....	107
Figure 3.27: Résultat de l'analyse par DRX – l'éprouvette soumise à la combinaison d'un cycle hygrothermo-mécanique & chlorures.	109
Figure 3.28: Résultat de l'analyse par DRX – Epreuve soumise à l'air ambiant	110
Figure 3.29 : Image MEB des points d'analyse: Echantillon soumise à l'air ambiant	112
Figure 3.30 : Images MEB : Echantillon soumise à l'air ambiant.....	113
Figure 3.31 : Identification des éléments : Spot 1-2-3-4.....	114
Figure 3.32 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon immergée dans l'eau.	116
Figure 3.33 : Images MEB : Echantillon immergée dans l'eau.....	117
Figure 3.34 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	118
Figure 3.35 : Image MEB des points d'analyse: Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique.....	120
Figure 3.36 : Image MEB : Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique	121
Figure 3.37 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	122
Figure 3.38 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon immergée dans les chlorures	124
Figure 3.39 : Image MEB : Echantillon immergée dans les chlorures.....	125
Figure 3.40 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	126
Figure 3.37 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	122

Figure 3.38 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon immergée dans les chlorures	124
Figure 3.39 : Image MEB : Echantillon immergée dans les chlorures.....	125
Figure 3.40 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	126
Figure 3.41 : Identification des éléments : Spot 4-5.....	127
Figure 3.42 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique.....	129
Figure 3.43 : Image MEB : Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique	130
Figure 3.44 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.....	131
Figure 3.45 : Identification des éléments : Spot 4-5.....	132
Figure 3.46 : Image de la préparation des échantillons pour l'essai LIBS.....	135
Figure 3.47 : Résultat de l'analyse par LIBS- Echantillon 9 et 12.....	137
Figure 3.48 : Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément Na pour les 15 échantillons.....	137
Figure 3.49 : Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément Ca pour les 15 échantillons.....	138
Figure 3.50: Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément CL pour les 15 échantillons.....	138

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1: Principaux minéraux contenus dans le clinker.....	09
Tableau 1.2: Principaux minéraux contenus dans le clinker.....	10
Tableau 1.3: Risques de fissuration en fonction du Type de Retrait [41].....	15

Chapitre 2

Tableau 2.1: Analyse chimique du ciment utilisé.....	37
Tableau 2.1: Analyse chimique du ciment utilisé....	37
Tableau 2.2: Analyse Minéralogique du ciment utilisé.....	39
Tableau 2.3: Classification du sable suivant les valeurs de MF.....	39
Tableau 2.4: Classification du sable suivant les valeurs de ES.....	40
Tableau 2.5: Formulation du béton utilisé en $[\text{kg}/\text{m}^3]$	41
Tableau 2.6: Consistance du béton en fonction de l'affaissement.....	43
Tableau 2.7: Résultats de l'essai au cône d'Abrams.....	43
Tableau 2.8: Densité et résistance ultime du béton après 90 jours.....	44
Tableau 2.9: Détails et répartition des spécimens utilisés dans cette étude.....	45
Tableau 2.10: Analyse des paramètres statistiques de la distribution des mesures des vitesses ultrasoniques	56

Tableau 3.1:Formulation du béton utilisé en [kg/m ³].	84
Tableau 3.2:Densité et résistance ultime de la poutre en béton armé.	85
Tableau 3.3:Détails et répartition des spécimens utilisés dans cette étude.	86
Tableau 3.4:Exemples de la salinité des eaux de mer.	87
Tableau 3.5: Valeurs du potentiel de corrosion citées dans la norme.	90
Tableau 3.6:Récapitulatif des résultats obtenus lors de l'essai DRX.	111
Tableau 3.7:Quantification des différents éléments.	115
Tableau 3.8:Quantification des différents éléments.	119
Tableau 3.9:Quantification des différents éléments.	123
Tableau 3.10:Quantification des différents éléments	128
Tableau 3.11:Quantification des différents éléments	133
Tableau 3.12 :Descriptif des échantillons utilisés lors de l'essai LIBS.	136

Liste des Notations et Symboles

MEB	: Microscope Electronique à Balayage
LIBS	: Laser Induced Breakdown Spectroscopy
DRX	: Diffraction des Rayons X
dg	: diamètre minimum des grains de granulats
Dg	: diamètre maximum des grains de granulats
RAG	: Réaction Alcalis-Granulats
pH	: Potentiel Hydrogène
CERIB	: Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton
CND	: Caractérisation Non Destructive
NDT	: Non-Destructive Testing
ED	: Essais Destructifs
ASR	: Réaction Alcalis-Silice
CANIN	: Corrosion Analyzing Instrument
ASTM	: American Society for Testing and Materials,
MF	: Module de Finesse
ES	: Equivalent de Sable
E	: Eau de Gachage
C	: Ciment
E/C	: Rapport Eau sur C
h	: Hauteur de l'éprouvette
b	: Largeur de la section transversale de l'éprouvette
Rd	: Résistance de conception de l'éprouvette en compression
Ru	: Résistance ultime de l'éprouvette en compression
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity Testing
Cv	: Coefficient de Variation
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity mesuré après n cycle
UPVo	: Ultrasonic Pulse Velocity initiale
D	: Variable de l'endommagement de l'éprouvette
Eo	: Module de Young initial de l'éprouvette en béton
Ef	: Module de Young de l'éprouvette mesuré après n cycle
d	: Déplacement mesuré après n cycle
dmax	: Déplacement maximal mesuré
E	: Module de Young de l'acier
v	: Coefficient de Poisson
ρ	: Masse Volumique



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

En raison de sa grande résistance, de sa durabilité et de son coût, le béton armé a été pendant de nombreuses années le premier choix en tant que matériau de construction. En effet, les ouvrages en béton se caractérisent par une durabilité relativement longue. Cependant, sous l'effet d'attaques mécaniques et chimiques (charges et décharges, fluctuations de température et d'humidité, corrosion des armatures), des défaillances prématurées de ces ouvrages sont souvent observées.

Sanjeev Kumar Verma et al. ont proposé un diagramme simple, présenté à la figure 1, pour illustrer le processus de détérioration, de réduction de la résistance et de la durée de vie d'une structure existante au cours de son utilisation [1]. Cette figure montre que la durée de vie résiduelle d'une structure en béton dépend des performances actuelles, du taux de détérioration et des performances minimales acceptables [1].

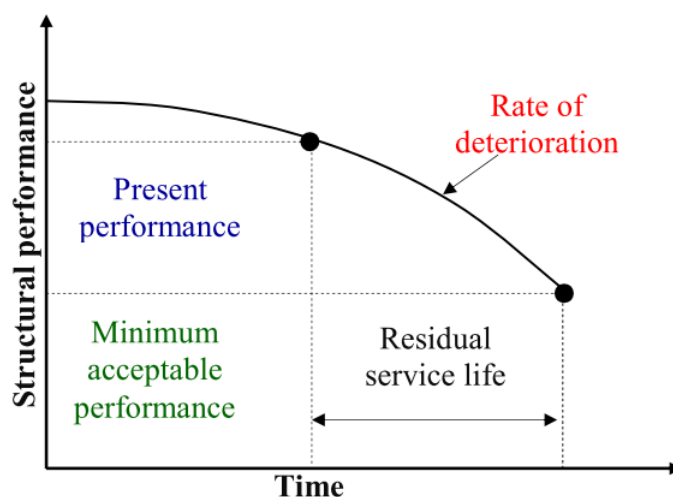


Figure 1 : Processus de détérioration de la performance structurelle d'un ouvrage en génie-Civil à travers le temps.[01]

Pour assurer la sécurité, la stabilité et l'aptitude au service des ouvrages de génie civil, il est nécessaire d'en assurer une surveillance continue [2]. Pour effectuer des prévisions quantitatives de la durée de vie des structures de génie civil, il est essentiel de mieux comprendre les mécanismes des différents processus de dégradation et leur cinétique [3].

Généralement, la dégradation d'une structure en béton comprend deux stades successifs [4, 5, 6] ; le premier, appelé stade latent, correspond à l'endommagement lent du béton, sans effets visibles. Le second, appelé stade de propagation des dommages matériels, correspond aux dommages visibles.

Plusieurs travaux de recherche se sont concentrés sur l'influence des facteurs environnementaux sur les éléments de structure en béton [7, 8, 9]. Cela a été fait soit en considérant l'effet séparé du chargement mécanique et de l'exposition hygrothermique [10, 11, 12, 13, 14], soit en considérant l'effet combiné des conditions hygrothermomécaniques [15, 16, 17, 18, 20]. En outre, les chercheurs considèrent des échantillons normalisés qui ne représentent pas la réalité en termes de rapport d'éclatement h/b où h et b représentent respectivement la hauteur et la largeur des échantillons, comme le montre la récente revue publiée par OlaAdel Qasim [20].

En outre, pour prendre en compte la charge mécanique, les chercheurs considèrent souvent la capacité de charge ultime (point de rupture de l'élément en béton) [16].

L'effet de la corrosion sur les matériaux est connu depuis des milliers d'années. Toutefois, des outils plus efficaces ont été récemment mis au point pour étudier la corrosion. Dans les structures en béton, la corrosion de l'armature donne une très bonne idée de la performance du matériau composite ainsi obtenu.

La pénétration d'agents agressifs est la cause physico-chimique la plus importante qui réduit la durée de vie des structures en béton armé par la corrosion des armatures. La corrosion de l'acier est principalement à l'origine de l'éclatement du béton et de l'apparition de fissures dues à diverses actions environnementales, en particulier dans les ponts et les bâtiments.

L'évaluation non destructive de la résistance du béton dans les structures existantes est aujourd'hui un défi réel et complexe. De nombreuses études et programmes de recherche ont été menés afin de développer des outils et des modèles pour évaluer cette résistance [15]

Dans la littérature, plusieurs chercheurs se sont attelés à créer et à développer des méthodes non destructives nécessaires pour comprendre le phénomène de corrosion des armatures dans les structures de génie civil.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons dans un premier temps à l'analyse expérimentale du comportement d'un élément en béton sous l'effet combiné hygrothermo-mécanique. Le monitoring de l'évolution dans le temps du comportement mécanique des éprouvettes testé sera réalisé par la combinaison de test non destructif à savoir la mesure par les ondes ultrasonique et un test destructif à savoir l'essai de compression.

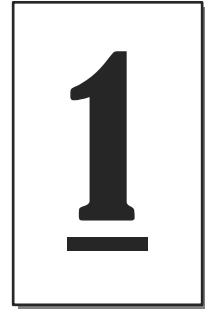
Dans un second temps, notre étude portera sur l'analyse expérimentale du comportement d'un élément en béton armé sous l'effet combiné hygrothermo-mécanique et chlorures. Le monitoring de l'évolution dans le temps du comportement mécanique des éprouvettes testé sera réalisé par la combinaison des méthodes de caractérisation suivantes :

- La mesure du potentiel de corrosion.
- L'Analyse par DRX
- L'Analyse par LIBS
- L'Analyse MEB
- L'essai de carbonatation
- L'inspection visuelle

L'objectif principal assigné à ce travail est de combiner les différents tests utilisés pour le monitoring du comportement des structures et ce afin d'établir des modèles de dégradations de ces structures.



Pathologies des Éléments en Béton Armé



PATHOLOGIES DES ELEMENTS EN BETON ARME

1. INTRODUCTION

Depuis fort longtemps le matériau de construction le plus utilisé au monde c'est le béton. Ses origines remontent à l'aube de la civilisation européenne. C'est grâce aux travaux de Smeaton, Vicat, Aspin, et Lambot, que la société moderne a connu ce nouveau matériau maniable, économique et présentant une très bonne résistance à la compression.

Ainsi, le béton a permis au fil du temps, aux ingénieurs et aux architectes de libérer les formes et d'échapper aux restrictions imposées par la pierre. Malgré sa longue histoire, Le béton dont le comportement est complexe, notamment dans le cas des sollicitations extrêmes et dans les différentes conditions climatiques, fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses études.

En effet, Depuis que l'homme a commencé à bâtir des ouvrages en béton, ces derniers sont exposés aux diverses agressions. Par conséquent, le béton durci subi de multiples altérations, qui diminuent ses caractéristiques dans le temps.

Ainsi, le diagnostic des ouvrages en béton s'impose comme un outil d'aide à la décision. En effet, le diagnostic permet d'une part l'évaluation de l'état instantané de l'ouvrage.

D'autre part, l'outil expert permet de prédire l'évolution de cet état pour enfin évaluer la gravité ou non de la menace d'une pathologie donnée (désordre donné) et de cela en découle la décision.

2. LE MATERIAU BETON ?

Comme illustrer sur la figure 1 ci-dessous, Le béton est obtenu d'une manière générale en mélangeant dans des proportions bien déterminées des granulats (sable, gravillons), du ciment et enfin de l'eau. Nous pouvons pour des besoins spécifiques faire appel à des adjuvants. Une fois mélangé, nous obtenons une pâte homogène. Cette pâte est le résultat de la réaction d'hydratation du ciment à cause de la présence de l'eau.

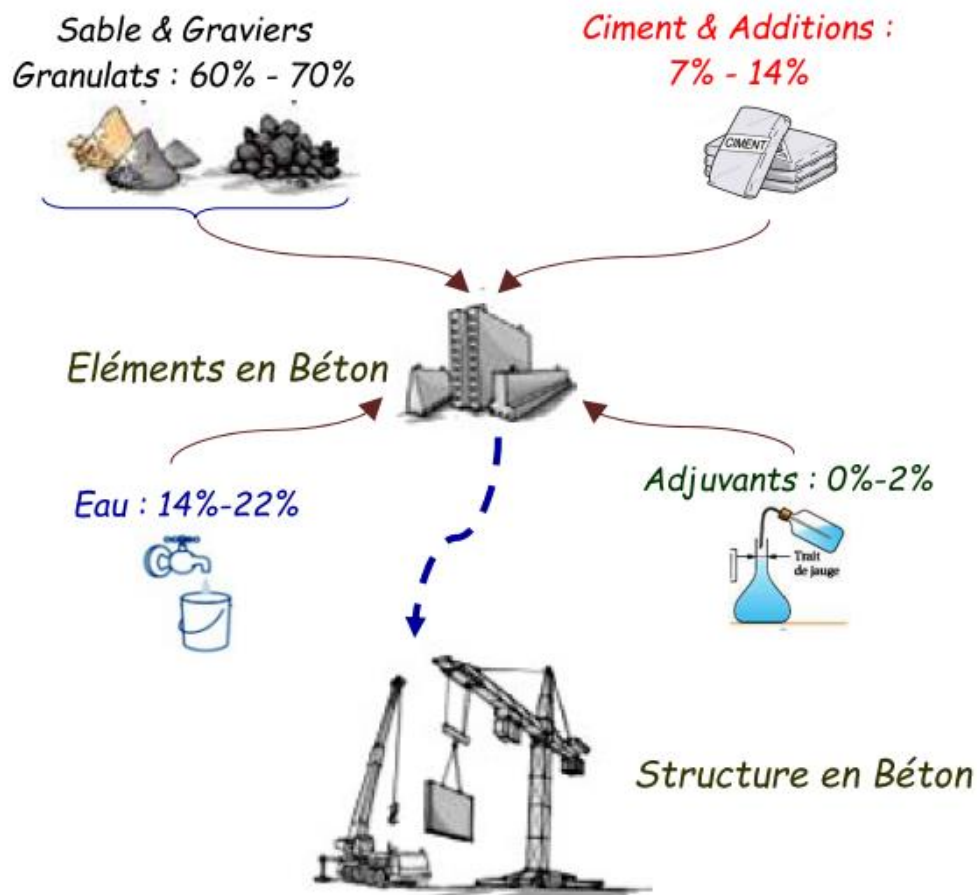


Figure 1.1 : Différents constituants du matériau béton (% massiques).

Malgré les performances du matériau béton en compression, il s'avère que son comportement en traction est très faible comparé à celui en compression. C'est pourquoi, les ingénieurs ont eu l'idée d'associer ce matériau béton avec des armatures de renforcement généralement en acier. [3,4]

3. CONSTITUANTS DU BETON

D'un point de vue microscopique, le matériau béton est un matériau hétérogène multiphasique. En effet, le béton est constitué par les trois phases de la matière à savoir solide, liquide et gaz. Les granulats constituent ce qu'on appelle le squelette granulaire qui a pour particularité d'être dépourvue d'une cohésion. Le ciment représente le liant qui au contact de l'eau active la prise du béton, formant ainsi un mélange qui se solidifie et se durcit. La pâte de ciment ainsi obtenue a pour rôle d'assurer la cohésion entre les grains de ces granulats. C'est ce processus qui permet de conférer au béton la résistance voulue. Généralement, le procédé de fabrication d'un élément en béton se caractérise par une succession d'étape à savoir le malaxage des constituants solide (granulats & ciment), l'ajout de l'eau, la prise, la solidification et le durcissement. Dans ce qui suit, nous présentons quelques généralités sur les principaux constituants du matériau béton.

3.1. LES GRANULATS

Comme indiqué sur la Figure 1.1, les granulats représentent les principaux composants du béton avec une proportion de 70 % en poids. Ainsi, la résistance mécanique du béton est conditionnée par leurs performances mécaniques et la régularité de leurs caractéristiques. Le choix des caractéristiques des granulats est dicté par les contraintes mécaniques, physico-chimiques, esthétiques du projet à réaliser et de la mise en œuvre du béton.

En fonction de leur nature minérale, Les granulats, présentent des propriétés spécifiques que l'ingénieur matériau se doit de connaître. En effet la nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi. Nous pouvons citer à titre d'exemple, le fait que la nature des liaisons à l'interface grains-pâte de ciment favorise les résistances mécaniques et les performances du béton.

D'une manière générale, l'origine des granulats utilisés pour la fabrication des bétons peut être :

- Des roches alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés)
- Des roches massives (granulats concassés).

D'un point de vue minéralogique, les granulats proviennent de roches sédimentaires siliceuses, calcaires ou silico-calcaire, de roches métamorphiques telles que les quarts et quartzites ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Cette diversité dans l'origine des granulats a pour conséquences une variabilité dans leurs caractéristiques. Ceci influe considérablement sur la qualité du béton confectionné. En effet :

- Suivant la nature minéralogique : les études ont montré que la plupart des granulats conviennent pour le béton. Il y a lieu d'indiquer l'influence défavorable des argiles, des calcaires marneux qui provoquent des gonflements et des altérations dans le temps.
- Suivant la forme des grains, angularité : Les études ont montré que d'une manière générale l'influence est peu importante. Généralement, l'utilisation des granulats roulés dans la fabrication du béton est préférée à celle des granulats concassés car on considère que les granulats roulés offrent au béton une meilleure ouvrabilité tandis que les granulats concassés favorisent une meilleure liaison avec la pâte de ciment.
- Suivant la propreté des granulats : Les études ont montré que ce critère est très important. En effet, Les impuretés présentent dans les granulats perturbent l'hydrations du ciment et entraînent des défauts d'adhérence grains/pâte de ciment.
- Suivant la présence des matières organiques : Les études ont montré que la présence de ces matières influe d'une manière défavorable sur la prise et le durcissement. Ceci entraine une chute des résistances.
- Suivant la granularité : La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains d'un mélange granulaire. Elle est obtenue par l'analyse granulométrique au moyen de tamis, qui permet de donner la distribution et les proportions relatives des différentes classes granulaires composant un béton. Ainsi, un granulat est

caractérisé par sa classe d/D désignant respectivement le diamètre minimum et maximum des grains. Dans la pratique, il existe cinq classes granulaires principales (Norme NFP18-101):

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

Les études ont montré que ce paramètre est très important car il influe considérablement sur les propriétés du béton. Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux de Khezzane et al [40] qui ont montré que le D_{max} est un paramètre qui influe considérablement sur les propriétés du béton. Concernant l'état frais, un D_{max} faible, associé à un dosage en ciment faible, entraînent une meilleure ouvrabilité. Concernant l'état durci, un D_{max} faible, associé à un dosage en ciment élevé, engendre une porosité et une perméabilité à l'eau faibles, tandis que la résistance mécanique et la densité du béton augmentent.

- Suivant la teneur élevée en sulfates, sulfures, chlorures ; Les études ont montré que ce paramètre engendre des réactions avec le ciment ce qui provoque des fissures et la corrosion des armatures.

3. 2. LE CIMENT

Le ciment lorsqu'il est gâché avec de l'eau, forme une pâte cimentaire qui fait prise et durcit. Ceci est le résultat de la réaction d'hydratation du principal constituant du ciment à savoir le clinker. Après durcissement, Cette pâte de ciment conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le clinker Portland est obtenu après cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %). Comme indiqué dans le Tableau 1.1, le clinker contient des proportions définies des éléments suivants CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Tableau 1.1: Principaux minéraux contenus dans le clinker.

Appellation	Symbole chimique	Noté*	Proportion % massique
Silicate tricalcique-alite	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	60-65
Silicate bicalciquebélite	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	10-20
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8-10

* Notations admises par les industriels du ciment.

En vue de réguler la prise rapide du clinker, les industriels rajoute en faible quantité des sulfates de calcium communément appelé le gypse. Selon la teneur en clinker et d'éventuels ajouts, cinq types de ciment courant sont définis par la norme NF EN 197-1 [6]. Le ciment Portland ordinaire représente le ciment le plus communément utilisé.

3. 3. EAU DE GACHAGE

L'eau est un facteur qu'il convient de choisir avec le plus de soin car les conséquences d'une quantité faible ou abondante sont importantes sur la qualité du béton obtenu. La quantité d'eau de gâchage doit être choisie en fonction du mode de mise en œuvre. Il en faut relativement beaucoup pour des bétons coulés en paroi mince, moins s'ils sont pilonnés et beaucoup moins encore s'il s'agit de béton vibrés.

4. FORMULATION DU BETON

Pour fabriquer 1m^3 de béton, nous adoptons une formulation qui permet de définir les proportions précises de chacun des ses constituants. Il existe différentes méthodes de formulation. Toutes ces méthodes ont pour but l'optimisation des mélanges des différents constituants à savoir : sable, gravillons, ciment, eau et éventuellement des adjuvants afin d'obtenir les propriétés mécaniques ou de mises en œuvre recherchées [10,11].

5. REACTION D'HYDRATATION DU CIMENT

Durant le processus d'hydratation du ciment, il y a formation d'hydrates dont les principaux sont présentés dans le tableau 1.2.

- ⊕ Les silicates de calcium hydratés ; Se présentent sous la forme de feuillets. Les silicates de calcium hydratés sont responsables du développement des résistances mécaniques de la matrice cimentaire.
- ⊕ La portlandite : Des cristaux, dont la taille varie de quelques microns à quelques centaines de microns. Ces cristaux se présentent sous la forme de plaquettes hexagonales. La portlandite est à l'origine du pH élevé de la solution interstitielle du béton.
- ⊕ L'ettringite : Se présente sous la forme d'aiguilles hexagonales.
- ⊕ Le monosulfoaluminate : Se présente sous la forme de plaquettes hexagonales.

Tableau 1.2: Principaux minéraux contenus dans le clinker.

Appellation	noté	Proportion % massique
Silicates de calcium hydratés	C-S-H	60-70
Portlandite	CH	20-25
Ettringite	AFt	-
Monosulfoaluminate	AFm	-

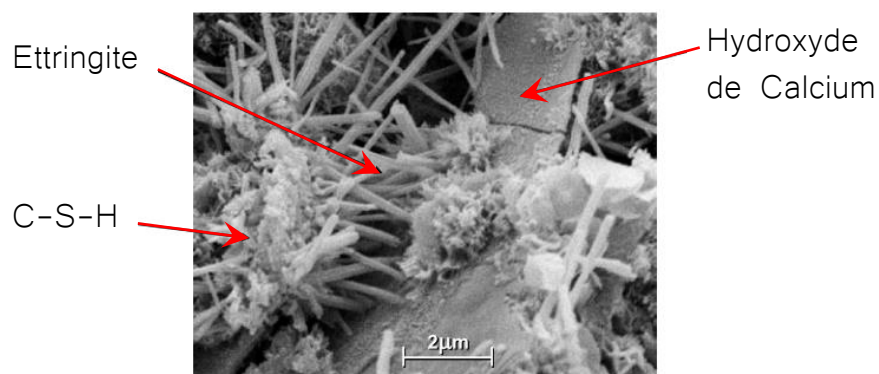


Figure 1.2 : Image MEB des produits de l'hydratation du ciment

6. LE BETON ARME

Les diverses actions auxquelles sont soumis les ouvrages de génie civil engendrent dans leurs différents éléments constitutants, un ensemble de contraintes. Dans le cas des ouvrages en béton, sa résistance à la compression lui permet d'équilibrer correctement les contraintes de compression. Cependant en raison de sa faible résistance à la traction, il n'en est pas de même pour les contraintes de traction.

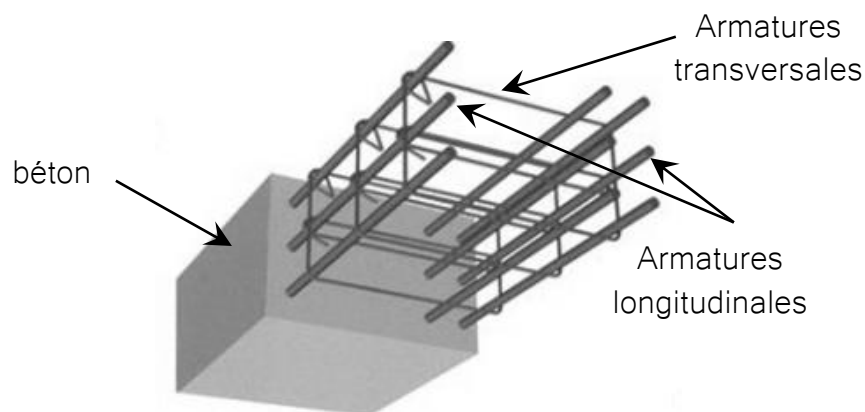


Figure 1.3 : Schéma d'un élément en béton armé

Pour rendre possible son utilisation dans les structures de génie civil en particulier dans les zones tendues des structures, on introduit des renforts sous forme de barres ou de treillis soudés en acier. Ce dernier à savoir l'acier, est un matériau qui présente une très bonne résistance à la traction. Ainsi, dans cette association appelée le béton armé, chaque constituant joue son rôle au mieux de ses performances : le béton travaille en compression et l'acier en traction. Cette association béton-acier a pu être possible, grâce d'une part à la forte adhérence entre ces deux matériaux. D'autre part, grâce à la faible différence de leur dilatation thermique à savoir 10^{-5} pour le matériau béton et 1.1×10^{-5} pour le matériau acier.

La disposition, et la quantité d'armatures nécessaires sont déterminées par un calcul en prenant en compte diverses considérations à savoir ; le mode de sollicitation de la structure étudié à travers la répartition des contraintes, la loi de comportement des matériaux et les dispositions constructives dictées par les règlements en vigueur. D'une manière générale, le béton est employé en association avec des armatures en acier appelées armatures passives dans le cas du béton armé en opposition aux armatures actives dans le cas du béton précontraint.

7. LES PATHOLOGIES DU BETON

L'analyse des ouvrages de génie civil existants a montré que les propriétés physico-mécaniques du matériau béton et des armatures en aciers qui servent de renforts peuvent subir des désordres et se dégrader au fil du temps. La nature et l'ampleur de ces désordres dépendent des conditions auxquelles sont soumis ces ouvrages autrement dit de l'environnement dans lequel évolue l'ouvrage [18].

Les principales causes des désordres dans les ouvrages sont diverses. A travers l'organigramme de la figure 1.4, nous résumons les principales causes de ces désordres à savoir : Les causes mécaniques, les causes physiques et enfin les causes chimiques.

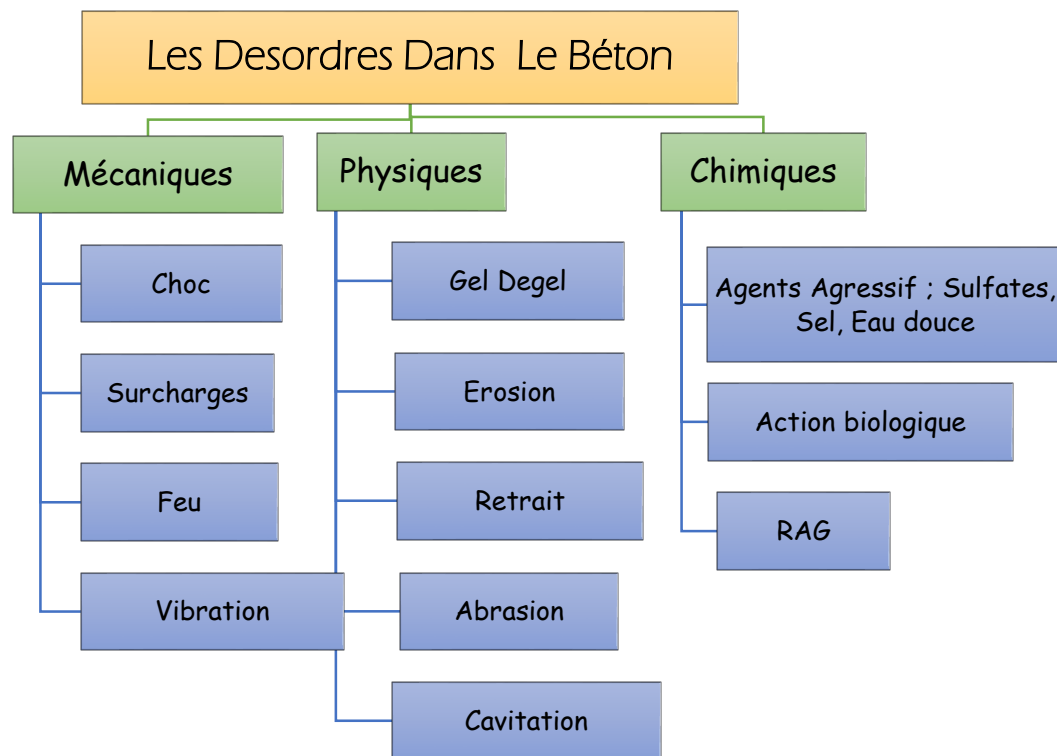


Figure 1.4 : Récapitulatif des causes de désordres dans le béton.

En plus des causes présentées précédemment, Les désordres dans les ouvrages peuvent être le résultat de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre du béton [9,3]. Dans ce qui va suivre, nous allons présenter d'une manière sommaire les principales pathologies qui apparaissent dans les éléments en béton et les éléments en béton armé.

7.1. LES CAUSES MECANIQUES

Ce type de désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle [14].

7.1.1. LES CHOCS

Suite à un choc résultant engendré par des engins de transport ou de levage et des outils, le béton éclate.

7.1.2. LES SURCHARGES

Cela concerne particulièrement les ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné l'apparition des fissures et l'éclatement du béton.

7.1.3. LE FEU

Le béton est un matériau incombustible et conduit relativement mal la chaleur. Par conséquent, Il présente de bonnes propriétés isolantes lorsque le feu est d'importance moyenne. Dans le cas d'un sinistre où le béton est exposé à des températures trop élevées, il peut se produire ce qui suit :

- ⊕ Pertes des caractéristiques du liant,
- ⊕ Dilatation des agrégats, entraînant la fissuration du béton,
- ⊕ Diminution des caractéristiques des aciers.

A titre d'exemple, suite à d'un incendie, sous de très fortes élévations de température, il y a éclatement du béton. La perte de résistance peut atteindre 20 % pour une température de 300 °C. À partir de 900°C, le matériau est considéré comme détruit [43].

7.1.4. LES VIBRATIONS

Le mouvement d'oscillation engendré par le passage d'engins lourds et par une machine engendre l'apparition des fissures et l'éclatement du béton.

7.2. LES CAUSES PHYSIQUES

7.2.1. LES CYCLES GEL/ DEGEL

Suite à l'exposition à un nombre important de cycles gel/dégel, le béton peut se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas par exemple des ouvrages réalisés en montagne ou du béton utilisé pour la réalisation des chambres froides [15]. Lors d'une chute importante de température, l'augmentation du volume de la glace engendre une augmentation de la pression interne comme illustrer sur la Figure 1.5. Lorsque cette pression interne dépasse la capacité portante (résistance limite) du matériau, des fissures internes se développent, généralement initiées au niveau de la porosité [21].



Figure 1.5 : Effet du gel de l'eau sur le béton [42]

7.2.2. ABRASION

Suite au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, une usure accompagnée d'une perte de matière apparaît sur l'élément ayant subi l'abrasion.

7.2.3. EROSION

Se manifeste par une perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.

7.2.4. CAVITATION

Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

7.2.5. LE RETRAIT

Le retrait est défini comme une contraction du volume de la pâte, qui si elle est empêchée crée des contraintes internes de traction qui peuvent causer la fissuration de la pâte. Le retrait se manifeste donc par une variation dimensionnelle dans le temps qui se produit en l'absence de tout chargement. En pratique, les éléments structuraux possèdent une ou deux dimensions nettement plus petites que la troisième où les effets du retrait sont les plus sensibles [19]. Les différents retraits sont résumés dans la Figure 1.6 ci-dessous. Le risque de fissuration associé au phénomène du retrait du béton est présenté dans le Tableau 1.3.

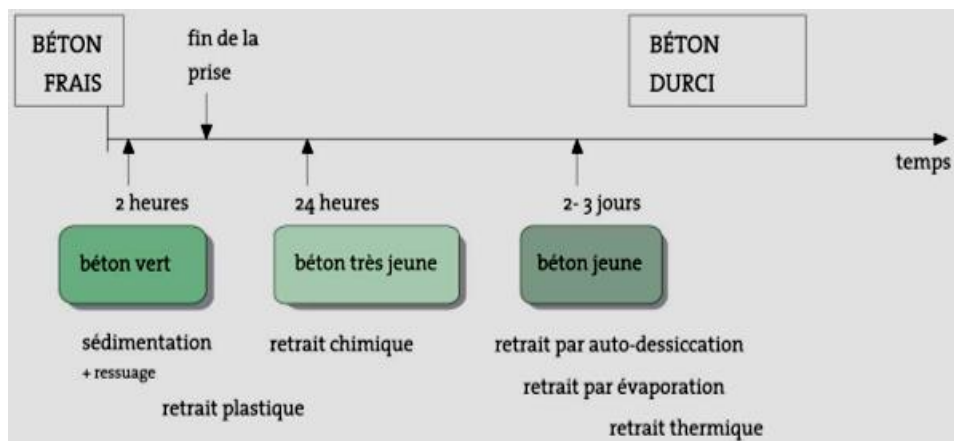


Figure 1.6 : Différents type de retrait du béton [41]

Tableau 1.3 : Risques de fissuration en fonction du Type de Retrait [41]

Type de retrait	Risques de fissuration		Utilité / Efficacité de diverses mesures		
	Délai d'apparition	Types de fissures	Composition du béton	Cure	Armatures
Retrait plastique	avant ou pendant la prise	superficielles	faible	très élevée	nulle
Retrait par (auto) dessiccation, c.-à-d. consommation de l'eau du béton durant le durcissement (retrait endogène) ou séchage du béton durci (retrait hydraulique)					
• à court terme	quelques jours à quelques semaines après bétonnage	superficielles à traversantes	très élevée	très élevée	moyenne
• à long terme	quelques mois à quelques années après bétonnage	traversantes	très élevée	élevée	très élevée
Retrait thermique	15 h à 10 jours après bétonnage	superficielles à traversantes	élevée	très élevée	moyenne

7.3. LES CAUSES CHIMIQUES

Le béton est classé d'un point de vue chimique comme un matériau basique. Il est ainsi considéré comme un milieu vulnérable aux attaques acides. Lorsqu'il est bien conçu et avec une bonne mise en œuvre, il présente une très bonne résistance à la plupart des attaques chimiques. Les dégradations du béton peuvent résulter de plusieurs processus chimiques causées par des agents extérieurs ou internes, se traduisant généralement par deux types d'altérations : érosion, gonflement et fissuration : formation de composés expansifs [41]. Notons que les substances nuisibles n'agissent généralement qu'en présence d'humidité. La détérioration du béton par réactions chimiques est synthétisée dans l'organigramme de la Figure 1.7.

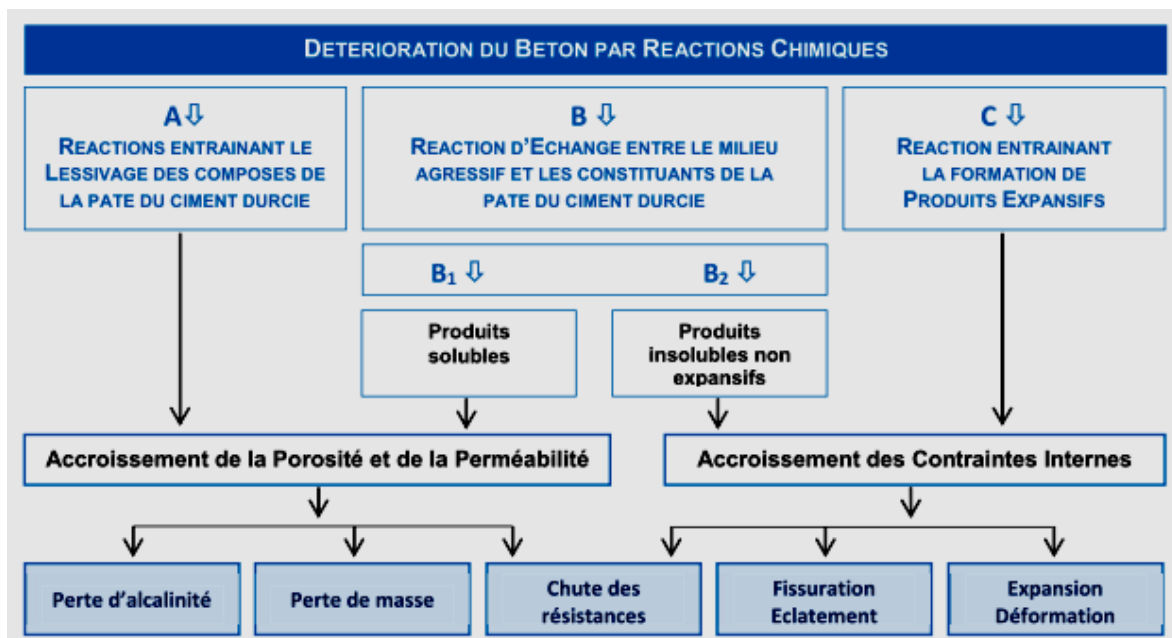


Figure 1.7 : Détérioration du béton par réactions chimiques [41].

7.3.1. REACTIONS ALCALIS-GRANULATS (RAG)

La réaction alcali-granulats est une réaction chimique à évolution lente entre certains granulats dits « réactifs » et les alcalins normalement présents dans la solution interstitielle du béton ou amenés par des agents extérieurs. Cette réaction conduit à la formation d'un gel de silicate suivie d'un gonflement du béton qui provoque une fissuration importante et une perte de résistance considérable [15]. La réaction alcalis-granulats (RAG) résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (Provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...) et des granulats potentiellement réactifs

(C'est-à-dire sensibles aux alcalis) qui contiennent de la silice réactive (acide silicique) se présentant sous forme d'opale, de calcédoine, de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin. C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice. En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures [14].



Figure 1.8 : Phénomène d'alcali-granulat [14]

7.3.2. ATTAQUES SULFATIQUES

Les sulfates présentes dans l'environnement des ouvrages de génie civil (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite. Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante. En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-SH), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton [16].

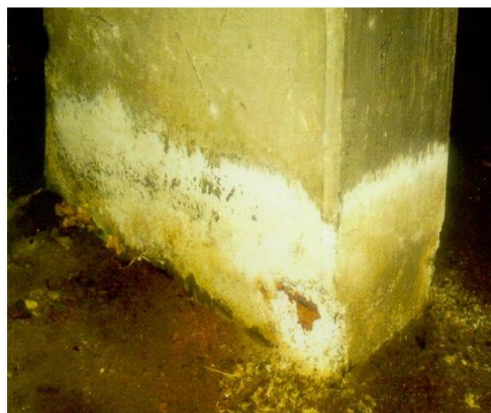


Figure 1.9 : Phénomène d'attaques Sulfatiques [16]

7.3.3. LA LIXIVIATION :

Les eaux issues du ruissellement de la pluie, de l'eau de mer, des eaux souterraines et de la neige sont en général moins basiques. Ainsi elles peuvent affecter les ouvrages de génie civil avec lesquels elle sont en contact. En effet, la pâte de ciment contenue dans le béton est fortement basique avec un pH autour de 12,5. Elle est composée de 15 à 20% de portlandite, de silicates de calcium hydratés, d'aluminates et de sulfoaluminates de calcium hydratés. Lorsqu'elle rencontre ces eaux cela entraîne un déséquilibre entre le milieu extérieur et le béton. Ceci produit des sels insolubles ou solubles (ce qui est plus préjudiciable) puisque la dissolution est associée à un lessivage de la chaux très soluble dans l'eau. C'est ce que l'on appelle la lixiviation. Ce phénomène s'accroît si le béton contient beaucoup de chaux comme le ciment Portland pur. Il entraîne des dégradations et une fragilisation du matériau en augmentant la porosité interne et en diminuant les propriétés mécaniques du béton [12].



Figure 1.10 : Phénomène de lixiviation des liants [12]

7.3.4. ATTAQUES ACIDES

le béton comme milieu basique présente une réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone ...etc [17]. Nous présentons sur la Figure 1.11 un exemple d'attaque acide sur un élément en béton armé.



Figure 1.11 : Phénomène de d'Attaques Acides [17]

7.3.5. ATTAQUES PAR LES IONS CHLORURES

Les ions chlorures lorsqu'ils sont présent au sein d'un ouvrage représentent une source importante de dégradation en particulier dans le cas des ouvrages en béton armé. En effet, Les ions chlorures pénètrent dans les pores ou par diffusion et provoquent, au-delà d'une certaine concentration, une destruction locale du film de passivation au niveau des armatures. Cette dépassivation permet par la suite un amorçage du processus de corrosion au niveau des armatures en acier présentes dans le béton [21]



Figure 1.12: Poutre située en bord de mer [38]

7.4. LA CORROSION DES ARMATURES

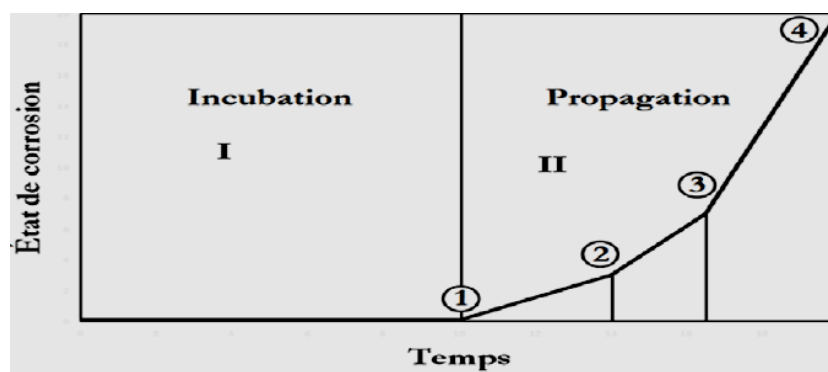
La corrosion est le résultat des interactions physico-chimiques entre les métaux et l'environnement où ils évoluent. Cela s'accompagne souvent par la modification des propriétés du métal. Il en résulte une dégradation des propriétés physico-mécaniques du métal corrodé. Evans puis WAGNER et TRAUD sont les premiers à avoir défini la corrosion, en présence d'une phase liquide, comme un processus électrochimique [3]. La corrosion des armatures dans le béton a principalement lieu à la suite de la carbonatation du béton d'enrobage et de la pénétration des chlorures [24]. Le dioxyde de carbone réagit avec les hydrates de la pâte de ciment en produisant un abaissement du PH qui conduit à une déstabilisation de la couche passive formée à la surface de l'acier. Les ions chlorures pénètrent dans la structure poreuse du béton et peuvent atteindre l'armature.

S'ils sont présents en quantité suffisante autour de la couche passive, ils forment des complexes avec les ions métalliques et déplacent

les molécules d'eau. Ces produits diffusent ensuite dans la solution interstitielle. La corrosion ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'humidité relative comprise entre 70% et 80%. Lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative <40% et donc absence d'électrolyte), ou lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène), la corrosion ne se produit pas [25,26]. La corrosion de l'acier dépend aussi d'autres facteurs comme le rapport Eau/Ciment, le type de ciment, les additions minérales, la qualité de l'interface acier-béton, l'épaisseur d'enrobage, la température, le PH, le potentiel de l'acier, les hétérogénéités de la surface de l'acier, etc... [26,27].

7.4.1. AMORÇAGE ET PROPAGATION DE LA CORROSION

Dans la solution interstitielle du béton sain, les ions Fe^{2+} , produit de la réaction anodique [2], peuvent rester sous la forme $Fe(OH)_2$ ou être oxydés en ions Fe^{3+} (qui se trouvent sous la forme $Fe(OH)_3$, formant le mince film passif à la surface de l'acier). Dans ce cas, l'acier est protégé et il n'y a pas de dommages détectables dus à la corrosion. La dépassivation de l'acier dans le béton se produit le plus souvent par l'action de deux agents qui peuvent se présenter simultanément : le dioxyde de carbone, CO_2 (carbonatation) et la présence de chlorures au niveau des armatures.



- (1) dé passivation des armatures, (2) apparition des fissures,
(3) éclatement du béton en parement et (4) ruine

Figure 1.13 : Diagramme de Tutti modifié [29]:

Selon Tutti et Baroghel-Bouny [28,29], le processus de corrosion des aciers dans le cas d'un béton initialement sain s'effectue généralement en deux phases (Figure 1.10). La phase d'initiation : phase d'incubation

(phase I) : l'acier est stabilisé par la couche de passivation qui empêche la formation de rouille, mais au cours de cette période, les agents agressifs pénètrent dans la structure poreuse du béton d'enrobage. La phase d'amorçage ou de propagation (phase II) correspondant à la dépassivation progressive de l'acier lorsque les agents agressifs ont atteint l'interface acier- béton. Durant la deuxième phase se produit la propagation de la rouille produite par les réactions d'oxydation à la surface du métal.

7.4.2. CORROSION EN MILIEU SALIN DES ACIERS

La pénétration des ions chlorures dans un élément en béton peut engendrer des désordres importants. Par conséquent, elle constitue un danger pour les ouvrages puisqu' à terme elle peut entraîner sa ruine. Lorsque les ions chlorures arrivent en quantité suffisante au niveau de la surface de l'armature enrobée, ils engendrent des modifications physicochimiques à la surface de l'armature ce qui entraîne l'initiation et le développement du phénomène de la corrosion. Les ions chlorures pénètrent et atteignent les armatures en aciers à travers la porosité ouverte du béton d'enrobage. Ils vont provoquer une destruction de la couche de passivation et par conséquent l'initiation de la corrosion par dissolution de l'acier. De nombreuses études [30], ont mis en évidence l'existence d'un seuil critique de la concentration des ions chlorures à la profondeur des armatures. Ce seuil critique peut s'exprimer sous la forme d'un taux critique de chlorures totaux par masse de ciment ou d'un rapport critique $[Cl^-] / [OH^-]$ (Figure 1.14)

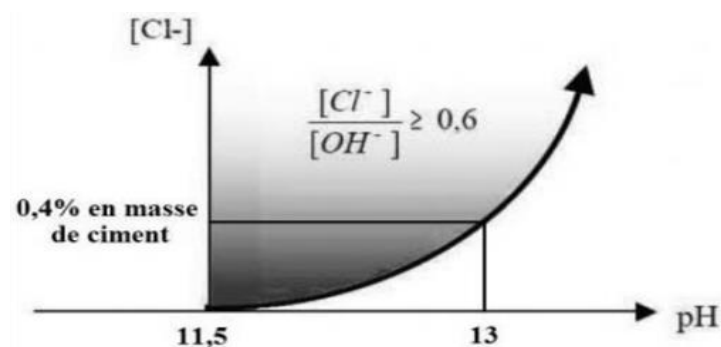


Figure 1.14 : Profil d'initiation de la corrosion en fonction du rapport $[Cl^-]/[OH^-]$ (Source : COTITA) [30]

Ces variations proviennent essentiellement des conditions expérimentales pouvant être très différentes : l'ajout de chlorure de sodium dans la composition du béton [31], les conditions d'exploitation (cycle

immersion-séchage, température, humidité relative), la corrosion générée par courant induit [32], les rapports eau/ciment variables [33]. La durabilité des armatures du béton armé est assurée par l'enrobage du béton sain caractérisé par un milieu basique (pH= 12 à 13). Dès que cette condition n'est plus remplie, autrement dit le pH du milieu diminue, il y a initiation et développement du phénomène de la corrosion de l'acier formant ainsi une rouille gonflante. Nous présentons sur la Figure 1.15 Les facteurs qui doivent être réunies pour que la corrosion des armatures puisse avoir lieu [15].

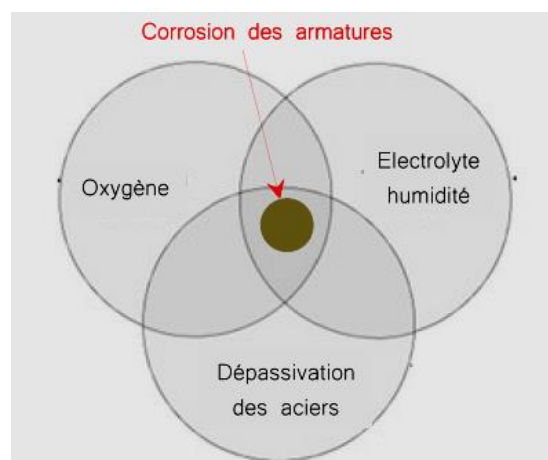


Figure 1.15 : Facteurs de corrosion [15]

7.4.3. CHLORURES ET CORROSION DES ARMATURES DANS LE BETON

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation du béton. Les deux mécanismes les plus courants contribuant au développement de la corrosion sont la pénétration des chlorures et la carbonatation du béton. La corrosion de l'acier dans le béton est un processus électrochimique naturel, lié à la tendance partagée par tous les métaux de revenir à leur état naturel de minerai (36). En se corrodant, la surface de l'acier fonctionne comme une électrode mixte formée d'anodes et de cathodes reliées électriquement par le corps de l'acier lui-même, il est alors considéré comme le siège de réactions parallèles et simultanées. L'eau interstitielle dans le béton fonctionne comme un complexe électrolytique, par conséquent, en présence d'anions agressifs, un accroissement du fonctionnement en pile de corrosion se produit, accompagné d'un potentiel électrochimique à la surface de l'acier, comme illustré sur la Figure 1.16 [37,26,24].

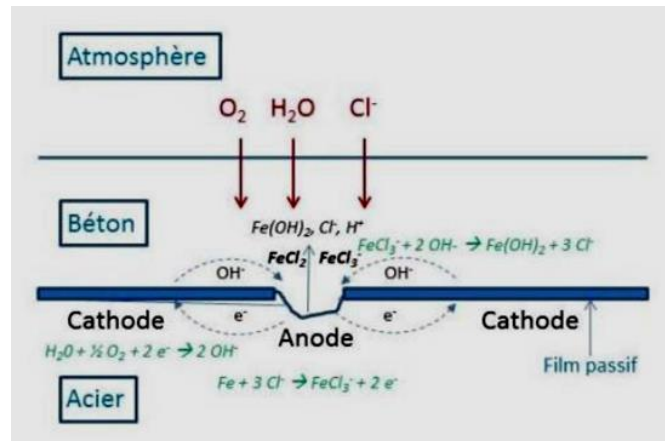


Figure 1.16 : Corrosion par les chlorures, mise en évidence des zones cathodiques saines et anodiques corrodées (Source : CERIB)[30].

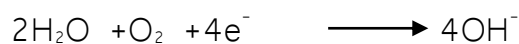
7.4.4. NATURE ELECTROCHIMIQUE DE LA CORROSION

La corrosion des armatures en acier dans le béton est un processus électrochimique qui implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique pour constituer une pile électrochimique. La création de ces piles sur l'armature conduit à la dissolution du métal dans les zones anodiques selon la réaction d'oxydation :

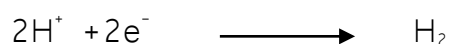


Les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés à la cathode par la réaction cathodique :

En présence d'oxygène :



En l'absence d'oxygène :



Ensuite, les ions ferreux réagissent avec les ions OH^{-} pour former de l'hydroxyde ferreux



7.5. AUTRES CAUSES DE DEGRADATION DES BETONS

Nous avons montré à travers les exemples donnés ci-dessus, que le matériau béton subissait des désordres engendrés par les différents milieux dans lesquels il évoluait. En effet, le béton en service, subi des agressions physiques et chimiques. Les études ont montré qu'en plus de ces agressions physiques et chimiques, d'autres causes essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à l'apparition de désordres dans le béton.

7.5.1. MAUVAIS POSITIONNEMENT DES ARMATURES

La mise en place des armatures est un élément très important lors de la mise en œuvre des éléments en béton armé. En effet, les armatures placées trop près du parement lors du coulage du béton provoquent à terme des fissurations de surface.

7.5.2. MAUVAISE QUALITE DU BETON

Sur chantier, lors de la réalisation d'un ouvrage il se peut que le béton utilisé a été mal mis en œuvre à savoir un béton trop faiblement dosé en ciment, béton mal vibré...etc. Dans ce cas, l'ouvrage présentera nécessairement des désordres : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles...

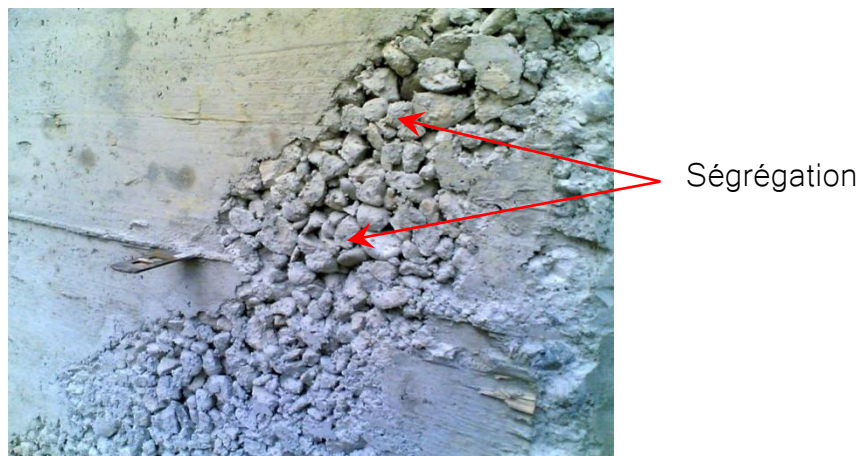


Figure 1.17 : Exemple de désordre du à une mauvaise mise en œuvre du béton : mauvaise vibration du béton.

7.5.3. VIBRATION TROP IMPORTANTE

Lors de la mise en œuvre, lorsque le béton subit une vibration trop longue, ça peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

7.5.4. ABSENCE DE CURE DU BETON

La cure du béton est une étape indispensable en particulier dans le cas d'un climat chaud et venté. Dans le cas où un élément en béton n'est pas protégé, il se faïence en surface.

7.5.5. CYCLE HUMIDITE / SECHERESSE

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse provoquent dans les éléments en béton des variations dimensionnelles. Ceci peut engendrer la fissuration du béton. Ceci a pour conséquence la possibilité de la corrosion des aciers.

7.5.6. ENROBAGE

Un enrobage suffisant permet au béton de protéger les armatures. En effet, lorsque l'enrobage est suffisant, il y a moins de risque de corrosion des armatures.

8. MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DU BETON

Tout le long de leur durée de vie, les ouvrages de génie civil sont soumis en service à différents types d'agressions. D'origines thermique, chimique, ou mécanique, ces agressions entraînent le vieillissement de l'ouvrage qui se traduit par une dégradation des propriétés initiales du matériau [21]. Dans le cas des ouvrages en béton, cette dégradation se traduit dans un premier temps par le développement de microfissures. Celles-ci viennent s'ajouter à celles initialement induites par le mécanisme de prise. La fissuration du béton engendre dans un premier temps des problèmes d'ordre esthétique. Avec le temps, elle peut engendrer un problème de sécurité. En effet, les fissures jouent un rôle très important dans la cinétique de la corrosion puisqu'elles facilitent la pénétration d'agents agressifs [22]. Il est utile de noter que malgré la présence des aciers de renforcement pour reprendre les contraintes à la traction dans les éléments en béton armé, les fissures ne sont pas éliminées [23]. Par la

suite, pour un niveau de sollicitation plus élevé, l'endommagement se traduit par la génération de macro fissures qui, à terme, peuvent conduire à la rupture totale de l'ouvrage [21].



Figure 1.18 : Endommagement d'une structure causé par la corrosion [21]



a) horizontale



b) oblique



c) verticale

Figure 1.19 : Différents types de fissurations [21]

9. DURABILITE ET DUREE DE VIE D'UN OUVRAGE

La durabilité d'un ouvrage d'une manière générale qu'il soit en béton ou en tout autre matériau est définie comme étant son aptitude à remplir convenablement la mission pour laquelle il a été réalisé. C'est ce que l'on appelle « la tenue en service ». Pour chaque ouvrage, elle représente une caractéristique importante, notamment pour les ouvrages de génie civil importants et stratégiques ; ponts, silos, réservoirs, barrages... En effet, dans le cas de la dégradation de ce types d'ouvrages, les conséquences sont diverses et graves à savoir, surcoûts de maintenance (réparation), durée de vie écourtée de l'ouvrage, et dans des certains cas extrêmes la ruine partielle ou totale de l'ouvrage (perte totale de l'ouvrage). Ceci nous ramène à dire que, la prise en compte préventive et anticipée des facteurs qui peuvent affecter la durabilité d'un ouvrage, et par conséquent

son aspect économie et sécuritaire, est impérative lors de l'étape de la conception et de l'élaboration. La durabilité d'un ouvrage quelconque dépend de son comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où il est construit. En effet, les ouvrages de génie civil sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques et mécaniques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante la mission pour laquelle ils ont été réalisés et ce durant leur durée de vie. Dans le cas des ouvrages en béton armé, la durabilité est liée à la pénétration des espèces agressives, non seulement dans le réseau poreux, mais également dans les fissures [13]. D'après l'Eurocode [20], La durée de vie des structures en béton, et notamment celles en béton armé, est fonction de deux périodes qui gouvernent les processus de dégradation des matériaux à savoir la période d'incubation et la période de propagation.

10. DIAGNOSTIC DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL

Le diagnostic dont le schéma est décrit dans la Figure 1.20, est défini comme étant l'ensemble de techniques qui ont pour objectif l'évaluation de l'état d'un ouvrage donné. L'évaluation peut se faire sur l'ouvrage en entier ou sur un élément particulier de cet ouvrage. Ainsi, le diagnostic permet d'évaluer la stabilité globale et partielle de l'ouvrage expertisé. Ceci permettra d'une part d'analyser et de déterminer les causes affectant cette conception. D'autre part ceci permettra, à la fin d'envisager une intervention à savoir une réparation, un renforcement, une réhabilitation ou une destruction.

11. TECHNIQUES DE REPARATION ET DE PROTECTION DES OUVRAGES EN BETON ARME

La réparation d'un élément en béton ou en béton armé dans un ouvrage de génie civil est une opération qui exige des matériaux qui présentent d'une part une durabilité suffisante afin d'assurer une bonne tenue mécanique. D'autre part une compatibilité avec le support béton afin d'obtenir une bonne interaction entre le béton dégradé et le renfort utilisé. Nous pouvons citer à titre d'exemple quelques matériaux utilisés à savoir le béton conventionnel, la résine époxy et les matériaux composites. Nous présentons dans la Figure 1.21, quelques techniques de réparations et de protections des ouvrages.

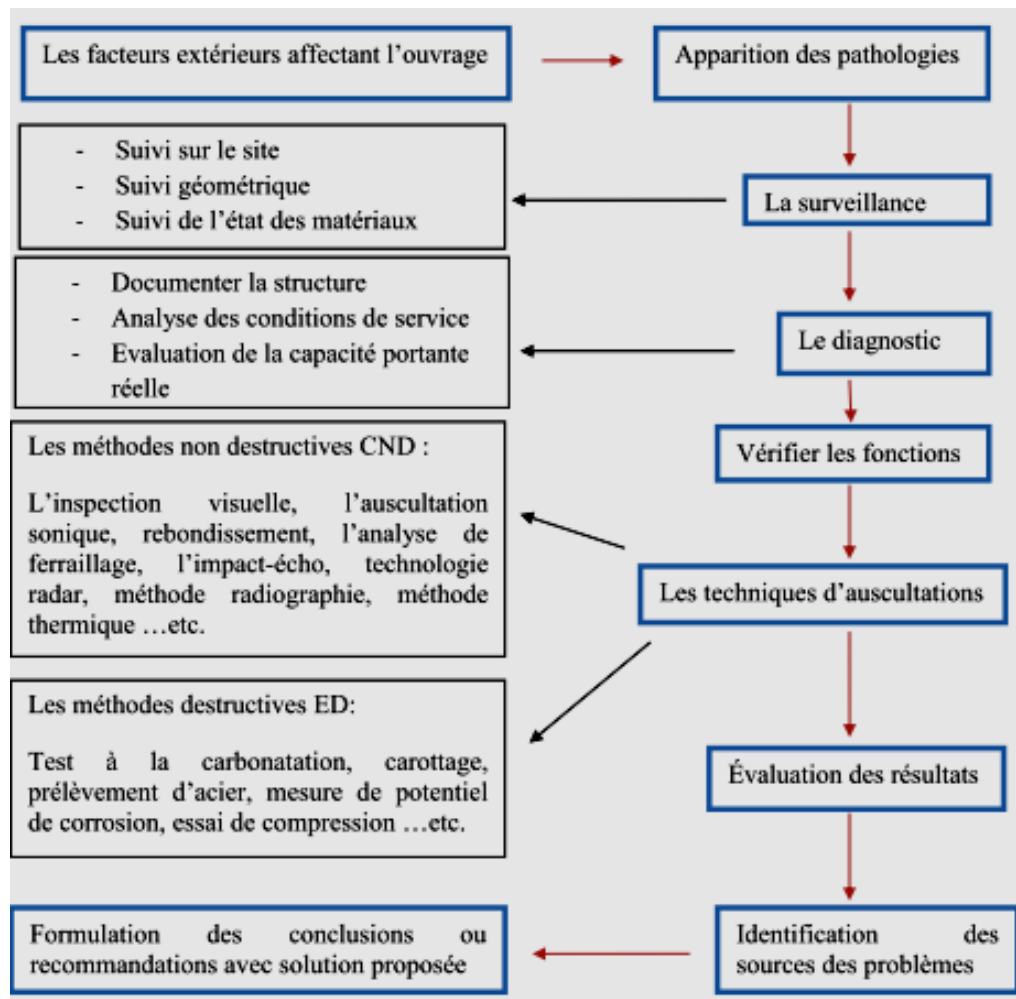


Figure 1.20 : Schéma des étapes du diagnostic d'un ouvrage en béton armé [39].

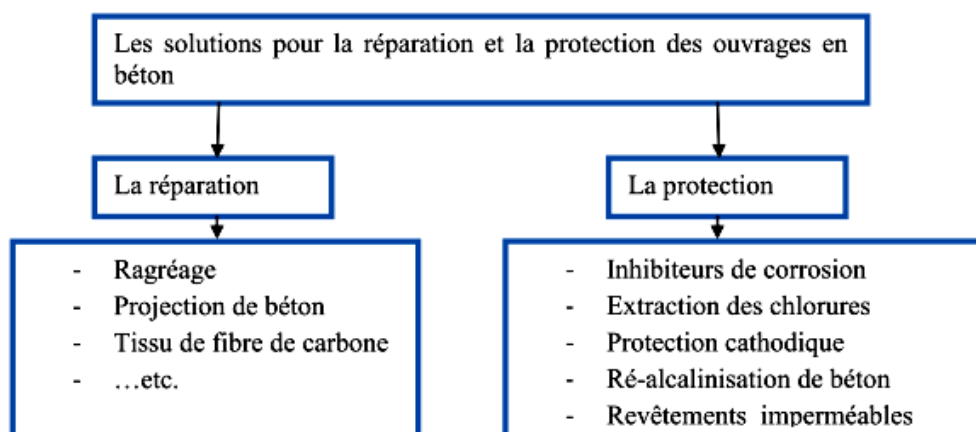


Figure 1.21 : Quelques techniques de réparations et de protections des ouvrages [39].

12. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

De nombreux travaux se sont intéressés à l'analyse expérimentale du comportement des ouvrages en béton et béton armé dans différents environnements. Les travaux de Chérifi et al [44] ont pour objectif principal de mettre en exergue l'importance de la prise en compte des méthodes non destructives dans la prévention et la lutte contre les dégradations des structures en béton armé provoquées par les ions de chlorures. Ils ont réalisé un programme expérimental, sur un béton armé afin d'évaluer son potentiel de corrosion dans le temps.

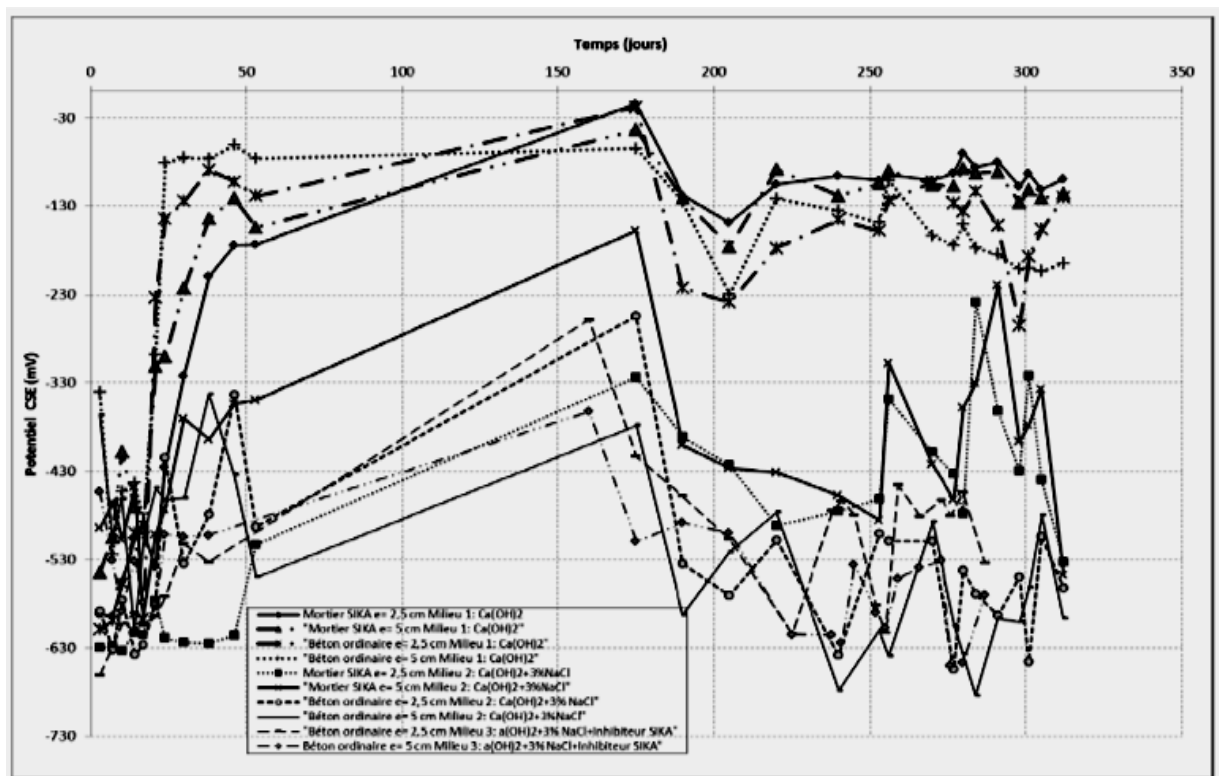


Figure 1.22 : Evolution du potentiel en fonction du temps pour un béton ordinaire et mortier dans 3 différents milieux [44].

L'étude de A. Attar et al [45] se concentre sur deux enquêtes distinctes sur les principaux mécanismes de vieillissement : la réactivité alcali-silice (ASR) et la corrosion du béton d'acier d'armature (barres d'armature).

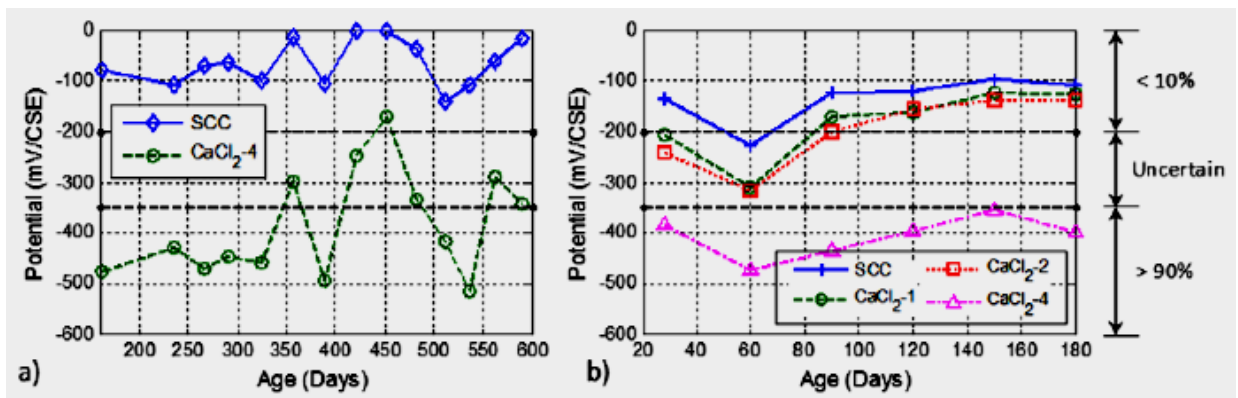


Figure 1.23 : Evolution du potentiel en fonction du temps pour un béton dans différents milieux [45].

Les résultats indiquent que l'ajout d'hydroxyde de sodium et de chlorure de calcium peut accélérer efficacement la formation de fissures et propagation dans le béton en raison de l'ASR et de la corrosion des barres d'armature, respectivement [45].

Le travail de A. Zaki et al [46] a consisté à donner un bref aperçu des méthodes non destructives (NDT) pour surveiller et évaluer la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé.

Les travaux de F. B. Castillo et al [47] présentent la conception et la construction d'un système de surveillance à distance pour déterminer la probabilité et le taux de corrosion des barres d'armature encastrées dans le béton. Ils utilisent la technique de la norme ASTM C876 pour la probabilité de corrosion et la méthode de résistance à la polarisation linéaire pour obtenir indirectement le taux de corrosion [47].

Tong et al [48] s'est intéressé à une étude expérimentale du comportement en fatigue des poutres en béton armé. Naus [49] s'est intéressé à la gestion du vieillissement des structures en béton des centrales nucléaires.

Ju et al [50] se sont intéressés à une Étude numérique et expérimentale du mécanisme d'écaillage thermique du béton de poudre réactive exposé à une température.

Xiong et al [51], s'est intéressé au comportement mécanique du béton fortement armé sous l'effet des températures élevées et aussi lorsqu'il est soumis au feu. Maes et al [52], s'est intéressé à l'étude de la résistance du béton et du mortier aux attaques des chlorures et des sulfates de sodium. Zhou et al [53] s'est intéressé à l'analyse de la corrosion induite par la carbonatation et par les attaques des chlorures dans les structures en béton armé. [54] Ma et al s'est intéressé à la

prédiction de la durée de vie en fatigue des poutres en béton armé en considérant des environnements corrosifs.

H. Dong et al [55] ont réalisé une étude qui avait pour but de rechercher les caractéristiques de corrosion des pieux CFRP-CFST dans des environnements chauds et humides, en utilisant le détecteur CANIN⁺ comme instrument de mesure du potentiel électrique avec la solution Cu-CuSO₄.

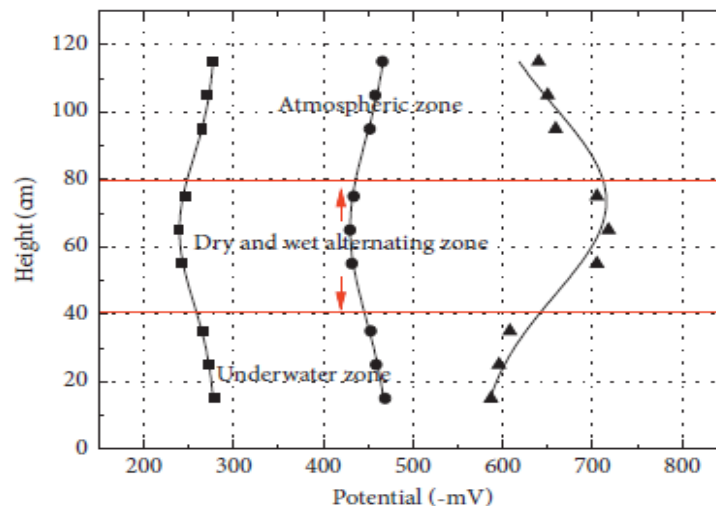


Figure 1.23 : Evolution du potentiel dans un pieu dans différents degrés de corrosion 5, 10 et 15% [55].

B. Kouddane et al [56] ont réalisé une synthèse sur la combinaison de techniques NDT, telles que le marteau à rebond et la vitesse d'impulsion ultrasonique, pour évaluer la résistance à la compression du béton.

M. Sosa et al [57] se sont intéressés à l'analyse des changements de contour du béton et d'interface acier-béton sur des échantillons exposés à l'eau de mer immergée en continu, alternés humide en eau de mer/sec à l'atmosphère et altération continue à l'atmosphère. Les éléments suivants : chlorure, calcium, fer, oxygène et magnésium ont été déterminés en utilisant l'analyse SEM/EDX. Les échantillons de béton immergés montrent une quantité élevée de chlorure à l'interface acier-béton, suivis de ceux exposés à des cycles humides-secs alternés, tandis que les échantillons atmosphériques ne présentent pratiquement pas cet ion.

F. Benmahiddine et al [58,59] ont mené des investigations numériques et expérimentales ont été menées sur la durabilité du béton de chanvre. Pour cela, un processus de vieillissement accéléré a été réalisé en utilisant des cycles d'immersion, de congélation et de séchage.

A. boniface et al [60] se sont eux intéressé à L'étude du comportement du béton sous l'effet de la température est primordiale afin d'évaluer le niveau de sécurité des structures sous sollicitations thermiques.

L. Chalah et al [61] ont évalué l'effet de l'attaque du chlorure de sodium sur les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons à hautes performances (BHP) à base de fibres et de pouzzolanes naturelles.

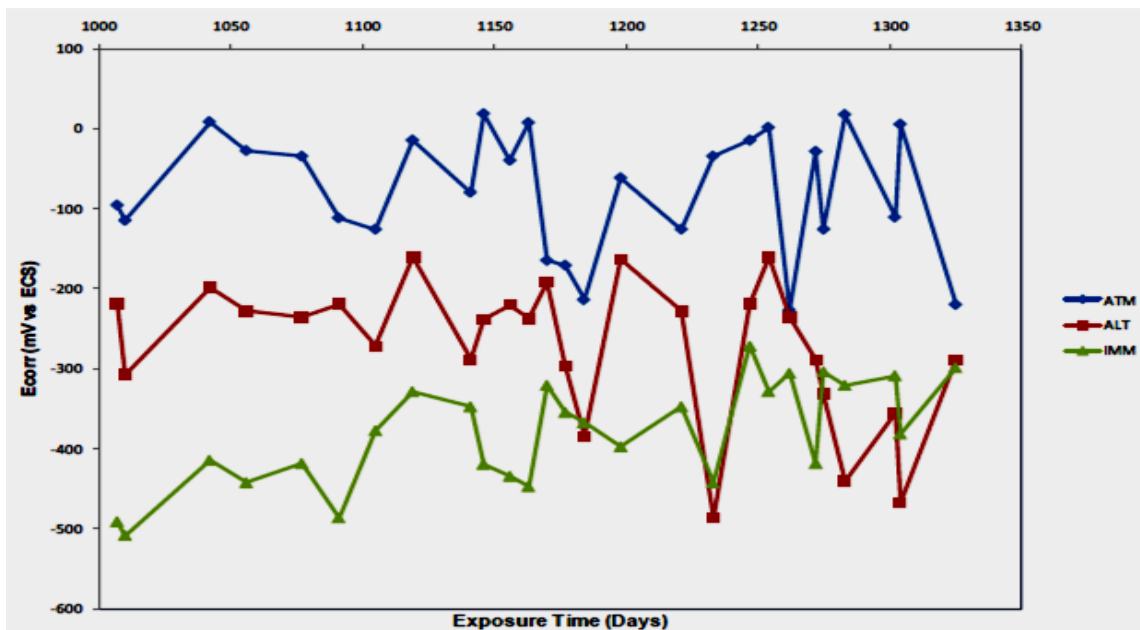


Figure 1.23 : Evolution du potentiel en fonction du temps d'exposition d'un béton pour différents milieux [57].

[62] Chen et al se sont intéressés à l'analyse de la résistance du béton sous l'effet combiné des attaques des chlorures et des sulfates. Les éprouvettes testées sont soumise à des cycles de mouillage (immersion) et séchage.

Mateo a et al [63] se sont intéressé à la technique LIBS qui a été utilisée pour la détermination de la concentration de Cl dans le mortier et le béton, comme méthode alternative à l'analyse chimique.

B. Richarda et al [64] ont réalisé une étude combinant approches expérimentale et numérique appliquées à un essai de corrosion accélérée sur un corps d'épreuve en béton armé. Ces résultats portent sur le suivi et la prédiction de l'évolution de la fissuration du béton sous l'effet de l'expansion des produits de corrosion.

Mellouk et Belabdelli [65] se sont intéressés à l'Utilisation du corrossimètre Canin+ pour déterminer le potentiel de corrosion dans les structures en béton armé.

L. Yu et al [66] ont étudié l'impact des défauts de l'interface acier-béton sur la propagation de la corrosion sur les poutres chargées en permanence

Le travail présenté par S. Millar et al [67] traite de la précision de la spectroscopie de claquage induite par laser (LIBS) dans la détermination de la teneur totale en chlorure dans les pâtes de ciment. LIBS comme méthode de spectroscopie d'émission est utilisée pour détecter simultanément plusieurs éléments présents dans les matériaux à base de ciment.

Le travail de bryukhova et al [68] propose une solution alternative pour déterminer le degré de dégradation des armatures par les produits de corrosion sans utiliser les lignes d'émission de chlore, plutôt les lignes d'émission des composants métalliques de l'acier d'armature, pour lesquelles les systèmes LIBS non fermés ont une bonne sensibilité et une grande précision.

Les travaux de J. MAI-NHU [69] ont eu pour objectif final l'élaboration d'un modèle simple et fiable permettant de considérer le couplage de tous les phénomènes importants liés à la durabilité des bétons, de la pénétration des espèces agressives à l'amorçage et à la propagation du phénomène de corrosion des armatures.

13. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, nous retenons que l'objectif principal de l'ingénieur génie civil est de concevoir une structure qui garantit la sécurité, le confort et la durabilité. Pour se faire, l'ingénieur doit avoir en tête les points principaux suivants :

- Durant leur durée de vie en service, les ouvrages de génie civil d'une manière générale et en particulier les ouvrages en béton armé sont assujettis à plusieurs phénomènes qui se manifestent par des désordres qui varient selon leur nature et leur ampleur. Ces désordres peuvent remettre en cause l'intégrité de l'ouvrage et réduire de ce fait sa durabilité. Dans certain cas, cela peut remettre en cause la sécurité des usagers.

- Les facteurs qui influent sur la durabilité des ouvrages de génie civil en béton sont nombreux et agissent aux différents stades du projet de l'ouvrage à savoir :
 - ⊕ Au stade de la conception :
 - Définir une conception de l'ouvrage qui doit garantir la protection des armatures et qui évite la création de zone de concentration de contraintes internes (optimisation).
 - Une formulation du béton qui répond aux exigences de l'environnement de l'ouvrage à réaliser.
 - ⊕ Au stade de la réalisation et de la mise en œuvre :
 - La maîtrise de la production du béton depuis le choix des constituants, son élaboration, son transport, sa mise en œuvre...etc,
 - ⊕ Au stade de l'exploitation de l'ouvrage ; surveillance et entretien de l'ouvrage.
- Identifier correctement ces facteurs, permettra, d'une part, la conception d'ouvrages sûres, durables et plus économiques. D'autre part, cela permettra de poser un diagnostic correct des désordres qui apparaissent dans les ouvrages et par conséquent proposer une solution de réparation fiable.

L'objectif de ce chapitre était d'une part de présenter le matériau béton armé et de donner quelques aspects physico-chimiques et mécaniques des différents phénomènes que peuvent subir les ouvrages en béton armé en service.

D'autre part, ce chapitre nous a permis de montrer que la dégradation des ouvrages en particulier la dégradation des éléments en béton armé a fait l'objet de plusieurs études antérieures. Les quelques travaux cités dans cette thèse, montrent que chacune des études considère des paramètres bien précis et utilisent des techniques de mesures bien précises.

Cela va à présent nous aider pour mettre en place notre protocole expérimental qui est scindé en deux parties. La première partie qui fera l'objet du chapitre 2 sera consacrée à l'étude expérimentale des colonnes courtes sous l'effet hygrothermo-mécanique. La deuxième partie qui fera l'objet du chapitre 3 sera consacré à l'étude expérimentale d'une poutre en béton armé sous l'effet hygro-thermomécanique et chlorures.



Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEN AMMAR Benkhadda.. Traitement naturel des mortiers et bétons destinés aux structures en béton préfabriqué. Université de BISKRA, 2006
- [2] Dario Redaelli. « Comportement et modélisation des éléments de structure en Béton Fibré à Ultra hautes performances avec armatures passives » thèse de doctorat n° 4298, l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse , 2009.
- [3]. NDZANA AKONGO Grégoire, TCHOUMI Samuel, « Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures », DIPET2 (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade), Génie Civil, Option: Bâtiment et Travaux, Université de Douala (Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique) ENSET.
- [4] Mekkaoui Alaoui Meryem « Etude du comportement de l'acier inoxydableUR45N et l'acier au carbone C38 dans différents milieux simulant le béton:», 2014
- [5] F. Collins. "Inclusion of Carbonation during the Life Cycle of Built and Recycled Concrete: Influence on their Carbon Footprint", International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 15, n°6, pp. 549-556, 2010.
- [6] NF EN 197-1. « Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », février 2001
- [7] T. Akçaoglu, M. Tokyay, T. Çelik. « Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behaviour of concrete under uniaxial compression", Cement and Concrete Composites, vol.26, n°6, pp. 633-638, 2004.
- [8] M. Lopez, Lawrence F. Kahn, and Kimberly E. Kurtis,"Effect of Internally Stored Water on Creep of High-Performance Concrete", ACI Materials Journal, vol. 105, n°3, pp. 265-273, 2008.
- [9] Nassima KHAL . Utilisation des méthodes non destructives pour la caractérisation des béton dans un environnementagressif ,2016
- [10]. D. Larrard, Variabilité des propriétés du béton : caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation, 2010
- [11]. Mathieu CHEKROUN, «Auscultation de la peau du béton par ondes Ultrasonores haute fréquence», thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, Sciences Pour L'Ingénieur Géosciences Architecture, 2008
- [12] VERVISCH-FORTUNÉ Isabelle, Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton, 2009
- [13] VERONIQUE BAROGHEL BOUNY, nouvelle approche de la durabilité du béton indicateurs et méthodes, édition de technique de l'ingénieure C 2 245.

- [14]. W. De Caluwé M. Le Begge, Réparation et protection des ouvrages en béton–Note d'information technique 231(CSTC) 2007. Page 7
- [15]. Valentine RINCKER,« Diagnostic de structures existantes. Du relevé visuel au confortement des ouvrages en passant par les moyens d'investigations des structures en béton.», INSA Strasbourg, groupe ingénierie Europe, Ginger CEBTP, 2009
- [16] W. De Caluwé, M. Le Begge, Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil) Note d'information technique 231(CSTC), 2007. Page 8
- [17] Durabilité des ouvrages en béton
- [18] LABIDI Nabil, Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons, thèse de Magister, Université de Guelma, 2013
- [19] Aïtcin, P. C., Neville, A., & Acker, P. (1998). Les différents types de retrait du béton. Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées,
- [20] XP ENV 1991-1, Norme Européenne : Euro code 1 : Bases de calculs et actions sur les structures et Document d'application nationale (Avant-propos national et Annexe nationale) - Partie 1 : Bases de calcul, AFNOR, 1996.
- [21] A. QUIVIGER, Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton). Approche linéaire et non linéaire ,2012
- [22] F. Paradis: Influence de la fissuration de béton sur la corrosion des armatures, Caractérisation des produits de corrosion formés dans le béton, thèse de Doctorat, 2009
- [23] Amjad Kriet, Prolongation de la durée de vie des ouvrages en béton armé, 2015
- [24] L. Ming Te, Ji Jie Lan. « Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure » Cement and Concrete Research, Vol .35, n°3, PP540-550 2005.
- [25] P. Pedferri, « Cathodic protection and cathodic prevention »Construction and Building Material, Vol.10, PP391-402, 1996
- [26] A. Shamsad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction –are view », Cement and Concrete Composites, Volume 25, 2003, PP459-471
- [27] P.K. Metha , Concrete Structures ,Properties and Materials , Prentice Hall ,New Jersey,pp449 ,1986
- [28] K. Tutti, Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Rapport 1982
- [28] V. Baroghel-Bouny, Nouvelle approche de la durabilité du béton, indicateurs et méthodes, Edition Technique de l'ingénieur, Base Structure et Gros oeuvre? Rubrique Béton Hydrauliques, référence C2245, 2005

- [29] C. Alonso, C Andrade, M .Castellated, and P. Castro, Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC. Cement and Concrete Research, vol, 30, PP. 1047 - 1055. (2000).
- [30] Bouchard Jean -Baptiste, Etude sur la durabilité des bétons armés en milieu marin. Application aux caissons du projet d'extension en mer au droit de l'Anse du Portier, Monaco , 2016
- [31] M.J.Katwan ,Corrosion of steel reinforcement in hot countries ,an acute case study , Materials and Structures ,vol ,34 ,pp, 360-366,2001
- [32] D. A. Hausmann, Steel corrosion in concrete: how does it occur? , Materials protection, Vol, 6, n°11.PP.19-23, 1967
- [33] T.U .Mohammed .Otsuki, M.Hisada , Corrosion of steel bars with respect to orientation in concrete , ACI Materials Journal ,vol ,96 ,n°2,pp .154-159,199
- [34] RILEM Technical Committee 124-SRC ,Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion ,Materials and Structures ,vol 27,pp .415-436 ,1994
- [35] ACI Committee 222 , Corrosion of metal in concrete ,Journal Proceeding ,vol ,82 n°1,pp. 3-32, 1985
- [36] J. Gulikers ,Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement , Materials and Corrosion vol,56 ,pp,393-403,2005
- [37] J. Avila -Mendoza, J.M. Flores, U.C.Castillo, Effect of superficial oxides on corrosion of steel reinforcement embedded in concrete, Corrosion, vol .50, pp.879-885, 2001.
- [38] BEDDIAR, Abdelhakim. Renforcement des Poutres en Béton Armé à l'Aide de Matériaux Composites. BISKRA. 2004
- [39] Chabbi R., Ferhoune N., Bouabdallah Fouzia. Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l'art. SIGC, Oran,2018.
- [40] Khezzane, A., GHORBEL, E., & BENOUIS, A. Effet du dosage du ciment et de la taille des granulats sur les propriétés d'un béton drainant. Academic Journal of Civil Engineering, 40(1), 166-169, 2022
- [41] SEBSADJI S. K., Pathologies des bétons, Université d'oran,
- [42] Documentation Technique de l'entreprise Holcim.
- [43] Documentation Technique GINGER-CEBTP,2016.
- [44] Chérifi W., Houmadi Y., Benali O. Corrosion des armatures : méthodologies de suivi de la durée de vie des ouvrages en béton armé.
- [45] Arezou Attar , Bora Gencturk , Hadi Aryan and Jianqiang Wei Impact of laboratory-accelerated aging methods to study alkali-silica reaction and reinforcement corrosion on the properties of concrete, 2020.

- [46] A. Zaki, H. K. Chai , D. G. Aggelis and NinelAlver Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique5 August 2015
- [47] Fr. B. Castillo, G. Roa-Rodríguez, C. Cabrera Cabrera, N. Sierra-Melo, W. Aperador : Determination of the probability and rate of corrosion on reinforced concrete specimens through a remote corrosion monitoring system.
- [48] Tong, L.; Liu, B.; Xian, Q.; Zhao, X.-L. Experimental study on fatigue behavior of Steel Reinforced Concrete (SRC) beams. Eng. Struct. 2016, 123, 247–262.
- [49] Naus, D.J. The management of aging in nuclear power plant concrete structures. JOM 2009, 61, 35–41.
- [50] Ju, Y.; Liu, J.; Liu, H.; Tian, K.; Ge, Z. On the thermal spalling mechanism of reactive powder concrete exposed to high temperature: Numerical and experimental studies. Int. J. Heat Mass Transf. 2016, 98, 493–507.
- [51] Xiong, M.-X.; Liew, J.Y.R. Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes. Mater. Des. 2016, 104, 414–427.
- [52] Maes, M.; De Belie, N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. Cem. Concr. Compos. 2014, 53, 59–72.
- [53] Zhou, Y.; Gencturk, B.; Willam, K.; Attar, A. Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures. J. Mater. Civ. Eng. 2015, 27, 04014245.
- [54] Ma, Y.; Xiang, Y.; Wang, L.; Zhang, J.; Liu, Y. Fatigue life prediction for aging RC beams considering corrosive environments. Eng. Struct. 2014, 79, 211–221.
- [55] H. Dong , Y. Zhou, and N. Zhuang : Study on Corrosion Characteristics of Concrete-Filled CFRP-Steel Tube Piles under Hygrothermal Environment, 2020.
- [56] B. Kouddane , Z. Mehdi Sbartaï , M. Alwash , K. Ali-Benyahia , S. M. Elachachi , N. Lamdouar and S. Kenai :Assessment of Concrete Strength Using the Combination of NDT—Review and Performance Analysis,2022
- [57] M. Sosa, T. Pérez-López, J. Reyes, F. Corvo, R. Camacho-Chab, P. Quintana, D. Aguilar : Influence of the Marine Environment on Reinforced Concrete Degradation Depending on Exposure Conditions 1, 2011
- [58] F. Benmahiddine , Rafik Belarbi , Julien Berger, Fares Bennai and A Tahakourt : Accelerated Aging Effects on the Hygrothermal Behaviour of Hemp Concrete: Experimental and Numerical Investigations, 2021.

- [59] F Benmahiddine, F Benaïd, R Cherif , R Belarbia, A Tahakourt, K Abahri : Experimental investigation on the influence of immersion/drying cycles on the hygrothermal and mechanical properties of hemp concrete.
- [60] A. Boniface, J. Saliba, Z.M. Sbartai, N. Ranaivomanana, J. Verdier, J-P. Balayssac Monitoring de l'endommagement du béton sous chargement thermique par la technique d'émission acoustique
- [61] L Chalah, A Talah, Y Ghernouti : Mechanical and Durability Properties of High-Performance Concrete Incorporating Fibers and Algerian Natural Pozzolans in Chloride Attack, 2022
- [62] Y. Chen, et al., "Resistance of Concrete Against Combined Attack of Chloride and Sulfate Under Drying-Wetting Cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 650-658, 2016.
- [63] J. Mateo a, M.C. Quintero a, J.M. Fernándezb, M.C. Garcíaa, A. Roderoa,: Application of LIBS technology for determination of Cl concentrations in mortar samples, 2019, *Con. Build. Mat.*
- [64] B. Richarda, M. Quiertanta, V. Bouteillera, L. Adelaidea, Jean-Louis Tailhana and Christian Cremonab : Influence of accelerated corrosion on the reinforced concrete cracking behavior: experimental and numerical study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 16, Nos 3-4, 2012, 450-459
- [65] Mellouk Ibrahim Belabdelli Oussama: Utilisation du corrosimètre Canin+ pour déterminer le potentiel de corrosion dans les structures en béton armé 2016/2017
- [66] L. Yu . R. Francois . R. Gagne' : Influence of steel-concrete interface defects induced by top casting on development of chloride-induced corrosion in RC beams under sustained loading *Materials and Structures* (2016) 49:5169-5181.
- [67] S. Millar, S. Kruschwitz, G. Wilsch: Determination of total chloride content in cement pastes with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) *j.cemconres.2018.12.001*
- [68] a. s. Bryukhova. Kuznetsov, ai. v. Seliverstova, m. Popov, b t. Labutin, and n. Zorov : Evaluation of aging of reinforced concrete structures by laser-induced breakdown spectroscopy of reinforcement corrosion products.
- [69] J. MAI-NHU, Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques, juillet 2013.

2

Etude Expérimentale Des Colonnes Courtes Sous L'Effet Hydro-thermo-Mécanique

2

ÉTUDE EXPERIMENTALE DES COLONNES COURTES SOUS L'EFFET HYGROTHERMO-MECANIQUE

1. INTRODUCTION

Depuis fort longtemps, Le matériau béton est toujours considéré comme un matériau très durable. Cependant, comme nous pouvons le constaté sur de nombreux ouvrages de génie civil, il y a toujours présence de dégradations au cours de leur durée de vie. Par conséquent, Le défi principal de l'Ingénieur est de garantir la sécurité, la stabilité et l'aptitude au service de ces ouvrages. C'est pourquoi il est nécessaire dans un premier temps de comprendre et de maitriser les processus de détérioration pour qu'à la fin nous puissions déterminer leurs effets sur la capacité portante structurelle résiduelle.

Pour atteindre ces objectifs l'Ingénieur Génie civil, procède par le suivi des ouvrages (L'ingénieur peut s'intéresser à un élément particulier de ces ouvrages) qui consiste à mesurer dans le temps l'évolution de la réponse structurelle (contrainte, déplacement,...) d'un ouvrage donné en fonction de l'évolution de la sollicitation et de l'évolution de son environnement. Ainsi, nous pouvons à partir de ce modèle physique établir un modèle mathématique d'évolution de la réponse structurelle de l'ouvrage. En se basant sur des exigences réglementaires de tenue mécanique ou de service, nous pouvons en déduire la durée de vie de l'ouvrage.

Lorsque l'ingénieur n'a pas les moyens de réaliser une étude in situ et en particulier lorsque nous désirons réaliser des études de vieillissement accéléré, il procède par des études au laboratoire ou il essaye de reproduire d'une manière aussi fidèle que possible les conditions réelles de l'ouvrage en terme de sollicitations mécaniques, conditions climatique...etc.

C'est dans ce contexte, que s'inscrit cette première partie de la thèse qui a pour objectif le suivi d'un élément structurel dans un environnement donné. Concrètement, il s'agit d'une étude expérimentale du comportement des colonnes courtes prismatiques en béton soumises à un processus de vieillissement combiné hygro-thermo-mécanique.

Afin d'assurer le monitoring de cet élément de structure, nous avons fait appel aux différentes techniques de caractérisation des structures en béton. En effet, dans le but de quantifier (mesurer) les effets des conditions d'exposition sur les paramètres structurels des éprouvettes étudiées (résistance, dommage..), nous avons combiné les mesures non destructives (**Non Destructive Testing**) à travers l'utilisation de la mesure des vitesses de propagation des ondes ultrasonique et les mesures destructive (**Destructive Testing**) à travers l'utilisation de l'essai de compression simple.

2. MATERIAUX ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. MATERIAUX UTILISES

Vingt sept colonnes courtes prismatiques ont été préparées à partir de la même formulation de béton. Le sable utilisé de classe 0-3 est un sable naturel de rivière extrait de la région (voir Figure 2.1). Les graviers utilisés de classe 3-8 et 8-15, sont concassés extraits d'une carrière (voir figure 2.1). L'eau du robinet est utilisée comme eau de gâchage et pour la cure.

Le ciment Matine utilisé est un ciment Portland composé, de classe 42.5 et sous classe B CPJ-CEM II/B 42.5 RNA 442 du groupe industriel des ciments LAFARGE (voir fiche technique Annexe 1). C'est un ciment gris pour béton de hautes performances, destiné à la construction des ouvrages d'art. La composition chimique et minéralogique de ce ciment sont présentées dans les tableaux 2.1 et 2.2 ci-dessous.

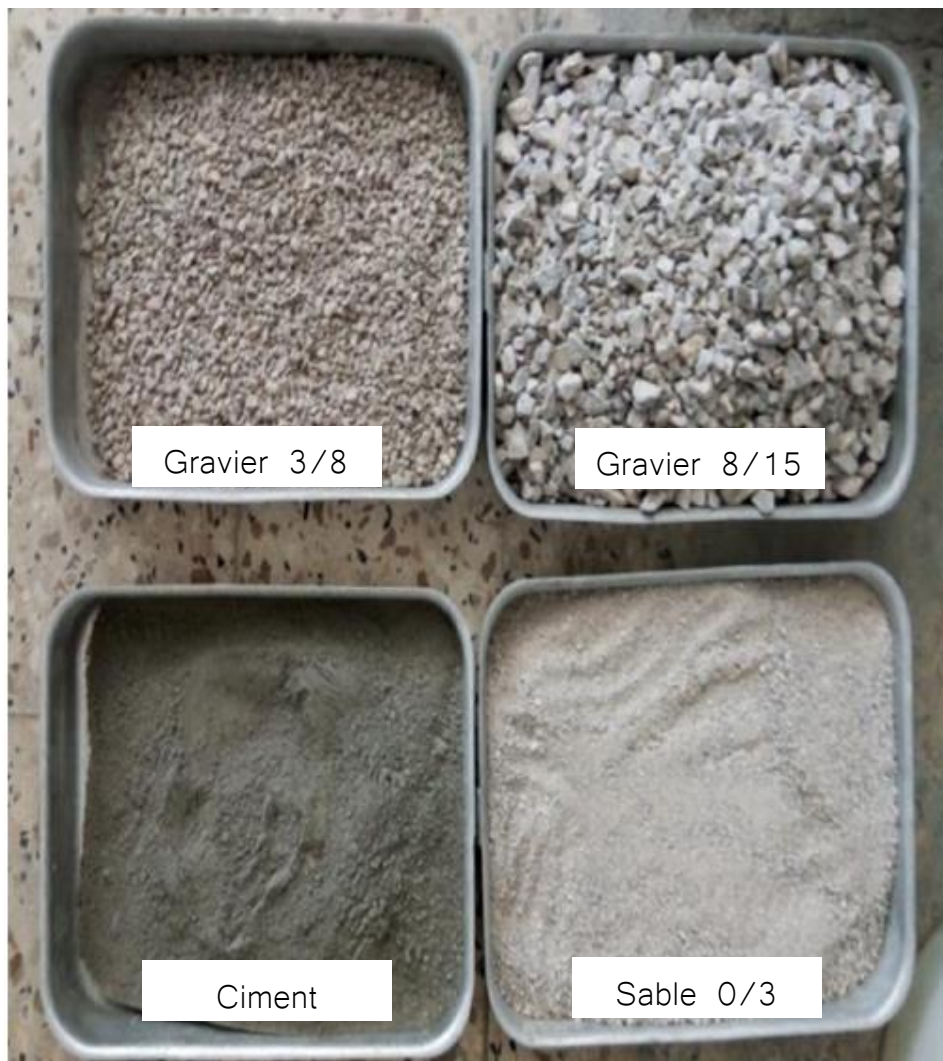


Figure 2.1: Image du ciment et des granulats utilisés pour la confection des éprouvettes.

Tableau 2.1: Analyse chimique du ciment utilisé

Perte au feu %	Résidus insolubles %	Sulfates SO_3 %	Oxyde de Magnesium MgO	Chlorures %	Equivalent en alcalis %
7.50-12	0.7-2	2-2.7	1-2.2	0.01-0.05	0.3-0.75

Tableau 2.2: Analyse Minéralogique du ciment utilisé

C_3S %	C_2S %	C_3A %	C_4AF %
58-64	12-18	6-8	10-12

2.1. CARACTERISATION DES MATERIAUX

2.1.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique (voir Figure 2.2) d'un échantillon est un essai qui permet de déterminer les diamètres et les pourcentages respectifs des différentes classes de grains constituant cet échantillon.



a) Tamiseuse utilisée



b) Pesée des refus

Figure 2.2: Image de la procédure de l'analyse granulométrique des granulats.

L'analyse granulométrique réalisée selon la norme (EN 933-2), sur les différents granulats utilisés dans cette étude a permis d'obtenir les courbes granulométriques de la Figure 2.3.

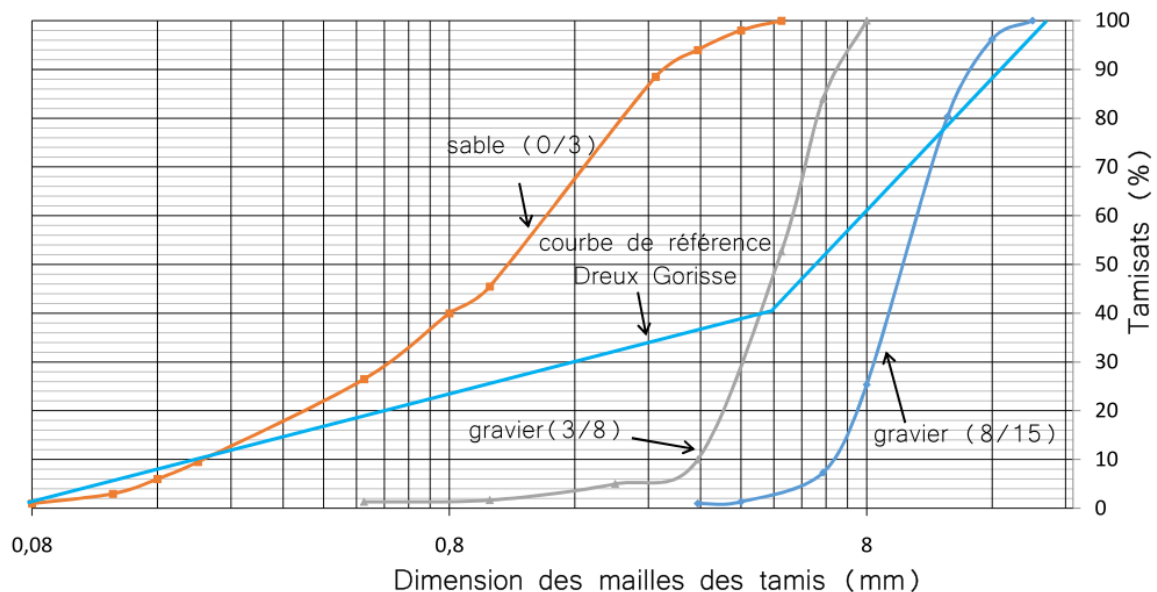


Figure 2.3: Analyse granulométrique des granulats utilisés pour la confection des éprouvettes.

2.1.1.2. MODULE DE FINESSE

Les grains de sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Dans le but de quantifier ce caractère plus ou moins fin d'un sable, on détermine ce que l'on appelle le module de finesse noté MF.

Le module de finesse est défini selon la norme [NFP18-540] comme étant le $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur la série de tamis de diamètres D suivants : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5mm. C'est une caractéristique importante qui permet de classer les sables. En effet, selon le Tableau 2.3, plus le granulat est riche en éléments fins, plus le module de finesse est plus petit.

Tableau 2.3: Classification du sable suivant les valeurs de MF

MF	Nature et qualité du sable
$1.8 < MF < 2.2$	Sable est à majorité de grains fins
$2.2 \leq MF < 2.8$	Sable préférentiel
$2.8 \leq MF < 3.3$	Sable un peu grossier → Béton résistant cependant moins maniable

Dans le cas du sable utilisé dans cette étude, le calcul du module de finesse a donné une valeur de MF=3.25. Les valeurs indiquées dans la norme [NFP18-540], stipulent que si la valeur de MF est comprise entre 2.8 et 3.3, le sable est dit grossier (voir Tableau 2.3).

2.1.1.3. EQUIVALENT DE SABLE

L'équivalent de sable (voir Figure 2.4) est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propriété d'un sable ou d'un grave. Il est très important surtout pour les sols grenus de grains de diamètre inférieur à 0,5 mm. Il est noté par ES et il est exprimé en pourcentage (%). Plus la valeur de l'équivalent de sable est proche de 100% plus le sable est dit propre et plus il est bon pour les constructions de génie civil [4].



Figure 2.4: Essai d'équivalent de sable.

Dans le cas du sable utilisé dans cette étude, l'essai d'équivalent de sable a donné une valeur de $ES=82\%$. Les valeurs indiquées dans la norme NFP18 598 [5], stipulent que si la valeur de ES est supérieur à 80% le sable est dit très propre (voir Tableau 2.4). L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 2.4: Classification du sable suivant les valeurs de ES

ES en %	Nature et qualité du sable
< 60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour un béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$70 \leq ES < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$S > 80$	Sable très propre : L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

2.1.2. FORMULATION ET CONFECTION DU BETON

Le béton utilisé dans cette étude a été confectionné avec une formulation établie selon la méthode de Dreux-Gorisse, qui repose sur l'utilisation des courbes granulaires de référence (voir Figure 2.3). Ainsi, les proportions des différents constituants du béton utilisé dans le cadre de cette étude sont présentées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5: Formulation du béton utilisé en [kg/m³].

Sable 0-3 [mm]	Gravier 3-8 [mm]	Gravier 8-15 [mm]	Ciment	Eau	E/C
621	370	850	350	182	0.52

Toutes les éprouvettes en béton et béton armé utilisées sont fabriquées dans l'environnement de laboratoire. Et suivi la même cure et le même conditionnement conformément à la norme NFP 18-404.

- Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24heure.
- Après séchage faire en sorte tous les granulats soit ramené à température ambiante.
- Pour confectionner les éprouvettes nous avons suivi les étapes présentées dans la figure qui suit :

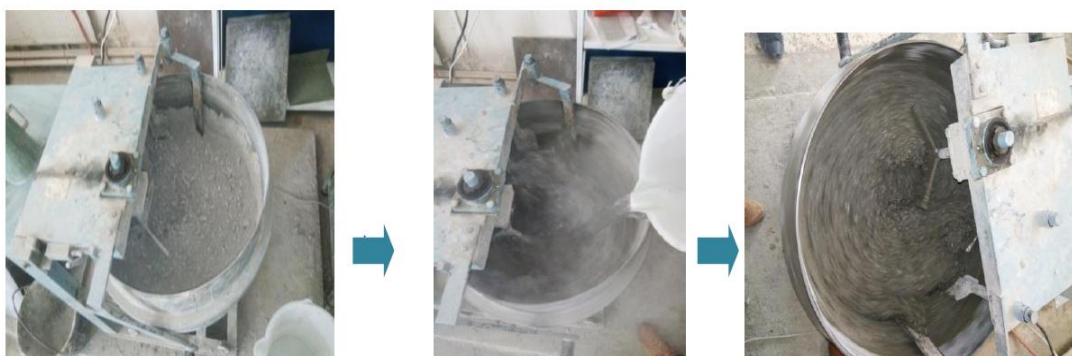


Figure 2.5: Malaxage des ingrédients à sec et en présence d'eau



Figure 2.6: Préparation des Moules pour éprouvette en béton et béton armé



Figure 2.7: Confection des éprouvettes utilisées dans cette étude.
7x7x28 en béton et en béton armé

2.1.3. CARACTERISATION DU BETON FRAIS

2.1.3.1. ESSAI D'AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS

La fluidité, communément appelée l'ouvrabilité ou la maniabilité, est une qualité essentielle du béton frais car c'est cette qualité qui lui permet, lors de l'opération de coulage, de remplir n'importe quel volume. Afin de mesurer cette propriété on réalise ce que l'on appelle l'essai d'affaissement au « cône d'Abrams » ou « le slump test ». Cet essai décrit par la norme NFEN12350-2, permet de mesurer à travers l'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique, de déterminer la consistance du béton (voir Figure 2.8). Suivant la valeur de cette consistance qui caractérise la fluidité du béton frais, la norme donne 5 classes de consistance du béton noté de S1 à S5 comme indiqué sur le Tableau 2.6.



Figure 2.8: Essai de consistance au cône d'Abrams

Tableau 2.6: Consistance du béton en fonction de l'affaissement.

Classe	Affaissement mm	Désignation de la consistance
S1	10 à 40	ferme
S2	50 à 90	plastique
S3	100 à 150	Très plastique
S4	160 à 210	fluide
S5	≥ 220	Très fluide (béton auto-plaçant)

Les résultats de l'essai réalisé sur trois échantillons de notre béton sont récapitulés dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7: Résultats de l'essai au cône d'Abrams.

échantillons	Affaissement
1	60 mm
2	55 mm
3	65 mm

Nous pouvons donc conclure à partir des résultats présentés dans le Tableau 2.7, que notre béton est plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne.

2.1.4. CARACTERISATION DU BETON DURCI

Afin de procéder à la caractérisation du béton utilisé dans cette étude, trois éprouvettes prismatiques sont préparées à partir de la même formulation de béton et testées à l'âge de 90 jours. Les mesures de la masse volumique ainsi que de la résistance ultime notée R_u du béton mesurée dans un essai de compression axiale voir Figure 2.9, sont résumés dans le Tableau 2.8 ci-dessous.

Tableau 2.8: Densité et résistance ultime du béton après 90 jours.

Propriétés	Eprouvettes Témoins			Moyenne	Ecart type
	1	2	3		
Densité [kg/m^3] $\times 10^3$	2.35	2.39	2.35	2.36	0.018
Résistance Ultime [KN]	118.6	127.85	111.62	119.35	6.647



a) Dispositif d'essai de compression



b) dispositif d'essai de flexion

Figure 2.9: Image de la machine d'essai IBERTEST-200kN.

Nous présentons dans la figure 2.9 les deux dispositifs de l'essai mécanique réalisé avec la machine IBERTEST-200kN à savoir le dispositif de l'essai de compression axiale qui sera utilisé dans cette première partie du travail. Le deuxième dispositif à savoir le dispositif de flexion trois points sera utilisé dans la deuxième partie de ce travail.

2.2. PREPARATION ET DESIGNATION DES EPROUVETTES

En vu de l'analyse expérimentale de l'effet combiné d'un processus hygrothermique et d'un processus mécanique, sur des éléments structurels en béton, vingt et une colonnes courtes prismatiques ayant pour dimensions 7cm×7cm×28cm, ont été préparées et réparties en trois groupes en fonction des conditions d'exposition (conditions d'exploitation).

Ajouter à cela, dans le but d'analyser l'effet de l'élancement à savoir le rapport h/b (h : hauteur de l'éprouvette, b : largeur de la section transversale), trois colonnes prismatiques courtes ayant pour dimensions 7cm×7cm×14cm et trois colonnes prismatiques courtes ayant pour dimensions 7cm×7cm×7cm ont été préparées.

La description des différentes éprouvettes utilisées dans cette étude est présentée dans la Figure 2.10. Les Détails et la répartition des éprouvettes utilisées dans cette étude sont résumés dans le Tableau 2.9

Tableau 2.9: Détails et répartition des spécimens utilisés dans cette étude.

Groupe	Notation	Processus Hygrothermo-mécanique		h/b	Nombre
		Hygrothermique	Chargement		
Group I	SC-I	Oui	Non	4	3
	SC-II-30	Non	30% of Rd	4	3
Group II	SC-II-50	Non	50% of Rd	4	3
	SC-II-70	Non	70% of Rd	4	3
Group III	SC-III-30	Oui	30% of Rd	4	3
	SC-III-50	Oui	50% of Rd	4	3
	SC-III-70	Oui	70% of Rd	4	3
Group IV	SC-IV70	Oui	70% of Rd	2	3
Group V	SC-V70	Oui	70% of Rd	1	3

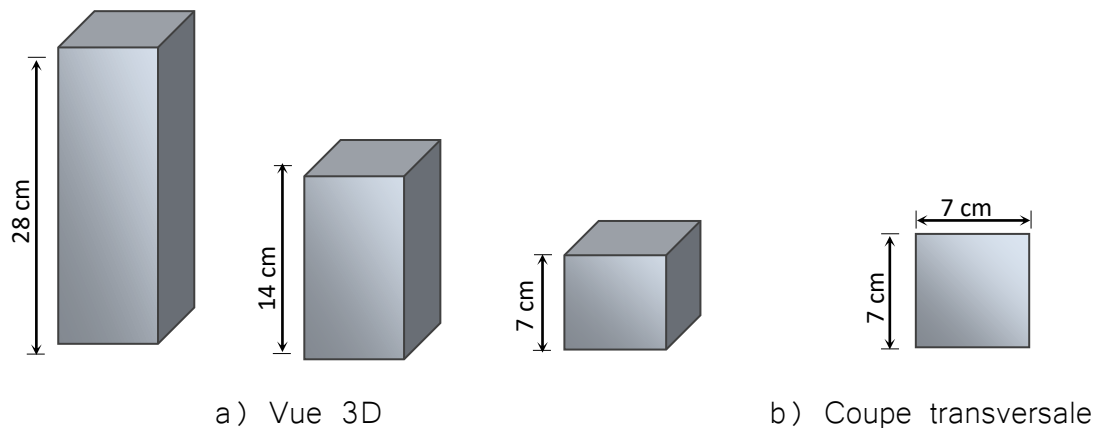


Figure 2.10: Description de la géométrie des éprouvettes utilisées dans le cadre de cette étude expérimentale.

2.3. DESCRIPTION DU PROCESSUS HYGROTHERMO-MECANIQUE

Comme illustrer sur la figure 2.11, le processus Hygrothermique appliqué aux éprouvettes dans le cadre de cette étude est constitué de trois étapes dont le détail est comme suit :

- Dans un premier temps, nous procédons à l'immersion des éprouvettes dans de l'eau du robinet pendant 24 heures,
- Par la suite, nous procédons au séchage des éprouvettes à l'air ambiant pendant 24 heures.
- Enfin les éprouvettes sont soumises à une cure thermique. Cette cure consiste en un cycle de température (cycle thermique) dont le détail est présenté sur la figure 2.12. Ce choix du cycle a été considéré dans le but d'essayer de reproduire le contexte du climat Algérien caractérisé par un hiver humide et froid avec des températures basses et un été sec et chaud avec des températures élevées [21].

Cycle Hygrothermique



a) Immersion dans l'Eau (24H)



b) Séchage à l'air ambiant (24H)



c) Cure thermique

Figure 2.11: Description du cycle hygrothermique.

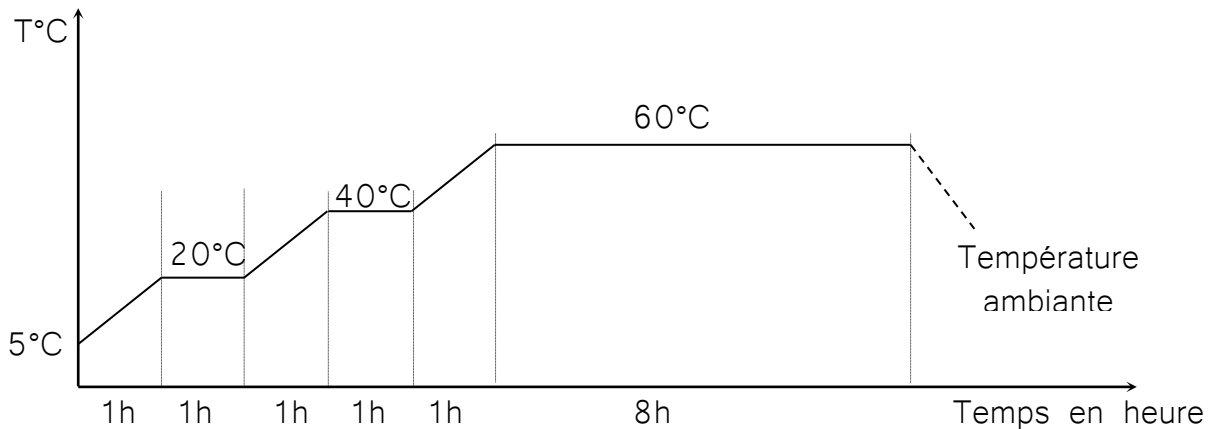


Figure 2.12: Description du Cycle Thermique appliqué aux éprouvettes.

Le processus Mécanique consiste en un effort de compression longitudinal statique appliqué à l'aide d'une machine d'essai Ibertest présentée précédemment (voir Figure 2.9) avec une capacité maximale de 200kN.

La machine comme illustré sur la Figure 2.13 est pilotée par une centrale de contrôle et d'acquisition (ordinateur). Ceci permet d'une part de contrôler le chargement appliqué et d'autre part, l'acquisition des données sous forme de courbes.

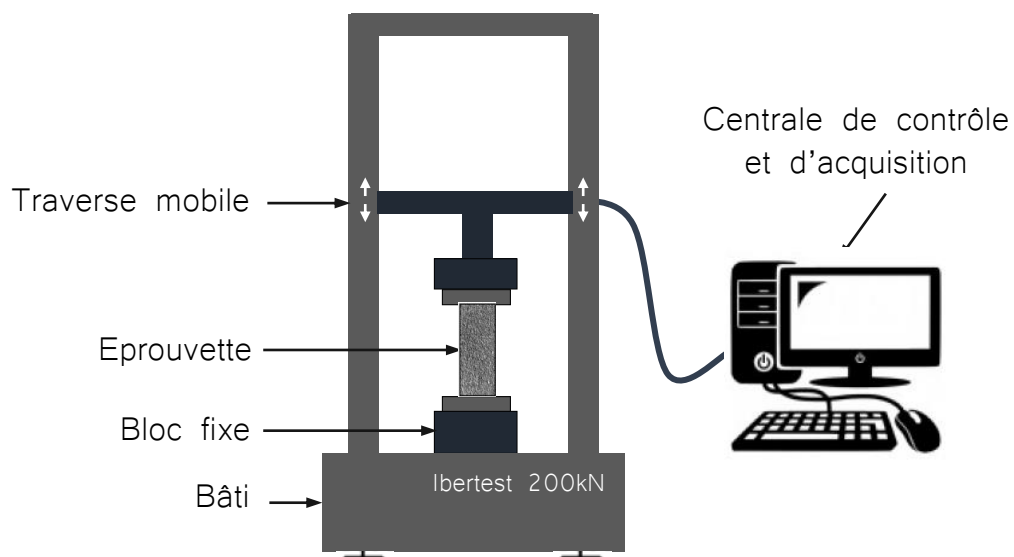


Figure 2.13: Schéma du dispositif de Chargement-Déchargement en compression simple.

Le processus en question consiste en des cycles de chargement-déchargement avec différents niveaux du chargement appliqué. Pour une évaluation réaliste de la durabilité des colonnes courtes étudiées dans ce travail, nous considérons la réglementation en vigueur rapportée par Bamforth et al. [22] dans laquelle la résistance de conception notée R_d est calculée à partir de la résistance ultime notée R_u . Ainsi, nous obtenons la valeur référence de la capacité portante de notre colonne courte.

Dans le cadre de ce travail, trois niveaux du chargement mécanique sont retenus. Chaque niveau représente respectivement 30%, 50% et 70% de la résistance de conception R_d calculée précédemment. Le choix de ces trois niveaux de chargement est fait dans le but de reproduire trois différents niveaux d'exploitation à savoir, respectivement un niveau d'exploitation faible, un niveau d'exploitation moyen et enfin un niveau d'exploitation élevé de la structure en service.



Figure 2.14: Image du dispositif d'application aux éprouvettes du cycle mécanique statique en compression axiale : Chargement-Déchargement.

3. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE DE MESURE DES VITESSES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES

Afin de suivre le comportement en service et dans le temps, d'un ouvrage ou d'un élément de cet ouvrage, il est impératif que les testes de caractérisation soient non destructif.

Comme le montre la Figure 2.15, l'essai est basé sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (UPVTesting) qui traversent un élément en béton. Cet essai constitue la méthode de mesure non-destructive la plus utilisée dans le domaine des ouvrages de génie civil.

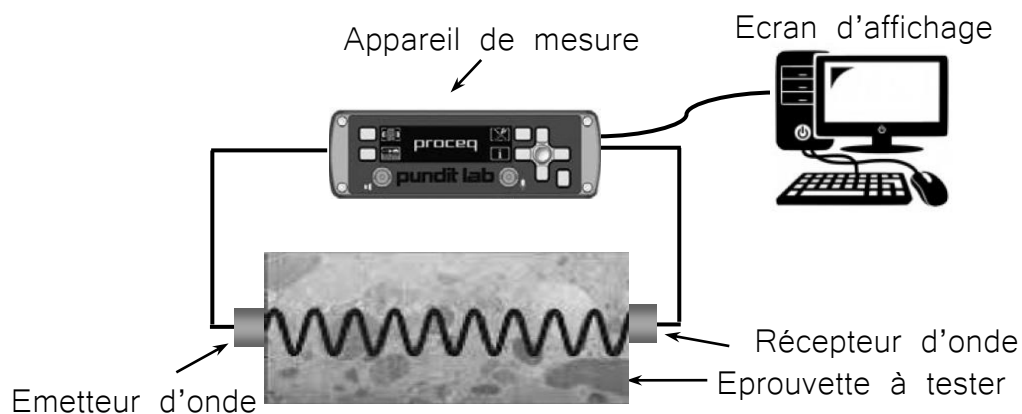


Figure 2.15: Schéma de principe de l'essai à Ultrason.

Du fait que la vitesse de propagation de ces ondes ultrasoniques dépend de la densité et des propriétés élastiques du matériau parcouru, cette méthode permet de contrôler la qualité du béton testé et de détecter les dommages (désordres) dans les éléments d'une structure [23,24,25,26,27].

L'essai décrit par la norme ASTM C597, consiste à mesurer le temps que met une impulsion ultrasonique pour traverser l'élément que l'on désire étudier.

Sur la Figure 2.16, nous présentons le principe et composants du dispositif Proceq Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Test-Proceq PUNDIT Lab+, utilisé pour la caractérisation des éprouvettes. Ce dispositif comme illustré sur la figure est constitué de :

- deux transducteurs placés en contact avec la surface du béton. L'essai commence lorsque une impulsion ultrasonique est générée par le transducteur émetteur avec une fréquence de 54 kHz puis traverse l'éprouvette en béton et qui est enfin reçue par le transducteur récepteur. Le temps écoulé entre l'entrée et la sortie de l'onde est mesuré avec une précision d'au moins 0,1 μ s.
- Les deux transducteurs sont connectés à une boîte d'acquisition qui permet d'une part de régler les paramètres de l'essai et d'autre part afficher le résultat de l'essai en l'occurrence la vitesse de propagation
- Tout ce dispositif peut être connecté à un ordinateur ce qui nous permet d'avoir une fenêtre d'affichage plus détaillée qui nous donne accès à tous les paramètres de l'essai. Une fenêtre graphique s'affiche en particulier qui décrit l'impulsion générée et sa propagation.

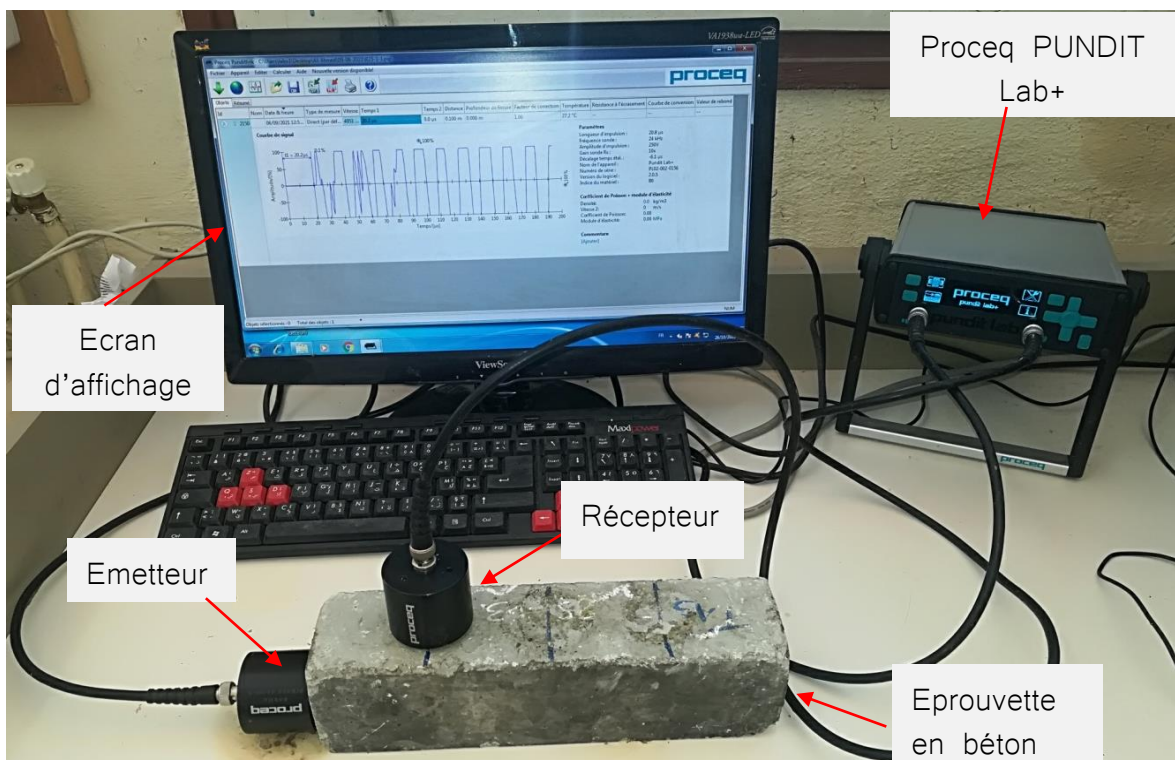


Figure 2.16: Principe et composants de la mesure des vitesses ultrasoniques avec l'appareil Proceq Portable Ultrasonique Non-destructive Digital Indicating Test (Proceq PUNDIT Lab+)

Pour chaque éprouvette, nous présentons sur la Figure 2.17, les cinq points de mesure qui ont été sélectionnés ;

- Trois points de mesure suivant la longueur de l'éprouvette pour la direction transversale.
- Un point de mesure dans la direction longitudinale,
- tandis que le cinquième est choisi pour la mesure semi-directe.

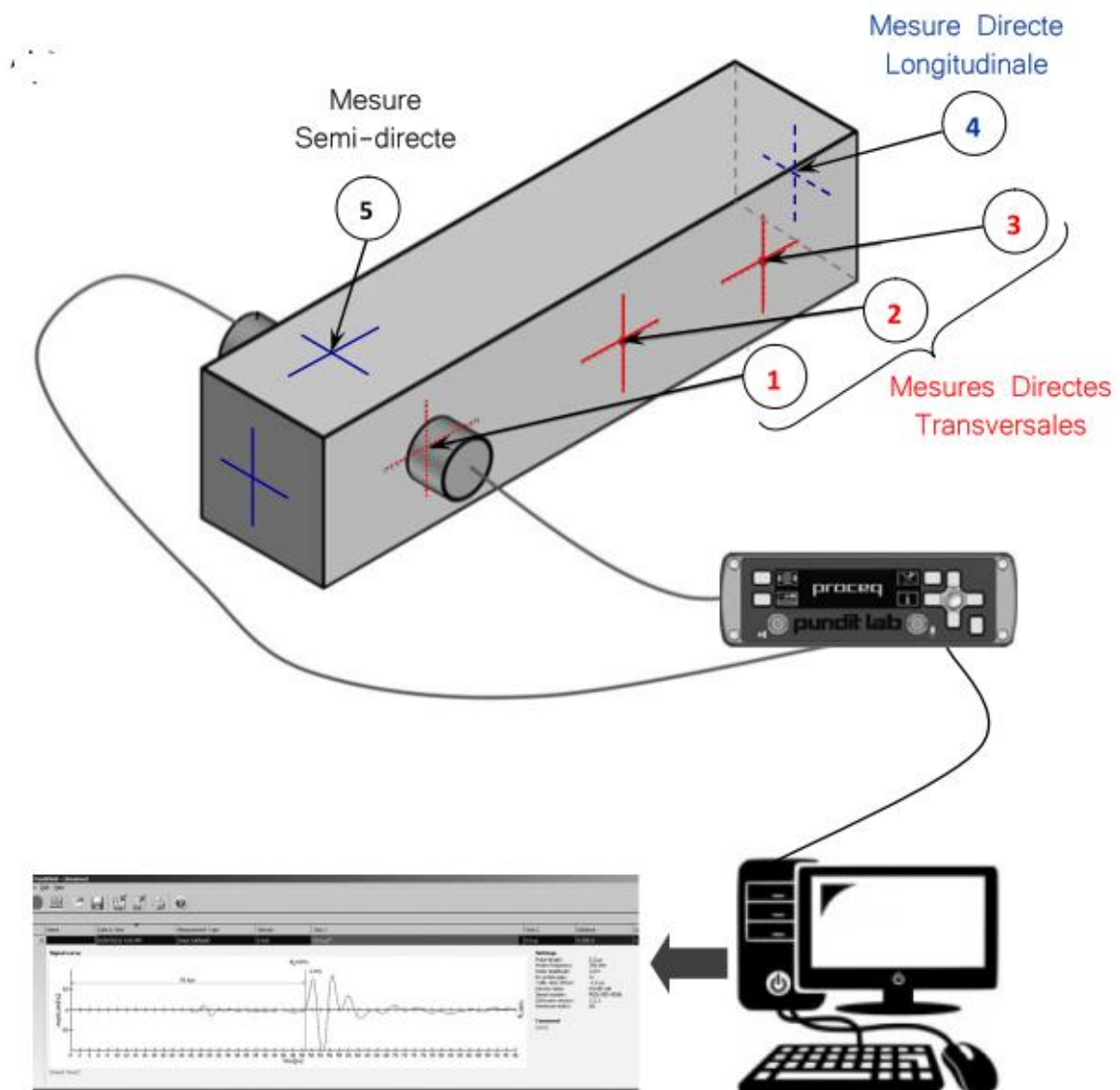


Figure 2.17: Description de la position et de la procédure de mesures de la vitesse des impulsions ultrasoniques dans les cinq points de l'éprouvette.

Lors de la réalisation des essais, certaines précautions doivent être prises afin de réduire les incertitudes sur les mesures à savoir :

- Les éprouvettes sont testées après le cycle thermique pour éliminer toute trace d'humidité dans notre béton qui risque de perturber la mesure de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique. En effet, Les vitesses de propagation de ces ondes sont plus importantes lorsque les vides contenus dans l'éprouvette sont rempli d'eau.
- La surface sur laquelle nous réalisons l'essai doit d'une part épouser parfaitement la forme des transducteurs utilisés. Ainsi, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre les transducteurs et la surface du béton à tester. Une fine couche de graisse est appliquée dans notre cas sur la surface du transducteur et du béton. D'autre part, dans le cas où la surface du béton à tester est très rugueuse, il est recommandé de poncer et d'égaliser la surface qui sera au contact avec les transducteurs. Dans notre cas nous appliquons le test sur les surfaces finies de l'éprouvette.
- Les études ont montré que lorsque la température entre 5 et 30°C, la vitesse de propagation des impulsions ultrasonique ne sont pas impactées.
- Les vitesses de propagation des ondes ultrasoniques sont impactées par la présence des armatures en acier dans le béton testé. En effet, les études antérieures ont montré que l'armature qui suit le trajet de l'impulsion ultrasonique entraîne une augmentation de la vitesse. Dans notre cas le problème ne se pose car l'éprouvette testée ne possède pas d'armature de renforcement.
- Pour réduire l'influence de l'erreur et garantir la répétabilité des résultats, trois lectures ont été effectuées pour chacun des points de mesure.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. VITESSES INITIALES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES

Avant d'entamer l'application du processus de vieillissement aux colonnes courtes prismatiques en béton confectionnées, nous avons procédé à leur caractérisation par l'application à chacune des éprouvettes, de l'essai de mesure à l'Ultrason.

Ainsi, nous avons récolté au total un échantillon de 210 mesures des vitesses des ondes ultrasoniques se propageant à travers les éprouvettes testées à savoir :

- 168 valeurs en mesure directe réparties en 42 mesures suivant le sens longitudinal de l'éprouvette et 126 mesures suivant le sens transversal des éprouvettes
- 42 valeurs en mesures semi-directe.

Nous constatons clairement à travers la Figure 2.18 que :

- Les valeurs obtenues présentent une variabilité qui diffère selon les trois configurations de la mesure de la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques. Ceci se traduit par la dispersion de ces valeurs autour d'une certaine valeur moyenne.
- les valeurs mesurées des vitesses de propagation des impulsions ultrasoniques dans le sens longitudinal sont inférieures aux valeurs mesurées dans le sens transversal.
- Cette différence s'accroît lorsque nous comparons par rapport aux mesures obtenus par la méthode semi-directe.

Afin de quantifier la variabilité des mesures obtenues nous devons déterminer les paramètres statistiques de notre échantillon à savoir les paramètres de tendance centrale et les paramètres de dispersion.

Dans un premier temps nous présentons sur les Figures 2.19, 2.20, 2.21 et 2.22 les histogrammes des différentes configurations de mesures. Nous pouvons ainsi voir que toutes les mesures présentent une distribution asymétrique.

Par la suite, nous présentons dans le Tableau 2.10, les principaux résultats de cette analyse statistique.

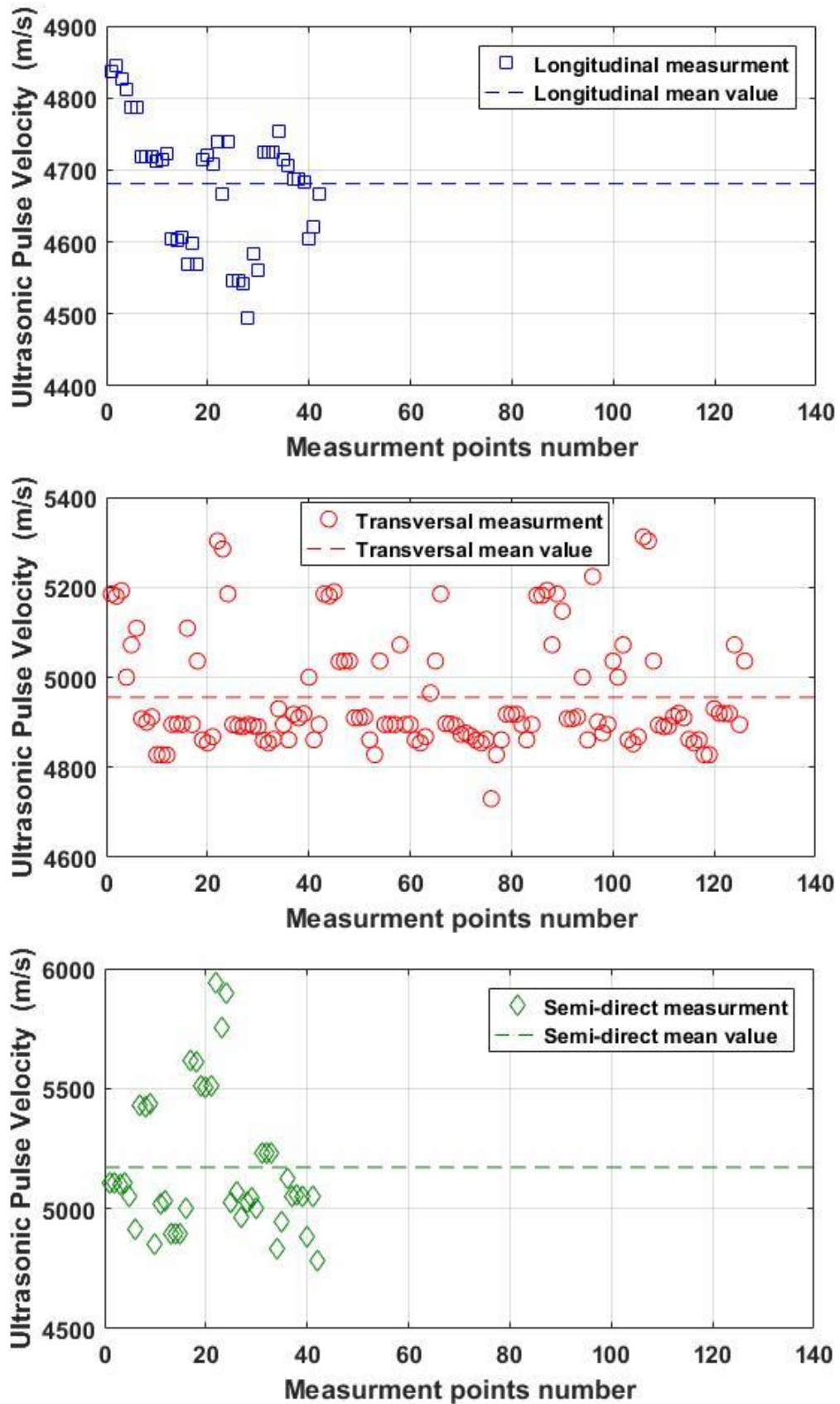


Figure 2.18: Représentation graphique des valeurs de la vitesse de propagation des impulsions ultrasonique, mesurées sur les différentes éprouvettes selon les trois configurations : Longitudinale, Transversale et Semi-direct.

En effet, comme l'indique le Tableau 2.10, la distribution des mesures longitudinales présente une valeur négative du coefficient d'asymétrie. Cela signifie que les valeurs des mesures longitudinales de la vitesse de propagation de l'impulsion ultrasonique se répartissent davantage à gauche de la moyenne de l'échantillon qu'à droite.

En revanche, les distributions des mesures transversales et semi-directes présentent une valeur positive du coefficient d'asymétrie, ce qui indique que les valeurs des mesures de la vitesse de propagation de l'impulsion ultrasonique se répartissent davantage à droite de la moyenne de l'échantillon.

Le coefficient de variation Cv est une mesure statistique de la dispersion relative des données d'un échantillon autour de la moyenne. Il représente le rapport entre l'écart type Std et la moyenne multiplié par 100. Plus le Cv est élevé, plus la dispersion de la variable est importante. Comme on peut le voir dans le Tableau 2.10, la valeur maximale du coefficient de variation est inférieure à 5,6 %. Cela indique que nous n'observons pas une forte dispersion des mesures de la vitesse de propagation de l'impulsion ultrasonique.

Tableau 2.10: Analyse des paramètres statistiques de la distribution des mesures des vitesses ultrasoniques.

Paramètre statistique	Configuration de la mesure			
	Longitudinale	Transversale	Directe*	Semi-Directe
Effectif	42	126	168	42
Moyenne	4680.76	4955.63	4886.91	5172.14
Médiane	4710	4898.5	4892	5053
Mode	4719	4895	4895	5052
Maximum	4845	5312	5312	5942
Minimum	4494	4730	4494	4785
Skewness	-0.18	1.24	0.22	1.11
Kurtosis	-0.65	0.57	0.25	0.46
Ecart type	86.96	124.60	166.43	289.08
Coefficient de variation Cv	1.8%	2.5%	3.4%	5.5%

(*) Correspond aux mesures longitudinales et transversales prise simultanément.

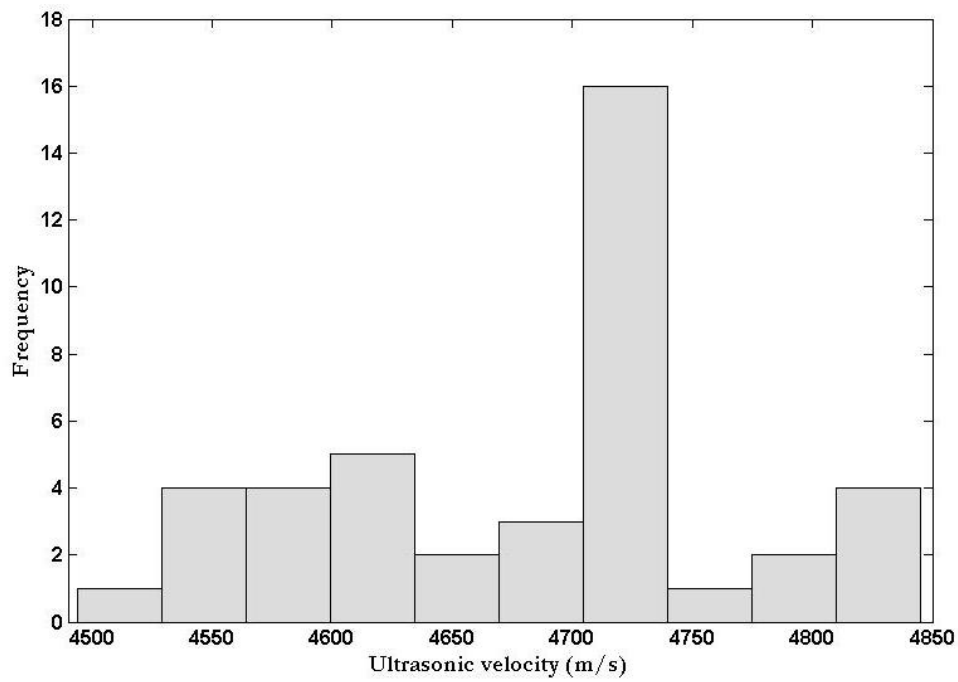


Figure 2.19: Histogramme des fréquences des mesures longitudinales des vitesses ultrasoniques initiales

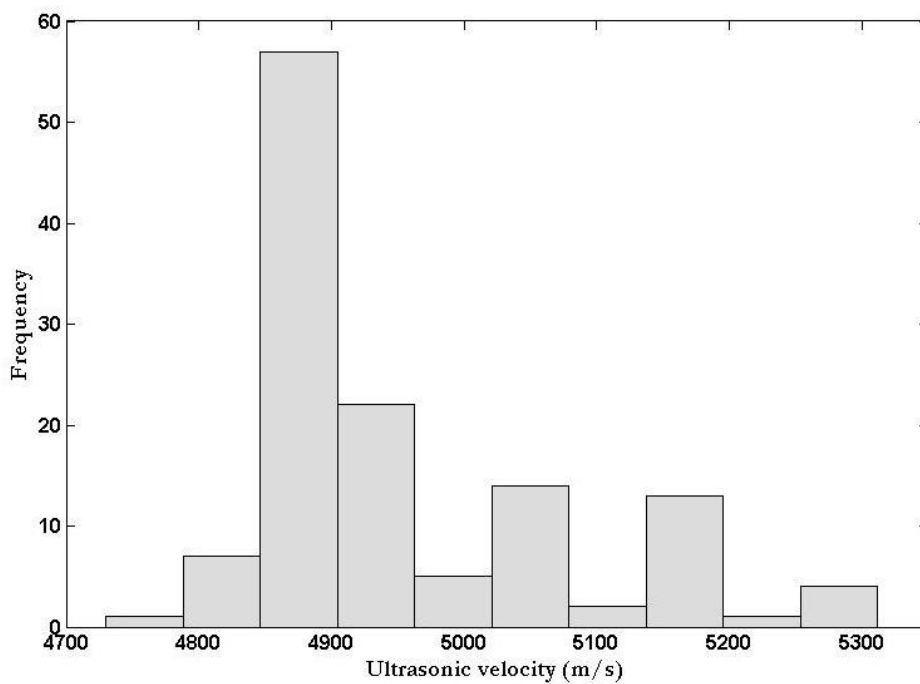


Figure 2.20: Histogramme des fréquences des mesures transversales des vitesses ultrasoniques initiales

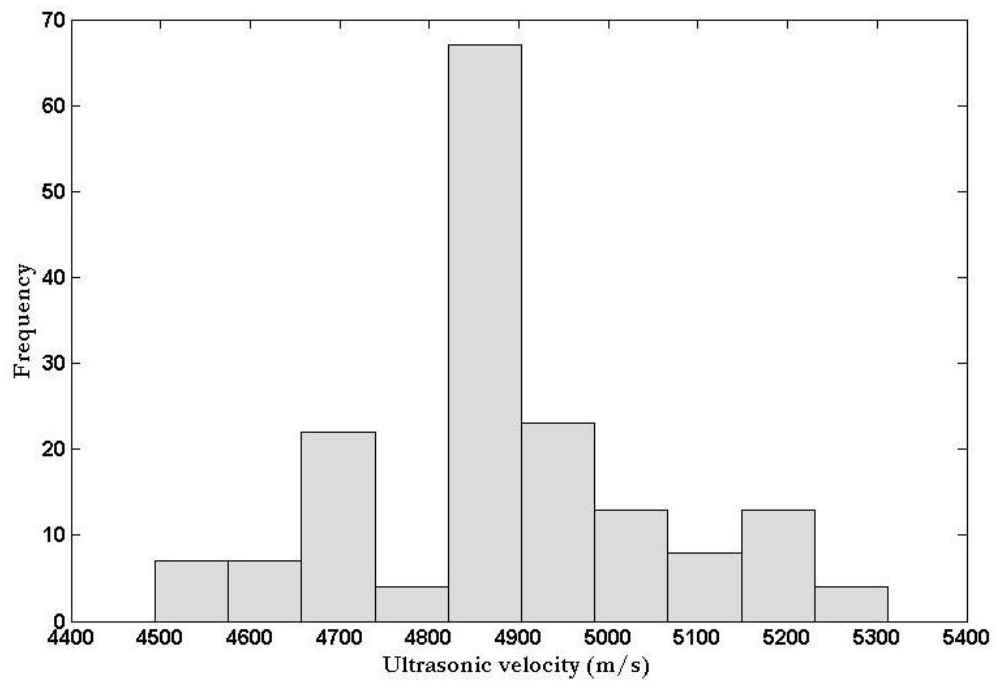


Figure 2.21: Histogramme des fréquences des mesures directes des vitesses ultrasoniques initiales

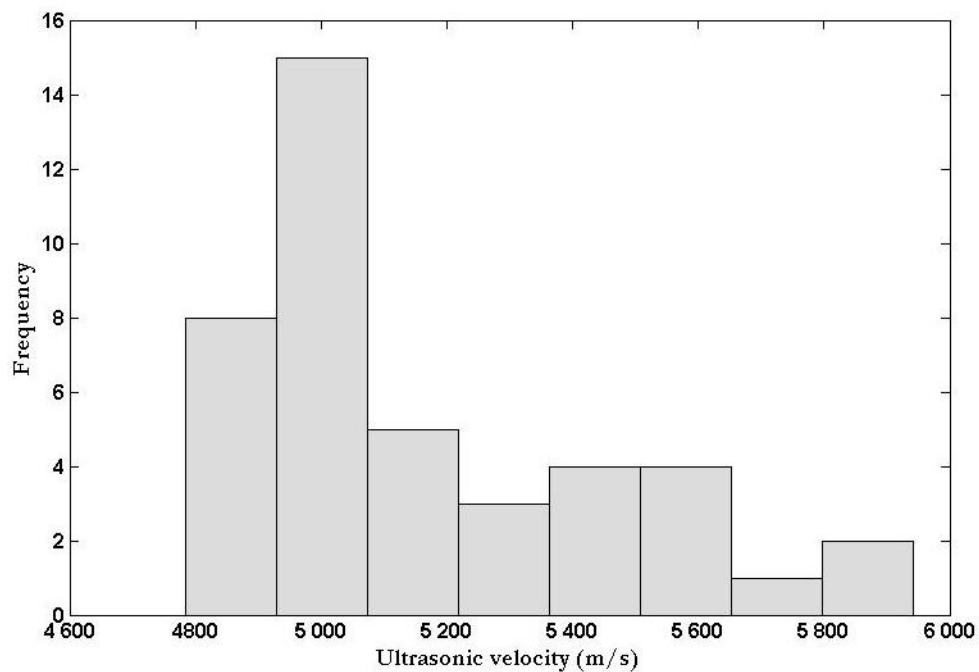


Figure 2.22: Histogramme des fréquences des mesures semi-directe des vitesses ultrasoniques initiales

4.2. EVOLUTION DANS LE TEMPS DES VITESSES DE PROPAGATION DES IMPULSIONS ULTRASONIQUES

4.2.1. EFFET DU NIVEAU DE CHARGEMENT

L'évolution dans le temps des vitesses de propagation des impulsions ultrasoniques, à travers les échantillons de colonne courtes prismatiques en béton en considérant les trois niveaux de chargement à savoir 30%, 50% et 70% de la résistance de calcul R_d , mesurée pendant le processus de vieillissement hygrothermo-mécanique, est illustrée sur les Figures 2.23, 2.24 et 2.25.

Les résultats sont présentés en termes de rapport de la vitesse instantanée de propagation des impulsions ultrasoniques notée UPV du matériau endommagé, mesurée après n cycles de vieillissement sur la vitesse initiale de propagation des impulsions ultrasoniques notée UPV_0 du matériau non endommagé, mesurée avant le début du processus de vieillissement.

Comme le montre les Figures 2.23, 2.24 et 2.25, pour toutes les éprouvettes testées, après l'application d'un certain nombre n de cycles de vieillissement, on observe une atténuation de la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques. Cela représente la réponse des colonnes courtes prismatiques en béton à la dégradation des propriétés internes.

Ainsi, nous pouvons observer :

- A partir du cycle 1 au cycle 20, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible pour les éprouvettes chargées à 30 % de R_d .
- Du cycle 1 au cycle 14, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible pour les éprouvettes chargées à 50 % de R_d .
- Du cycle 1 au cycle 10, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible pour les éprouvettes chargées à 70 % de R_d .
- Par la suite, pour tous les échantillons, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est plus notable et augmente au fur et à mesure que le nombre de cycles de vieillissement augmente.

- L'atténuation de la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques obtenue après n cycles de vieillissement, pour les échantillons chargés à 70 % de R_d , est plus importante que celle obtenue après n cycles de vieillissement pour les échantillons chargés à 50 % et 30 % de R_d .

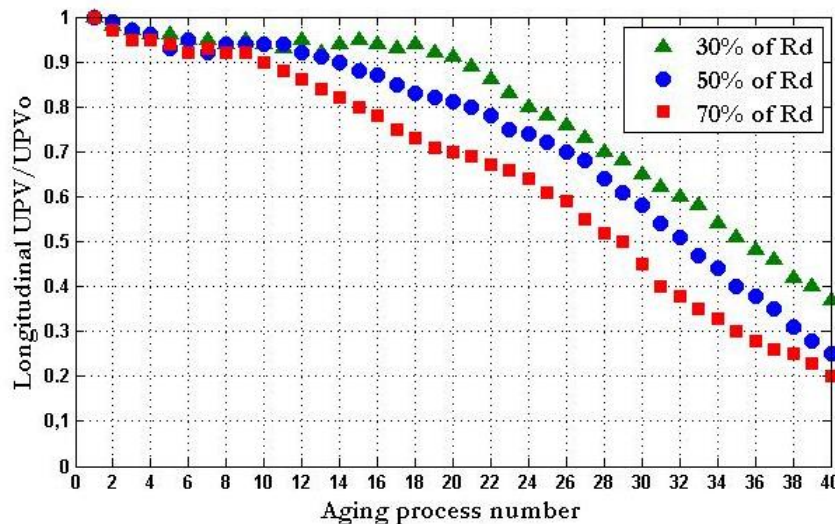


Figure 2.23: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens longitudinal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement

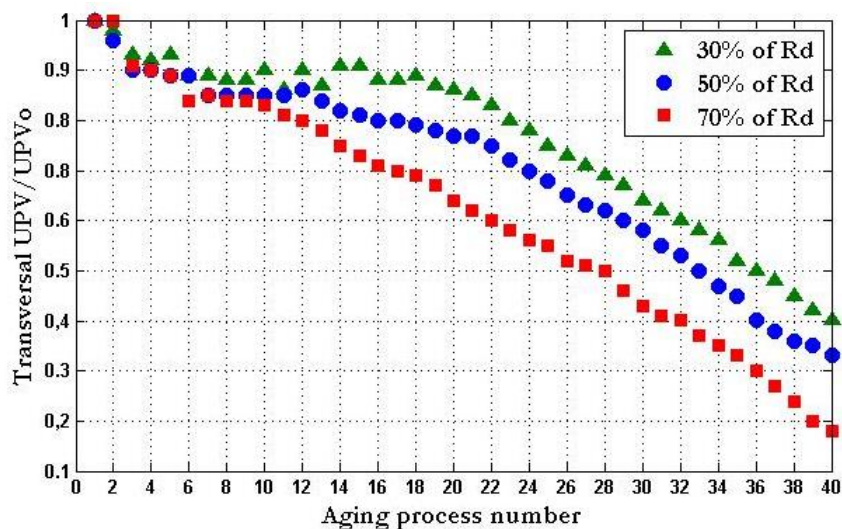


Figure 2.24: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens transversal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement

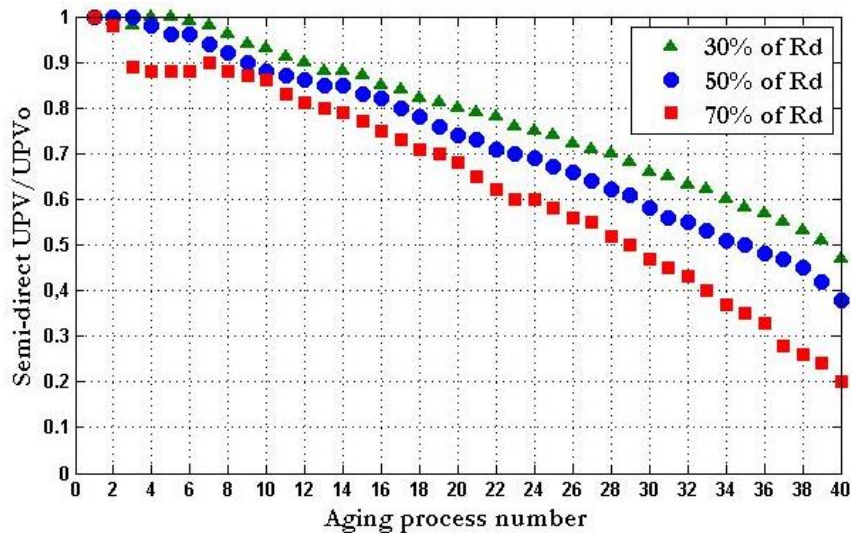


Figure 2.25: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens semi-direct des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différents niveaux de chargement

4.2.2. EFFET DES CONDITIONS D'EXPOSITION

L'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores se propageant à travers les échantillons de colonne courtes prismatiques en béton en fonction des trois conditions d'exposition (processus hygrothermique, processus mécanique et processus hygrothermo-mécanique) est illustrée sur les Figures 2.26, 2.27 et 2.28.

Les résultats sont présentés en termes de rapport entre la vitesse instantanée des ondes ultrasonores UPV du matériau endommagé, mesurée après n cycles du processus de vieillissement, et la vitesse initiale des ondes ultrasonores UPVo du matériau non endommagé, mesurée avant le début du processus de vieillissement.

Comme le montre les Figures 2.26, 2.27 et 2.28, pour tous les échantillons, après l'application de n cycles de vieillissement, on observe une atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores.

Nous pouvons observer à partir des Figures 2.26, 2.27 et 2.28. que l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores obtenue après application de n cycles, pour les échantillons soumis au processus de vieillissement hygrothermomécanique et au processus de vieillissement mécanique, est significativement plus importante que l'atténuation de la

vitesse des ondes ultrasonores obtenue après application de n cycles pour les échantillons soumis au processus de vieillissement hygrothermique uniquement.

La courbe de décroissance de la vitesse des ondes ultrasonores de tous les échantillons, comme le montre les Figures 2.26, 2.27 et 2.28, présente généralement des comportements différents.

En fait, comme le montre les Figures 2.26, 2.27 et 2.28, du cycle 1 au cycle 14, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible pour les échantillons soumis au processus de vieillissement mécanique.

Après le cycle 14, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores devient notable et augmente avec le nombre de cycles.

Dans le cas des échantillons soumis au processus de vieillissement hygrothermique, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible.

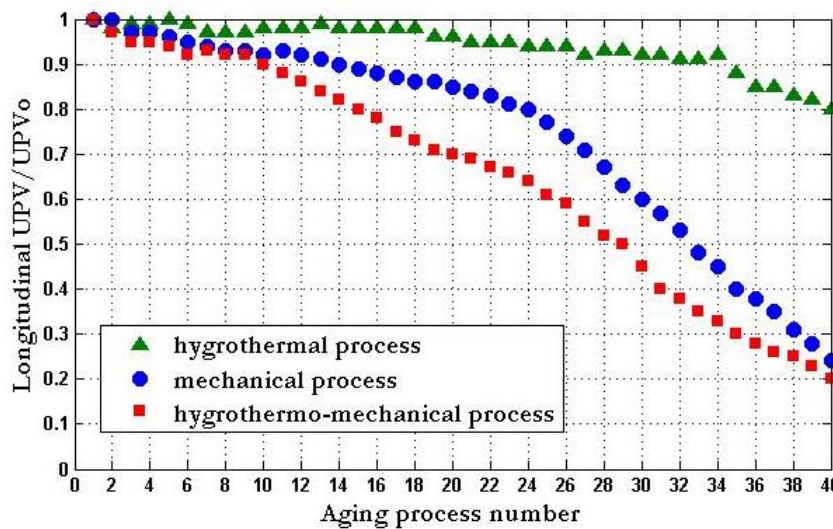


Figure 2.26: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques longitudinales en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.

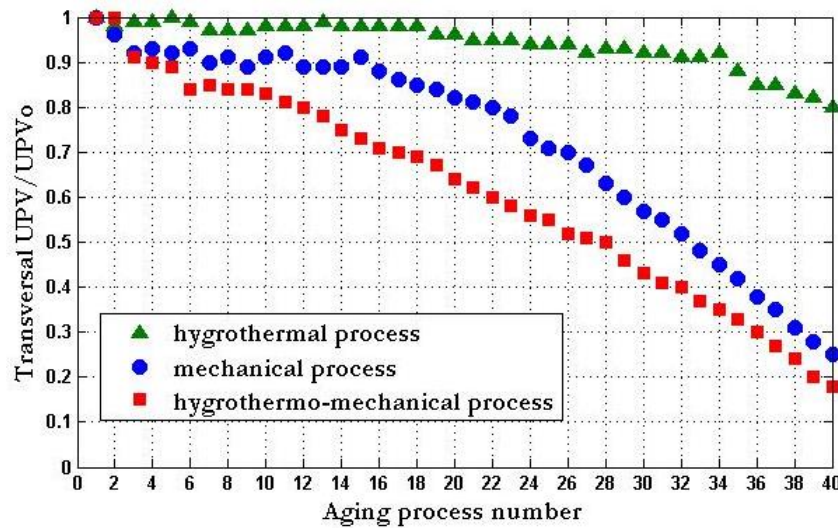


Figure 2.27: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques transversales en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition

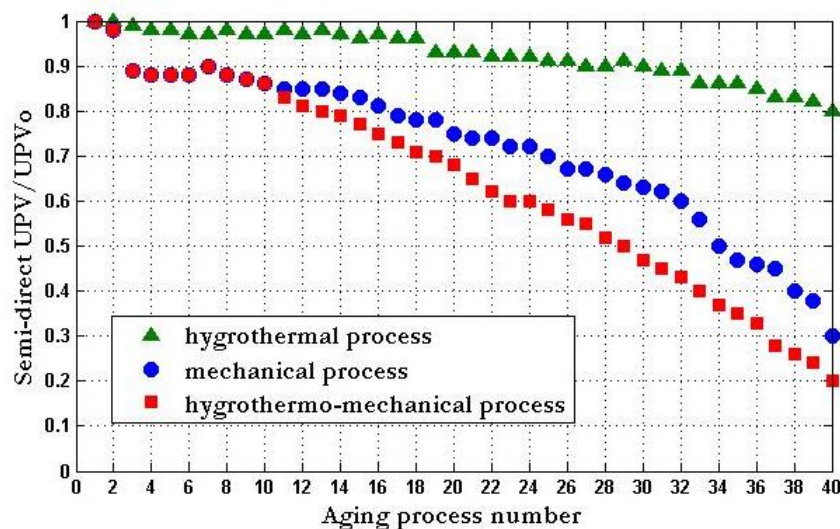


Figure 2.28: Evolution dans le temps des vitesses ultrasoniques semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition

4.2.3. EFFET DE L'ELANCEMENT DES EPROUVETTES

L'évolution dans le temps des vitesses des ondes ultrasonores, se propageant à travers les échantillons de colonnes courtes prismatiques en béton en considérant les trois valeurs du rapport d'élanement h/b est présentée sur la Figure 2.29. Pour rappel, h et b représentent respectivement la hauteur et la largeur des éprouvettes.

Les résultats sont présentés en termes de rapport entre la vitesse instantanée des ondes ultrasonores UPV du matériau endommagé, mesurée après l'application de n cycles du processus de vieillissement, et la vitesse initiale des ondes ultrasonores UPVo du matériau non endommagé, mesurée avant le début du processus de vieillissement.

Comme le montre la Figure 2.29, pour tous les échantillons, après application d'un certain nombre n cycles de vieillissement, on observe une atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores.

En effet, Nous pouvons constater, qu'à partir du cycle 1 au cycle 10, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est faible. Après le cycle 10, en particulier pour les échantillons dont le rapport d'élanement est égal à 2 et 4, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores est plus notable. Dans le cas des spécimens dont le rapport d'élanement est égal à 1, l'atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores devient notable après le cycle 16.

Lorsque nous comparons l'atténuation des éprouvettes avec un rapport d'élanement de 4, 2 et 1 après le processus de vieillissement, le rapport UPV/UPVo est égal respectivement à 0,2, 0,24 et 0,27. Bien que cette différence soit faible, elle indique que le rapport h/b a un effet sur le comportement des éprouvettes.

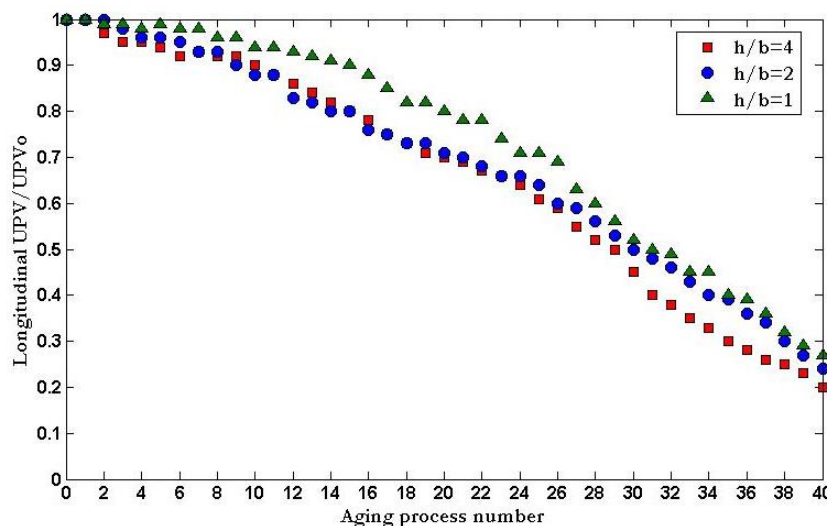


Figure 2.29: Evolution dans le temps des vitesses de propagation dans le sens longitudinal des impulsions ultrasoniques en fonction du nombre de cycle de vieillissement pour différentes valeurs de l'élanement h/b des éprouvettes.

4.3. EVOLUTION DANS LE TEMPS DU DOMMAGE SUIVANT L'ESSAI ULTRASONIQUE

4.3.1. EFFET DU NIVEAU DE CHARGEMENT

La variable d'endommagement D peut être définie en se basant sur la mesure des vitesses des ondes ultrasonores [28] comme suit :

$$D = 1 - (UPV/UPV_0)^2 \quad 1$$

Avec

UPV : Vitesse instantanée mesurée des ondes ultrasonores du matériau endommagé après n cycles de vieillissement

UPV₀ : Vitesse initiale mesurée des ondes ultrasonores du matériau non endommagé autrement dit avant le début du processus de vieillissement.

L'évolution dans le temps de cette variable d'endommagement D en fonction du niveau de chargement appliqué et cela pour les trois configurations de la mesure des vitesses ultrasoniques, est représenté sur les Figures 2.30, 2.31 et 2.32.

Comme nous pouvons ces Figures, la variable d'endommagement D de tous les échantillons de colonnes courtes prismatiques en béton augmente au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de cycles appliqués.

Nous constatons aussi à partir de ces mêmes figures, que l'endommagement D obtenu après les cycles de vieillissement, pour les éprouvettes chargées à 70 % de R_d , est supérieur à l'endommagement D obtenu pour les éprouvettes chargées à 50 % et 30 % de R_d . Ce résultat était prévisible du fait que le chargement appliqué constitue un élément principal dans le processus de dégradation des ouvrages.

Il convient d'indiquer que pour les éprouvettes chargées à 50 % et 70 % de R_d , la valeur finale de l'endommagement est pratiquement la même en cas de mesure longitudinale, alors qu'elle est différente en cas de mesure transversale et semi-directe.

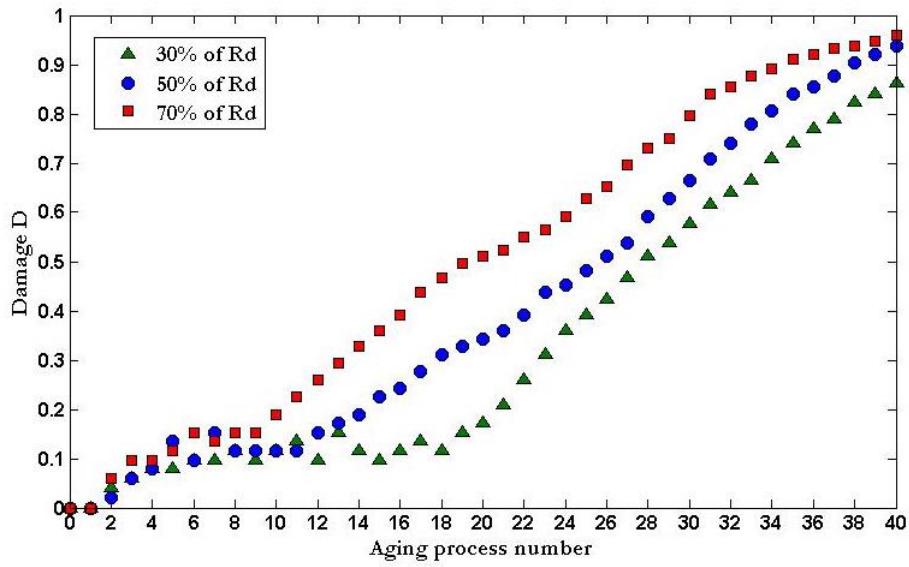


Figure 2.30: Evolution dans le temps du dommage D longitudinal en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement.

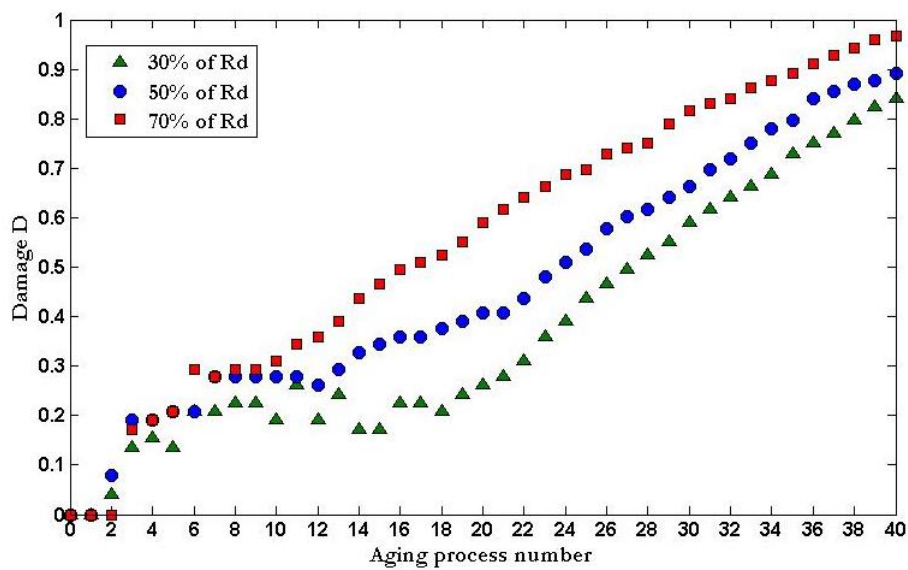


Figure 2.31: Evolution dans le temps du dommage D transversal en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement.

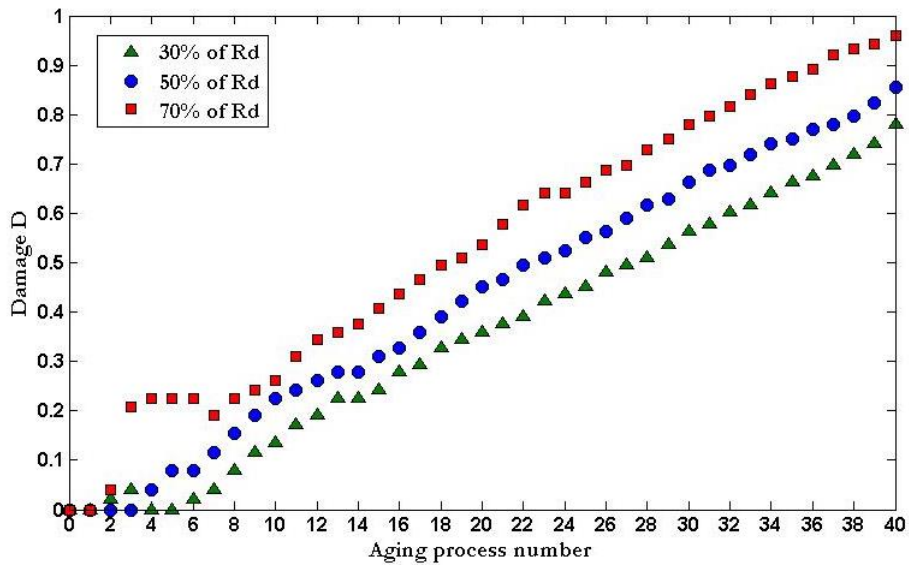


Figure 2.32: Evolution dans le temps du dommage D semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement.

4.3.2. EFFET DES CONDITIONS D'EXPOSITION

L'évolution dans le temps de cette variable d'endommagement D en fonction des conditions d'exposition et cela pour les trois configurations de la mesure des vitesses ultrasoniques, est représenté sur les Figures 2.33, 2.34 et 2.35.

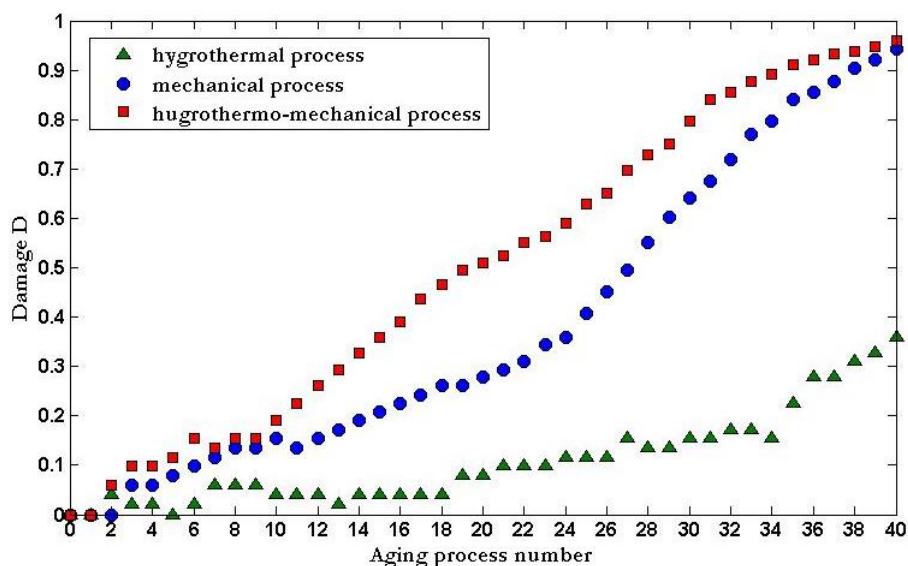


Figure 2.33: Evolution dans le temps du dommage D longitudinal en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.

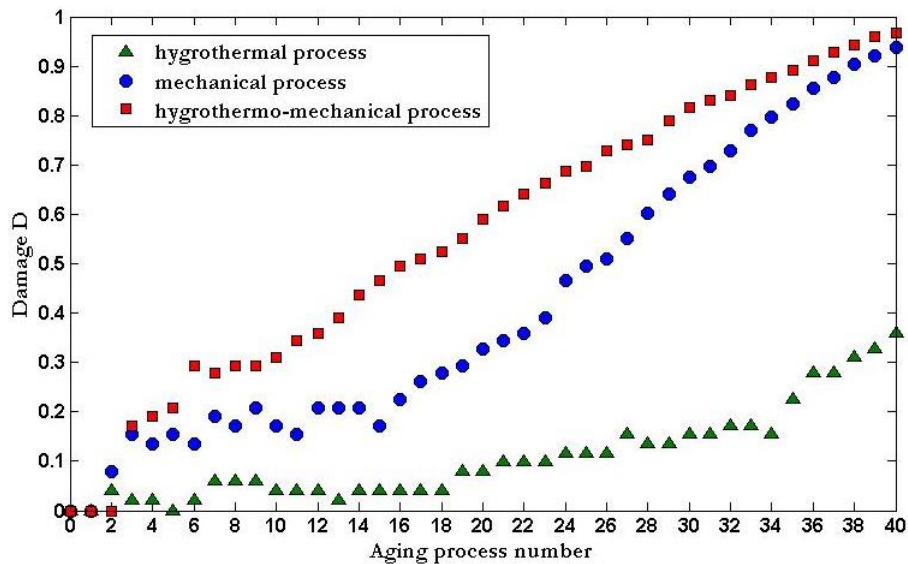


Figure 2.34 : Evolution dans le temps du dommage D transversal en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition.

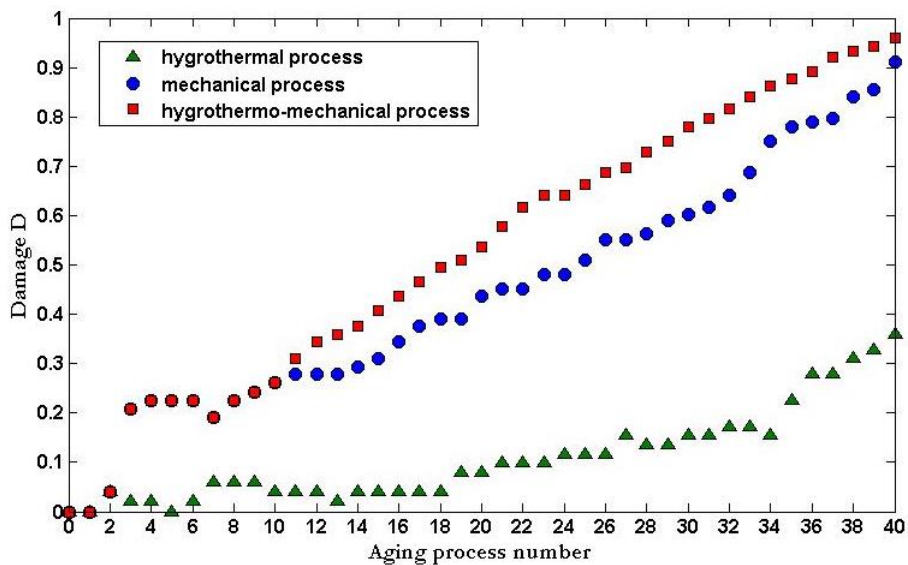


Figure 2.35: Evolution dans le temps du dommage D semi-direct en fonction du nombre de cycle pour différentes conditions d'exposition

Comme on peut le voir sur ces Figures, l'endommagement D obtenu après les cycles de vieillissement, pour les éprouvettes chargées selon le procédé hygrothermomécanique, est supérieur à l'endommagement D obtenu pour les éprouvettes soumises au procédé mécanique. Il convient d'indiquer que la valeur finale du dommage après 40 cycles est pratiquement la même. Dans le cas des éprouvettes soumises au procédé hygrothermique, la

valeur de l'endommagement est moins importante que pour les deux autres éprouvettes.

4.4. COURBES CHARGEMENT-DEPLACEMENT

Dans cette section, nous rendons compte de notre étude du comportement des spécimens en matière d'endommagement à l'aide d'un essai destructif. Notre analyse est basée sur la courbe charge-déplacement obtenue avec l'essai de compression longitudinale. À titre d'exemple, nous montrons sur la Figure 2.36 une courbe charge-déplacement expérimentale typique obtenue. Au début du processus de vieillissement, les courbes sont pratiquement parallèles, tandis qu'à la fin du processus de vieillissement, on observe un déplacement de plus en plus important allant de 0,6 à 1,8 mm.

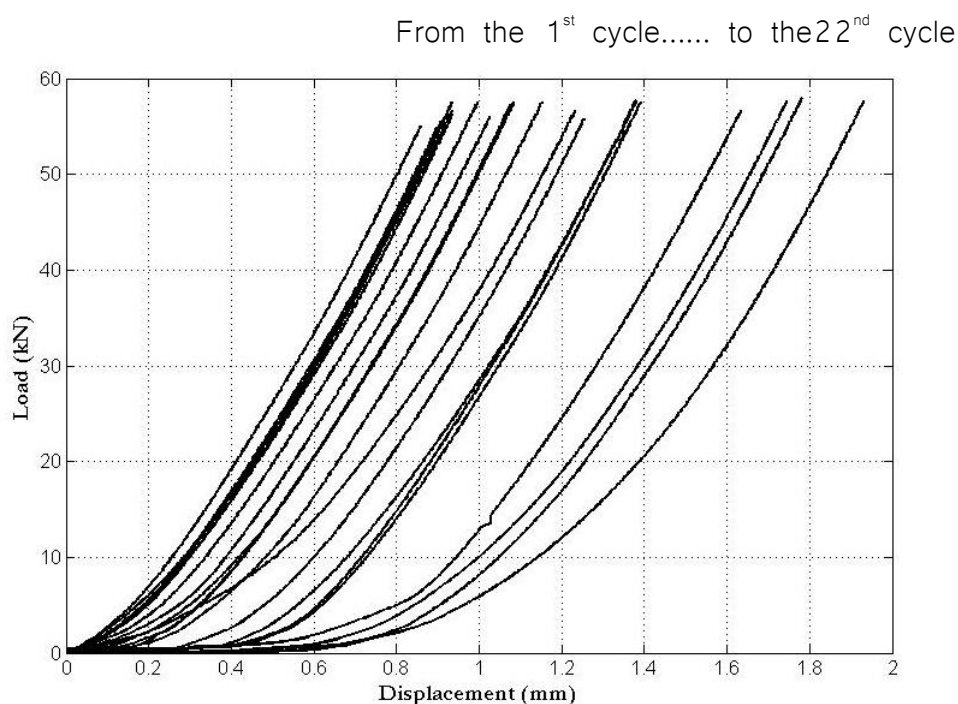


Figure 2.36: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette avec un niveau de chargement de 70%Rd

les Figures 2.37, 2.38 et 2.39 montrent les courbes charge-déplacement expérimentales des échantillons chargés avec différentes valeurs de charge de compression, à savoir 30 %, 50 %, 70 % de Rd et dans différentes conditions d'exposition, à savoir un processus de vieillissement mécanique et hygrothermomécanique. Les courbes charge-

déplacement obtenues ont pratiquement la même évolution. On peut observer qu'avec l'augmentation du nombre de cycles de vieillissement, les courbes charge-déplacement sont progressivement plus inclinées. Cela indique que la rigidité du matériau diminue progressivement. Par conséquent, pour une même valeur de charge, le déplacement est plus important.

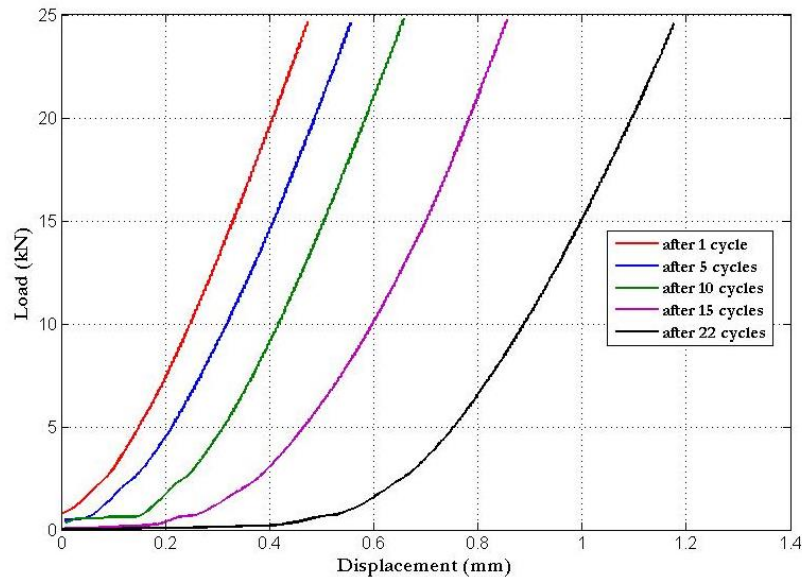


Figure 2.37: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 30% de R_d

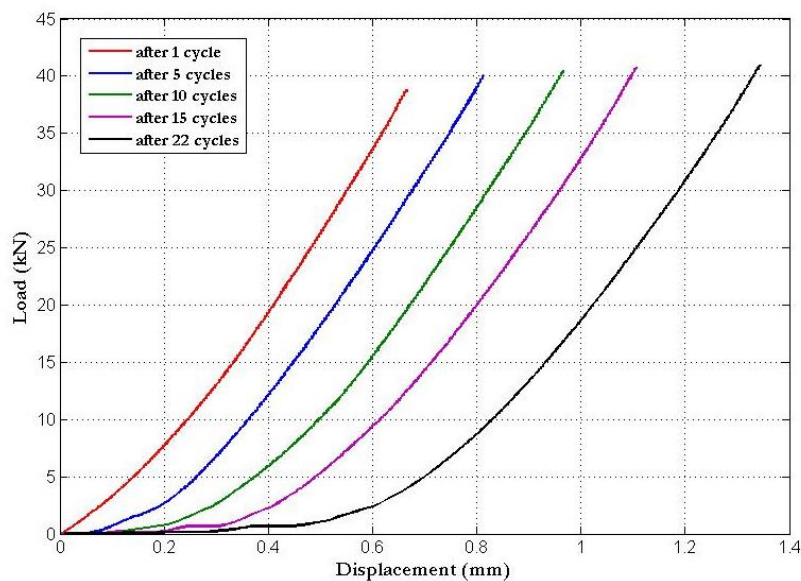


Figure 2.38: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 50% de R_d

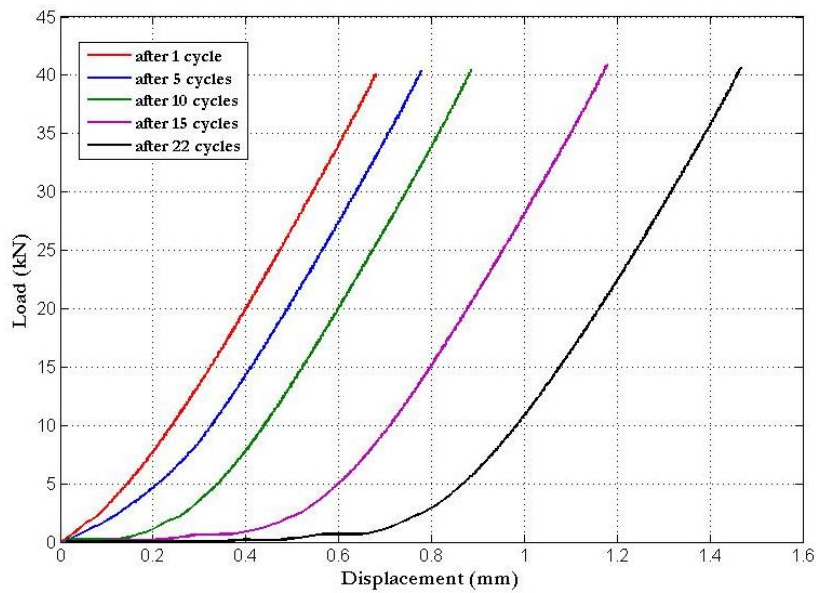


Figure 2.39: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles hygrothermo-mécanique avec un niveau de chargement de 50% de R_d

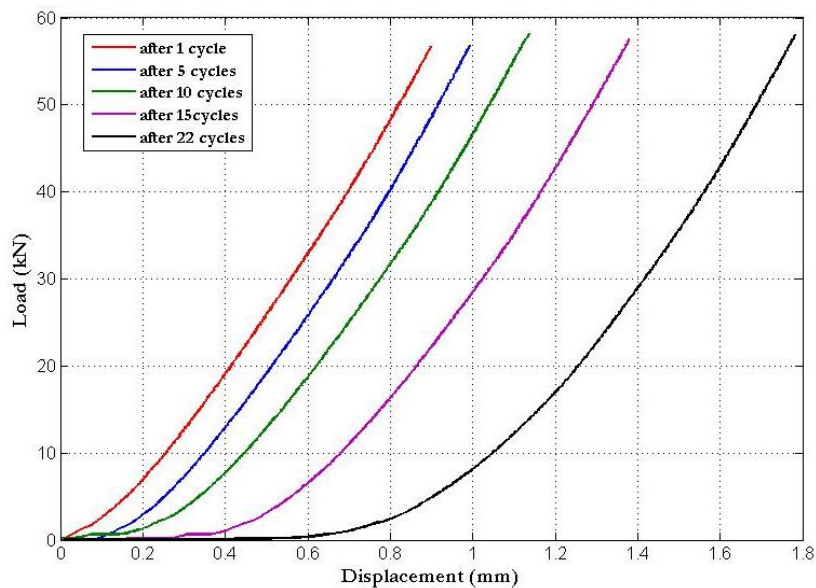


Figure 2.40: Courbe Chargement-Déplacement obtenu lors de l'essai de compression sur une éprouvette soumise à un des cycles mécaniques avec un niveau de chargement de 70% de R_d

Nous présentons sur la Figure 2.41 l'évolution dans le temps de la courbe chargement-déplacement des échantillons de colonnes courtes en béton pour les trois différents niveaux du chargement appliqué.

Dans un premier temps, on peut constater que pour le premier cycle, les courbes charge-déplacement sont identiques. Cela indique qu'il n'y a pas de dommages notables au début du processus de vieillissement. Cela confirme qu'il n'y a pas une grande variabilité de la qualité de notre béton. Ceci est en accord avec l'analyse statistique des mesures initiales de vitesse d'impulsion ultrasonique présentées ci-dessus.

Par la suite, à mesure que le nombre de processus de vieillissement augmente, la différence entre les courbes est plus notable. Cela indique qu'après plusieurs cycles de vieillissement, la dégradation est plus importante.

La Figure 2.42 montre l'évolution dans le temps de la courbe chargement-déplacement des échantillons de colonnes courtes en béton pour différentes conditions d'exposition. Comme le montre cette Figure, les courbes charge-déplacement restent identiques au début du processus de vieillissement. En outre, comme observé ci-dessus, la différence entre les courbes augmente à mesure que le nombre de processus de vieillissement augmente.

Pour illustrer le comportement des échantillons de colonnes courtes en béton sous différentes conditions de chargement et d'exposition, les courbes chargement-déplacement obtenues après le 22^{ème} processus de vieillissement sont comparées sur la Figure 2.43 à la courbe chargement-déplacement de l'échantillon de référence. On peut observer que les courbes chargement-déplacement obtenues après le processus de vieillissement sont inférieures à la courbe de l'échantillon de référence. Cette différence peut s'expliquer par la perte de rigidité des éprouvettes due à la dégradation qui s'est produite progressivement avec le processus de vieillissement.

La Figure 2.43 montre également que cette différence s'accroît lorsque le niveau de chargement augmente et lorsque l'on considère le processus combiné du vieillissement hygrothermique et mécanique.

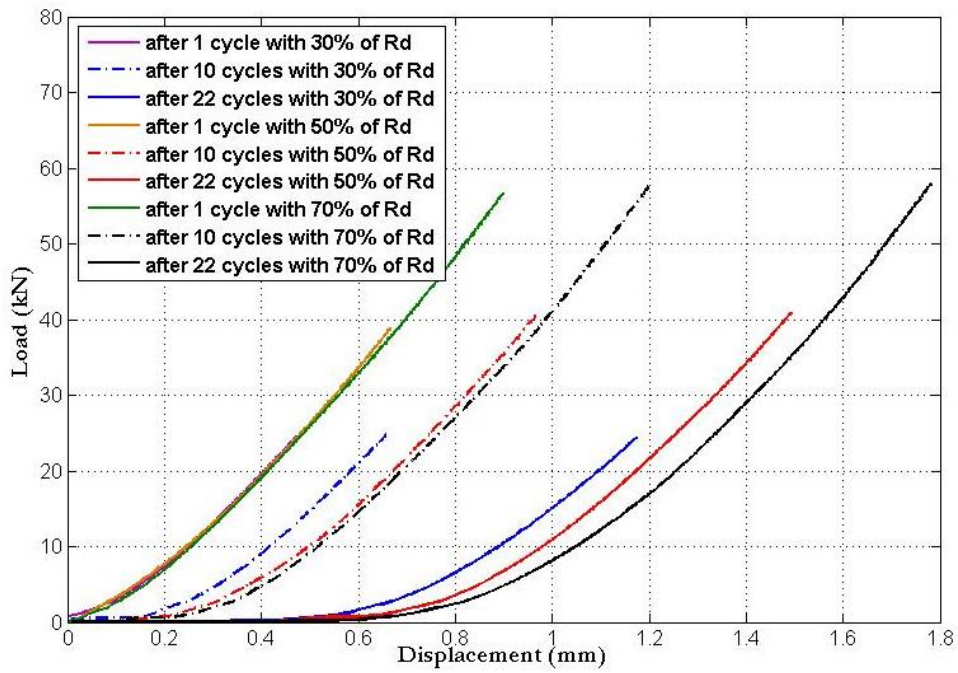


Figure 2.41: Evolution des courbes Chargement-Déplacement en compression pour différents niveaux de chargement.

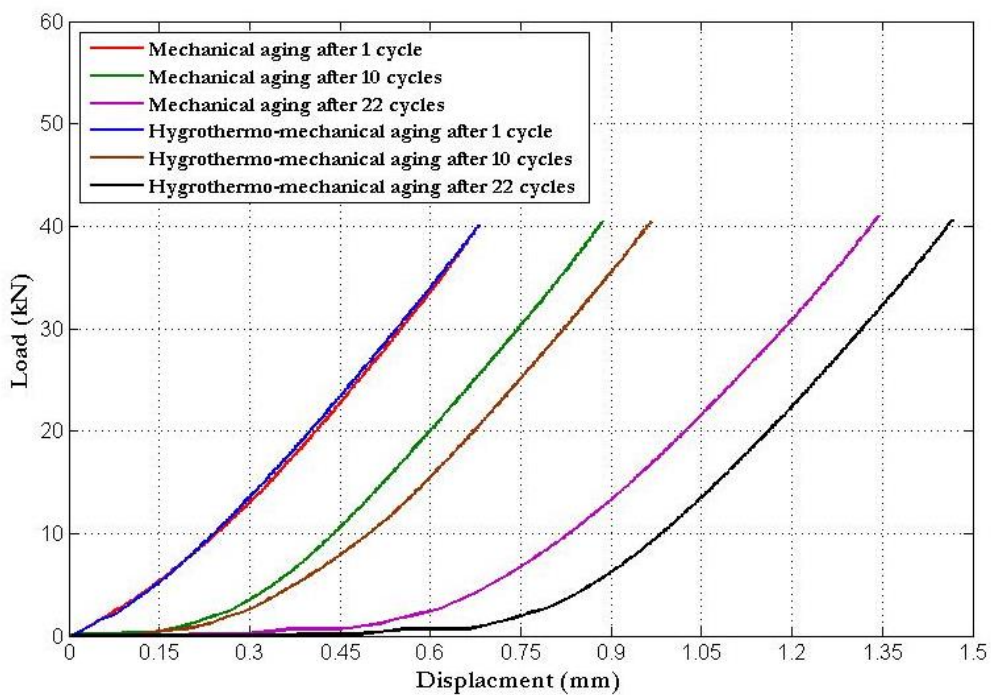


Figure 2.42: Evolution des courbes Chargement-Déplacement en compression pour différentes conditions d'exposition.

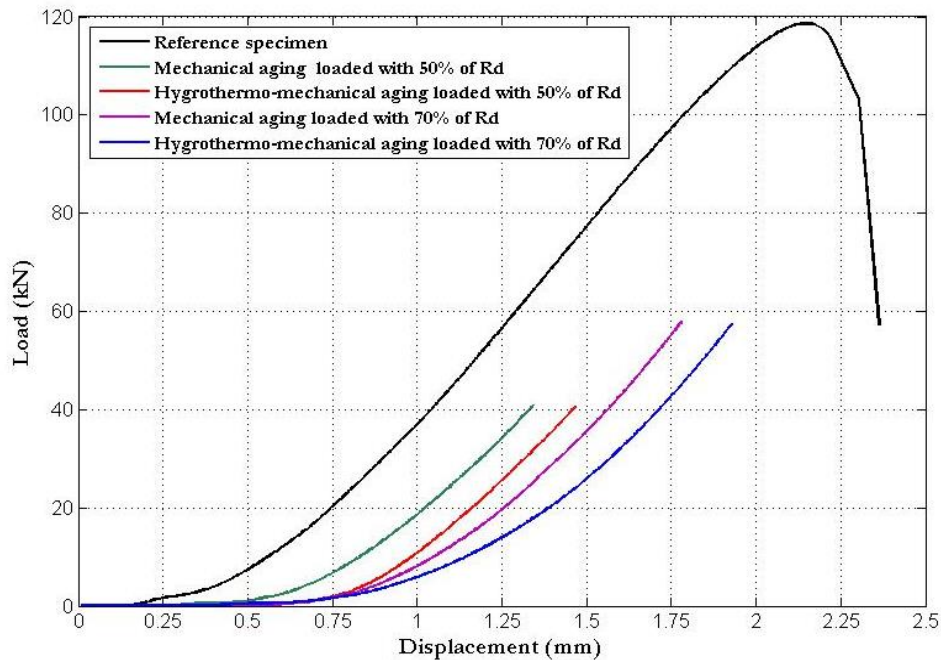


Figure 2.43: Courbes Chargement-Déplacement des éprouvettes comparées au béton témoin pour différents niveau de chargement et différentes conditions d'exposition.

4.5. EVOLUTION DANS LE TEMPS DU DOMMAGE SUIVANT LES COURBES CHARGEMENT-DEPLACEMENT

La variable d'endommagement D peut être exprimée comme la perte de rigidité [28]. Dans ce cas, la variable d'endommagement peut s'écrire en considérant le module d'Young comme suit :

$$D = 1 - E_f / E_0,$$

où

E_f représente le module d'Young du matériau endommagé après n cycles de vieillissement

E_0 représente le module d'Young du matériau non endommagé avant le début du processus de vieillissement.

En considérant la forme des courbes chargement-déplacement, nous définissons deux modules d'Young, à savoir le module d'Young initial et le module d'Young final. Le module d'Young initial est calculé dans la première partie des courbes chargement-déplacement (après 5kN) et le

module d'Young final est calculé dans la deuxième partie des de ces courbes.

Nous présentons sur la Figure 2.44 l'évolution dans le temps de la variable d'endommagement D pour les colonnes courtes prismatiques en béton soumises à un processus de vieillissement hygrothermo-mécanique en considérant un niveau de chargement de l'ordre de 70 % de R_d .

Comme le montre la Figure 2.44, la variable d'endommagement D augmente avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués.

nous pouvons aussi constater à partir de cette même Figure, que du cycle 1 au cycle 9, la valeur de la variable d'endommagement D reste faible et est de l'ordre de 0,1.

L'endommagement calculé en considérant le module de Young initial et final est pratiquement le même. A partir du cycle 10, la différence devient notable.

Après 22 cycles de vieillissement, le dommage obtenu en considérant le module d'Young initial est égal à 0,67 et le dommage obtenu en considérant le module d'Young final est égal à 0,5.

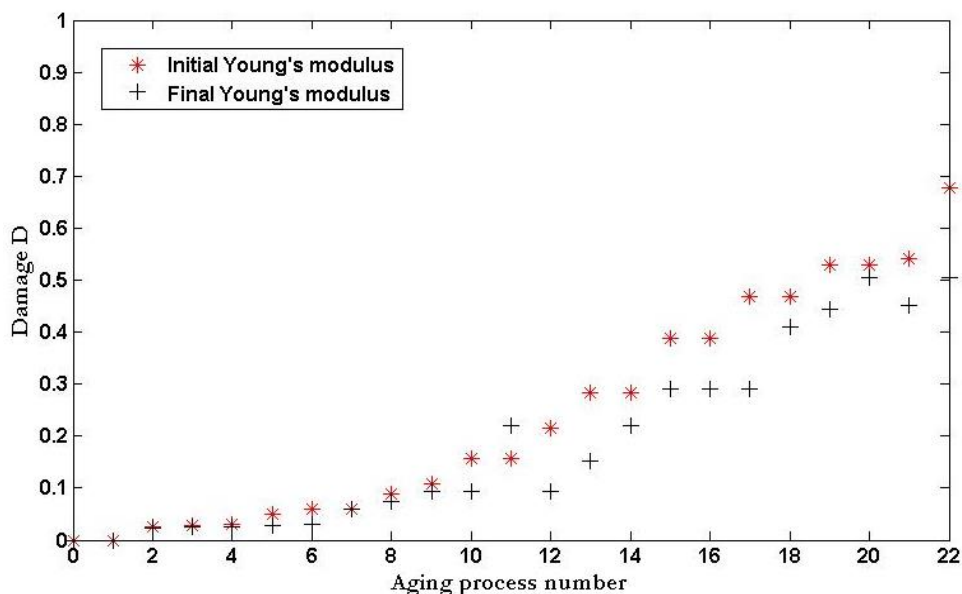


Figure 2.44: Courbes Chargement-Déplacement des éprouvettes comparées au béton témoin pour différents niveau de chargement et différentes conditions d'exposition.

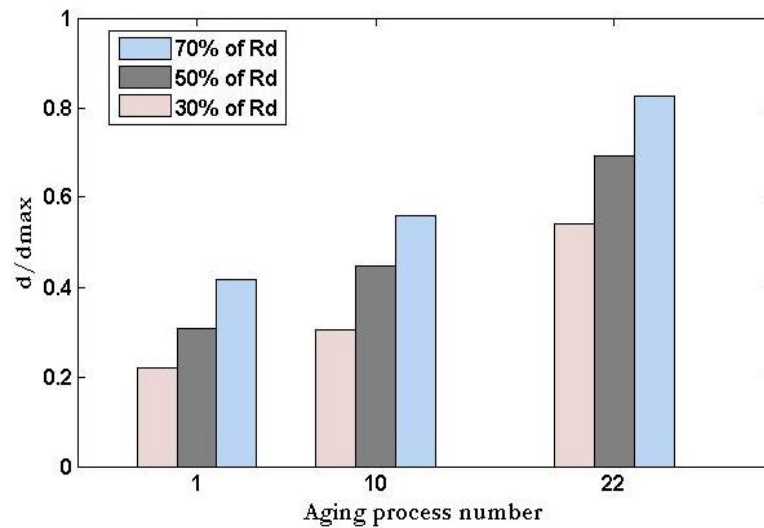


Figure 2.45 : Evolution du dommage d/d_{max} en fonction des cycles pour différents niveaux de chargement et différentes conditions d'exposition.

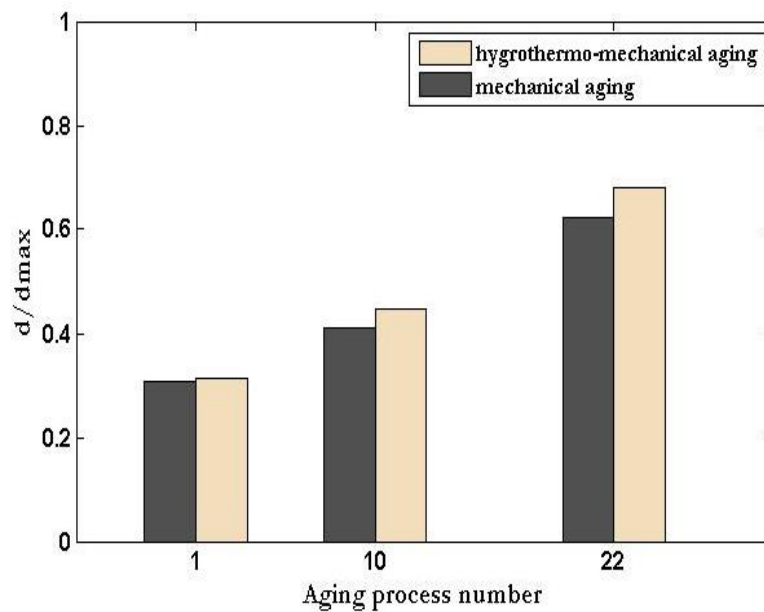


Figure 2.46: Evolution du dommage d/d_{max} en fonction des cycles pour différentes conditions d'exposition dans le cas d'une éprouvette soumise à 50% de R_d .

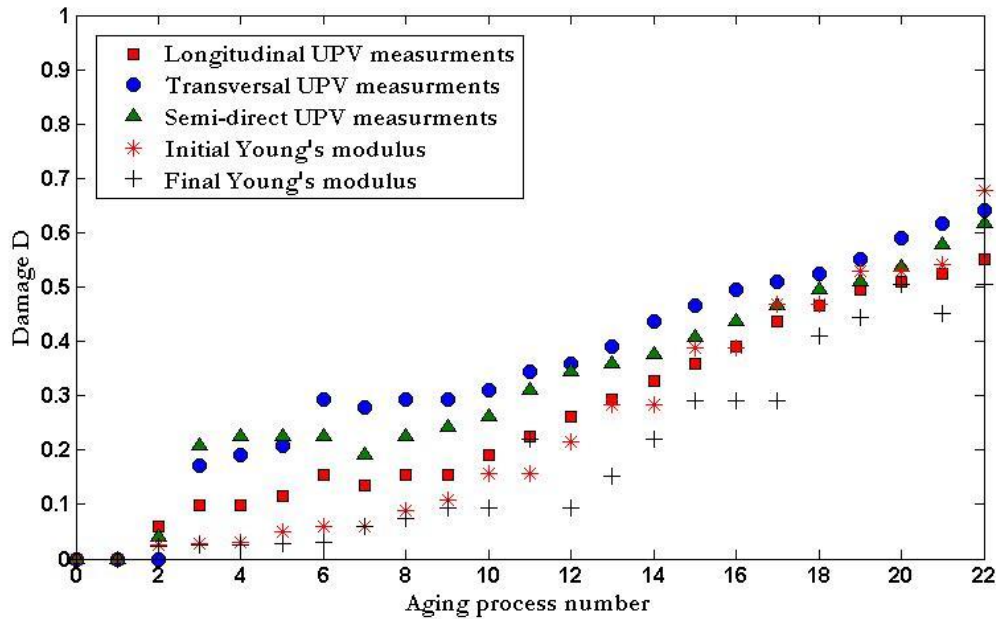


Figure 2.47: Comparaison entre les différentes estimations de la variable endommagement D dans le cas d'une éprouvette soumise à 70% de R_d .

Nous présentons dans la Figure 2.48, l'évolution dans le temps de la propagation des fissures dans une colonne courte prismatique $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$ soumise à un niveau de chargement de l'ordre de 70% de la charge de calcul R_d .

Au début du processus de vieillissement, comme le montre la Figure 2.48-a, aucune fissure n'est observée.

Au fur et à mesure que le nombre de cycles de vieillissement augmentent, on observe de plus en plus de fissures comme illustré sur les figures 2.48-b et 2.48-c.

À la fin du processus de vieillissement, comme le montre la Figure 2.48-d, les fissures se propagent d'une manière plus importante et apparaissent dans toutes les régions de l'éprouvette testée.

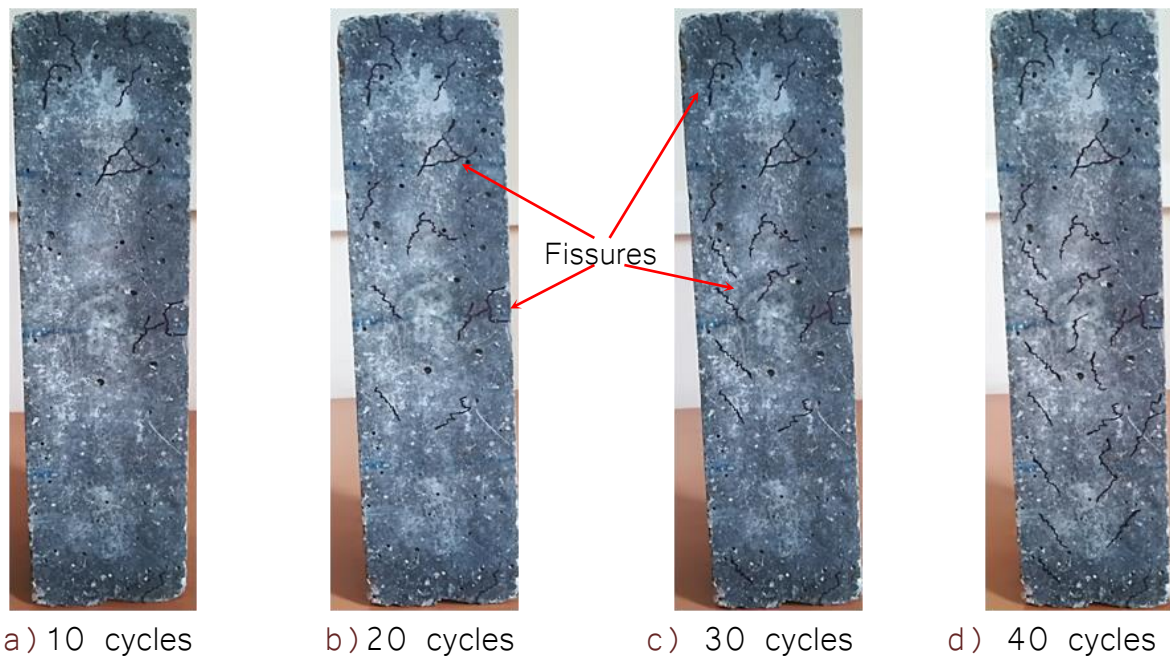


Figure 2.48 : Evolution dans le temps des fissures en fonction du nombre de cycles dans le cas d'une éprouvette soumise à un niveau de chargement de 70% de Rd.

4. CONCLUSION

L'objectif principal de cette partie de notre travail est d'étudier expérimentalement les effets combinés sur un élément en béton, des sollicitations dues à l'exposition aux effets hygrothermiques et aux sollicitations mécaniques. C'est pourquoi nous avons essayé de reproduire autant que possible les conditions réelles auxquelles seront soumises les structures (ouvrages) de génie civil.

Ajouter à cela, nous avons illustré à travers ce travail expérimental la combinaison d'un essai non destructif (NDT) et un essai destructif (DT) pour l'analyse et le suivi de la dégradation d'une colonne courte prismatique en béton sous l'effet combiné des deux sollicitations présentées précédemment à savoir : Un chargement mécanique qui consiste en un chargement-déchargement en compression simple et une exposition à un effet hygrothermique qui consiste en une immersion dans de l'eau durant 24 heures, par la suite évaporation de l'eau en température ambiante durant 24 heures et enfin une cure thermique suivant un cycle de température bien défini.

Afin de détecter les dégradations (dommages) subi par les éprouvettes en béton, nous avons utilisé d'une part les mesures des vitesses de propagation des impulsions (ondes) ultrasoniques (UPVTesting). D'autre part, nous avons utilisé l'essai de compression simple.

En se basant sur les différents résultats expérimentaux obtenus et sur les différentes observations du comportement des colonnes courtes en béton étudiées, nous pouvons retenir les points essentiels suivants :

- Pour toutes les éprouvettes étudiées, après n cycles de vieillissement accéléré, nous constatons une atténuation des vitesses de propagation des impulsions ultrasoniques. Cette constatation est en adéquation avec les résultats issus de la littérature [29].
- Au début du processus de vieillissement, les vitesses des ondes ultrasoniques diminuent légèrement. Cependant, à la fin du processus cette diminution est plus importante. En effet, les courbes des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques obtenues pour les éprouvettes testées, montrent généralement trois (3) étapes en particulier dans le cas des éprouvettes soumise au processus du vieillissement mécanique et au processus du vieillissement hygrothermo-mécanique. Il n'est pas aisé de distinguer entre ces trois étapes, mais cela correspond aux travaux issus de la littérature [28].
- Le processus de vieillissement hygrothermique a un faible effet sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques comparé à l'effet du processus de chargement et/ou à l'effet du processus hygrothermomécanique combiné.
- L'atténuation de la vitesse des ondes ultrasoniques augmente lorsque le niveau du chargement appliqué augmente. Ce qui bien évidemment est tout à fait logique et prévisible.
- L'effet du rapport d'élanement sur l'atténuation des vitesses ultrasoniques mesurées dans ce travail apparaît légèrement selon les valeurs de h/b considérées. Pour plus de compréhension, il sera intéressant d'étudier les valeurs élevées de ce rapport.
- Au début du processus de vieillissement, les courbes charge-déplacement restent identiques. Au fur et à mesure que le nombre

de cycles de vieillissement augmente, la différence entre les courbes devient plus notable.

- Globalement, avec l'augmentation du nombre de cycles de vieillissement, les résultats issus des essais de mesure de la vitesse de propagation de l'impulsion ultrasonique (UPV) concordent bien avec les résultats issus des essais de compression simple.
- Nous pouvons dire que la courbe de décroissance de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est capable de refléter le processus d'évolution de la dégradation de nos éprouvettes étudiés.

Il y a lieu de préciser dans ce cadre, que l'objectif de ce genre d'analyse expérimentale est d'établir sur la base des résultats expérimentaux des modèles théoriques qui permettent de simuler dans le temps le comportement de l'élément étudié selon les conditions d'exposition.

Cet objectif, nous n'avons pas pu l'atteindre pour diverses raisons. Nous pouvons citer principalement les problèmes techniques liés à la machine d'essai qui est tombé en panne en plein travaux de cette thèse ce qui nous a contraints à limiter la durée et la quantité d'observations.

Ainsi, il serait intéressant de reprendre ce travail avec un dispositif expérimental plus performant à savoir :

- D'une part sur le plan de l'application des sollicitations en faisant appel à une chambre climatique et à une machine d'essais cycliques.
- D'autre part, l'utilisation d'un dispositif de mesure plus performant et continu dans le temps.



Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sanjeev K.V., Sudhir S.B., Saleem A. (2013). Estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structures., *American J. of Civ. Eng. and Architecture*, 1(5), pp. 92-96. DOI:10.12691/ajcea-1-5-1
- [2] Gjrv, O.E. (2011). Durability of concrete structures., *Arab J Sci. Eng.*, 36:151-172. doi :10.1007/s13369-010-0033-5.
- [3] Stochino et alii, F. (2018). Assessment of RC Bridges integrity by means of low-cost investigations., *Frattura ed Integrità Strutturale*, 46, pp. 216-225. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.46.20.
- [4] Pijaudier-Cabot, G., Khalil, H., Loukili, A., Omar, M. (2004). Ageing and durability of concrete structures., *Degradations and Instabilities in Geomaterials*, 461 Springer, pp. 255-286. DOI:10.1007/978-3-7091-2768-1_9. hal- 01572477.
- [5] Somasundaram, V., Calvin, K.C. (2008). Aging degradation of mechanical structures., *J. of mechanics of materials and structures*, 3(10). pp. 1923-1938.
- [6] Pinto, S., Hobs, S., Hover, K. (2002). Accelerated aging of concrete: a literature review., *Federal Highway Administration*, <https://trid.trb.org/view/706737>. 94 p.
- [7] Wan-Wendner, R. (2018). Aging concrete structures: a review of mechanics and concepts, *Journal of Land Management, Food and Environment*, 69 (3), pp. 175-199. DOI: 10.2478/boku-2018-0015.
- [8] Qifang, X., Lipeng, Z., Shenghua, Y., Baozhuang, Z., and Yaopeng, W. (2019). Effects of high temperatures on the physical and mechanical properties of carbonated ordinary concrete., *Adv. In Mater. Sci. and Eng.* 10 pages. DOI: 10.1155/2019/5753232
- [9] Bochen, J., Slusarek, J. (2020). Analysis of resistance to accelerated aging of the top layer of small-sized concrete elements. A case study., *Const. and Build. Mater.* 264, 120211, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120211.
- [10] Knzel H., Holm, A. Krus, M. (2008). Hygrothermal properties and behaviour of concrete., *WTAAlmanach*, pp. 161.
- [11] Kallel, H., Carré H., Laborderie, C., Masson, B., Tran, N. (2016). Effects of the hygrothermal conditions on the fracture energy of the concrete., *Key Eng. Materials.*, 711, pp. 397-403. DOI: 10.4028 /www .scientific.net /KEM.711.397.

- [12] Mateos, A. et al. (2020). Structural response of concrete pavement slabs under hygrothermal actions., *Const. and Build. Mater.*, 243, 118261. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118261.
- [13] Mukhtar, F.M., Peiris, A. (2021). FRP-concrete bond performance under accelerated hygrothermal conditions., *Const. and Build. Mater.*, 270, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121403.
- [14] Zdenek, P., Milan, J., (2018). Creep and hygrothermal effects in concrete structures., DOI: 10.1007/978-94-024-1138-6.
- [15] D.P. Chen 1 and all. (2015) Advances in multi-scale simulation of hydro-thermo-mechanical deformation behavior of structural concrete., *Int J. of Civil Eng.*, 13. pp. 267-277. DOI: 10.22068/IJCE.13.3.267[URL:http://ijce.iust.ac.ir/article -1-676-en.html].
- [16] Karavokyros, L., George Batis, G., Katsiotis, N., Tzani, N, Beazi-Katsioti, M. (2020). Durability of reinforced concrete beams under simultaneous flexural load in corrosive environment. *J. of Mat. Sci. and Chemical Eng*, 8 (4). pp. 32-45. DOI: 10.4236/msce.2020.84003.
- [17] Gawina, D., Pesavento, F. Schrefler, A. (2003). Modelling of Hygro-Thermal Behaviour of Concrete at High Temperature with Thermo-Chemical and Mechanical Material Degradation. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 192(13-14), pp. 1731-1771. DOI:10.1016/S0045-7825(03)00200-7
- [18] Kim, J.-K., Hun Han, S. and Kyun Park, S. (2002). Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(7), pp. 1095-1100. DOI:10.1016/s0008-8846(02)00745-7
- [19] Baroghel-Bouny, V., Thiery, M., Dierkens, M. and Wang, X. (2016) Aging and durability of concrete in lab and in field conditions – pore structure and moisture content gradients between inner and surface zones in RC structural elements, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6(3), pp. 149-194, DOI: 10.1080/21650373.2016.1169232
- [20] Ola Adel, Q., (2018). A review paper on specimens size and shape effects on the concrete properties, *Int. J. of Recent Adv. in Sci. and Tech.*; 5 (3), pp. 13-25. DOI: 10.30750/ijarst.533.
- [21] Salah Sahabi, A., Matzarakis, A., (2017). Seasonal Regional Differentiation of Human Thermal Comfort Conditions in Algeria, *Advances in Meteorology*, 14 pages, DOI: 10.1155/2017/9193871

- [22] Bamforth, P., Chisholm, D., Gibbs, J., Harrison, T. (2008). Properties of Concrete for use in Eurocode 2. 59p.
- [23] Helal, J., Sofi, M., Mendis, P. (2015). Non-destructive testing of concrete: a review of methods., *Elect J. of Stru. Eng.*, 14 (1). pp. 97-105.
- [24] Karaiskos, G., Deraemaeker, A., Aggelis, D.G., Van Hemelrijck, D. (2015). Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method., *Smart Mater. Struct.*, 24. 113001. DOI: 10.1088/0964-1726/24/11/113001.
- [25] Ndagi, A., Umar, A., Hejazi, F., Jaafar, M.S. (2019). Non-destructive assessment of concrete deterioration by ultrasonic pulse velocity: A review., *IOP Conference Series :Earth and Envir. Sci.*, 357. 012015. DOI: 10.1088 /1755-1315/357/1/012015.
- [26] Nandipati, S., Ravi Kumar, M., Barkavi, T., Natarajan, C. (2018). Structural health monitoring: detection of concrete flaws using ultrasonic pulse velocity., *J. of Buil. Pathology and Rehabilitation*, 3. DOI: 10.1007/s41024-018-0036-2.
- [27] Presa, L., Costafreda, J.L., Martín, D.A. (2021). Correlation between uniaxial compression test and ultrasonic pulse rate in cement with different pozzolanic additions., *Appl. Sci.*, 11, 3747. DOI: 10.3390/app11093747.
- [28] Xiao, J.-Q., D.-X. Ding, F.-L. Jiang, and G. Xu. (2010). Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 47 (3), pp. 461 - 468. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.11.003.
- [29] A.M. Mahmoud et al (2010). Non-destructive ultrasonic evaluation of CFRP-concrete specimens subjected to accelerated aging conditions, *NDT&E International* 43, pp. 635-641. DOI:10.1016/j.ndteint.2010.06.008

3

**Etude Expérimentale D'Une Poutre
En Béton Armé Sous L'Effet Hydro-
Thermo-Mécanique & Chlorures**

3

ETUDE EXPERIMENTALE D'UNE POUTRE EN BETON ARME SOUS L'EFFET HYGRO-THERMO-MECANIQUE & CHLORURES

1. INTRODUCTION

L'effet de la corrosion sur les matériaux est connu depuis des milliers d'années. Toutefois, des outils plus efficaces ont été récemment mis au point pour étudier la corrosion. Dans les structures en béton, la corrosion de l'armature donne une très bonne idée de la performance du matériau composite ainsi obtenu.

La pénétration d'agents agressifs est la cause physico-chimique la plus importante qui réduit la durée de vie des structures en béton armé par la corrosion des armatures. La corrosion de l'acier est principalement à l'origine de l'éclatement du béton et de l'apparition de fissures dues à diverses actions environnementales, en particulier dans les ponts et les bâtiments.

La corrosion des armatures d'acier dont les facteurs sont résumés dans la Figure 3.1, est l'un des principaux problèmes causant des dommages importants aux structures en béton armé (CA). La corrosion peut réduire considérablement la capacité portante et la durabilité en provoquant une réduction de la section transversale de l'acier, une

fissuration, un écaillage de la couverture de béton et une dégradation entre les barres d'acier de renforcement et le béton environnant [3],[4].

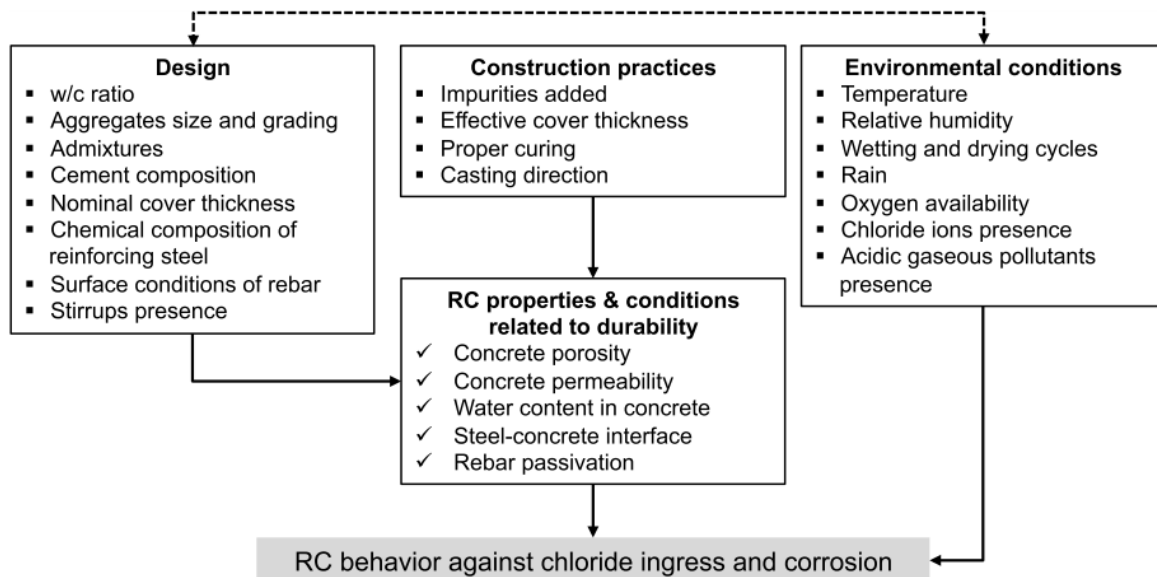


Figure 3.1 : Facteurs affectant la pénétration des chlorures et les processus de corrosion dans les éléments en béton armé [1].

De nombreuses structures côtières (ouvrages côtiers) en béton armé, notamment des ponts en béton armé, des plates-formes offshore et des structures de forage mobiles, ont été soumises à des charges cycliques combinées à une corrosion de l'acier induite par les chlorures [5], [6], [7].

Au cours des dernières décennies, la corrosion a provoqué des fissures [8], [9], une perte de résistance de la liaison [10], [11] et une diminution de la ductilité [12]. L'interaction de la structure avec des matériaux agressifs diminue la réserve alcaline présente dans le béton et élimine la couche protectrice d'oxyde présente dans l'acier [13], [14].

Dans des conditions environnementales agressives, une couche de béton insuffisamment épaisse ou son endommagement entraîne généralement la corrosion de l'acier d'armature. L'endommagement de l'enveloppe de béton peut être causé par une action mécanique (contrainte de traction trop élevée) ou peut être la conséquence d'effets non mécaniques (température, retrait, etc.) et tout cela peut être induit par la corrosion de l'armature qui conduit à une capacité portante.

L'évaluation non destructive de la résistance du béton dans les structures existantes est aujourd'hui un défi réel et complexe. De nombreuses études et programmes de recherche ont été menés afin de développer des outils et des modèles pour évaluer cette résistance [15]

Dans la littérature, plusieurs chercheurs se sont attelés à créer et à développer des méthodes non destructives nécessaires pour comprendre le phénomène de corrosion des armatures dans les structures de génie civil.

L'approche stratégique pour prévenir la dégradation causée par la corrosion reste l'utilisation de CANIN + qui fournit plus d'informations pour le travail d'investigation des ingénieurs [2].

Le principe de l'appareil CANIN+ (Corrosion Analysing Instrument) est basé sur la mesure du potentiel électrique détecté à la surface du béton généré par le processus électrochimique de corrosion des armatures. La méthode est applicable en laboratoire et sur le terrain ainsi que sur tous les éléments structurels en béton armé.

La précision de l'appareil est telle qu'elle facilite la détection même dans les cas où la corrosion de l'armature elle-même n'a pas encore commencé ou se trouve dans sa phase initiale[17]

Mais la majorité des études expérimentales réalisées visent à suivre l'évolution de la dégradation par la corrosion à l'aide de méthodes non destructives [18], [7], [17], [19], [16], [20].

C'est dans ce contexte, que s'inscrit cette deuxième partie de la thèse qui a pour objectif le suivi d'un élément structurel dans un environnement donné. Concrètement, il s'agit d'une étude expérimentale du comportement d'un élément en béton armé soumis à un processus de vieillissement combiné hygro-thermo-mécanique et chlorures.

Afin d'assurer le monitoring de cet élément de structure, nous avons fait appel aux différentes techniques de caractérisation des structures en béton. En effet, dans le but de quantifier (mesurer) les effets des conditions d'exposition sur les paramètres structurels des éprouvettes étudiés (résistance, dommage..), nous avons combiné les mesures suivantes :

- Mesure du potentiel de corrosion.
- Analyse par DRX
- Analyse par LIBS
- Analyse MEB & EDX

2. MATERIAUX ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. MATERIAUX

Dans cette deuxième partie de notre travail, nous avons utilisé la même formulation de béton utilisé dans la première partie. Ainsi nous rappelons que le ciment utilisé est un ciment Portland CPJ-CEM II/B 42.5 N. le sable utilisé est un sable naturel de rivière ayant un module de finesse de 3.25. Le gravier utilisé est un gravier concassé. Pour l'eau de gâchage et la cure nous utilisons l'eau du robinet. Nous rappelons aussi que les proportions des différents constituants sont comme indiqué dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1: Formulation du béton utilisé en [kg/m³].

Sable 0-3 [mm]	Gravier 3-8 [mm]	Gravier 8-15 [mm]	Ciment	Eau	E/C
621	370	850	350	182	0.52

Nous avons utilisé comme acier de renforcement (ferraillage) des barres d'acier normal HA8, présentant les propriétés mécanique suivantes : Module de Young $E=210.0\text{Gpa}$, coefficient de Poisson $\nu=0.33$ et une masse volumique de $\rho=7800\text{ Kg/m}^3$.

2.2. PREPARATION ET DESIGNATION DES EPROUVETTES

Comme le montre la Figure 3.2, dix huit éprouvettes prismatiques en béton armé de dimensions $7\text{cm}\times 7\text{cm}\times 28\text{cm}$, ont été préparées dans cette deuxième partie de cette étude. Le renforcement (ferraillage) adopté comme illustré sur la Figure 3.3 est constitué de deux barres d'acier normal HA8. La considération d'un enrobage des aciers est fortement recommandée afin de protéger les aciers de renforcement contre les effets de l'environnement et ainsi les protéger du phénomène de corrosion. L'épaisseur de l'enrobage dépend des conditions environnementales et de la nature de l'élément structural. Les valeurs de l'enrobage recommandées selon la norme NFEN206-1 sont $e = 1.5$ à 3 cm , ce qui correspond aux conditions défavorables quant à la pénétration des agents agressifs.



Figure 3.2 : Dispositif de confection des éprouvettes utilisées.

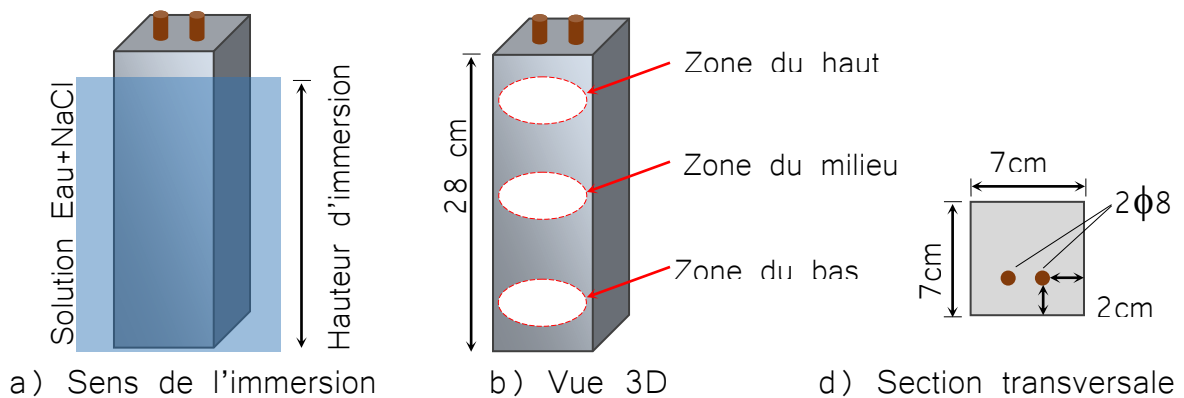


Figure 3.3 : Description de la géométrie des éprouvettes utilisées.

Afin de procéder à la caractérisation de l'éprouvette prismatique en béton armé conçue dans le cadre de cette étude, trois éprouvettes sont choisies et testées à l'âge de 90 jours. Les mesures de la masse volumique ainsi que de la résistance ultime de l'éprouvette armée, mesurée dans un essai de flexion trois points notée R_f sont résumés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Densité et résistance ultime de la poutre en béton armé après 90 jours.

Propriétés	Eprouvettes Témoins			Moyenne	Ecart type
	1	2	3		
Densité [kg/m ³] $\times 10^3$	3.18	3.21	3.24	3.21	0.024
Résistance Ultime [KN]	13.47	18.49	16.97	16.31	2.101

Les Quinze (15) éprouvettes prismatiques restantes ont été réparties en cinq (5) groupes de trois (3) éprouvettes chacun. Elles sont organisées suivant la nature des conditions d'exposition. Le détail de la répartition de ces quinze éprouvettes est donné dans le Tableau 3.3

Tableau 3.3: Détails et répartition des spécimens utilisés dans cette étude.

Groupe	Milieu	Processus Hygrothermo-Mecanique				Nombre
		Immersion	séchage	Cure Température	Chargement- déchargement	
Ambient Air	Air ambiant	Non	Non	Non	Non	3
Water Combined Aging Process	Eau du robinet	Oui	Oui	Oui	Oui	3
Water immersion	Eau du robinet	Oui	Non	Non	Non	3
Nacl Combined Aging Process	Chlorure (Nacl)	Oui	Oui	Oui	Oui	3
Nacl immersion	Chlorure (Nacl)	Oui	Non	Non	Non	3

2.3. DESCRIPTION DU PROCESSUS COMBINE HYGROTHERMO-MECANIQUE & CHLORURES

Les différentes étapes du processus combiné Hygrothermo-mécanique & Chlorures sont présentées sur la Figure 3.4. Ce processus consiste à :

1. Dans un premier temps, à l'immersion de l'éprouvette dans un milieu agressif à base de chlorures (eau salée) pendant 24 heures.
2. Après cela, séchage à l'air ambiant pendant 24 heures.
3. Par la suite, l'éprouvette est soumise à une cure thermique (cycle thermique).
4. Enfin, Le processus mécanique consiste en un essai statique de chargement-déchargement en flexion trois points.

2.3.1. DESCRIPTION DU MILIEU AGRESSIF A BASE DE CHLORURES

Le milieu agressif considéré dans cette étude est à base de chlorures. Le choix s'est porté sur ce milieu dans une optique d'analyser l'effet de l'environnement marin sur les ouvrages d'art en considérant que notre pays en l'occurrence l'Algérie présente 1200 km de côté qui baigne dans la méditerranée. C'est pourquoi, nous avons essayé de reconstituer les eaux de la méditerranée en adoptant un dosage de chlorures (NaCl – sel de table) de l'ordre de 40 gr/litre.

Tableau 3.4: Exemples de la salinité des eaux de mer

Lieu	Salinité en gr/litre
Mer Méditerranée	38.4-41.2
Océan Atlantique	33.5-37.4
Mer morte	192.2-260

2.3.2. DESCRIPTION DU CYCLE THERMIQUE

Le détail du cycle thermique est présenté sur la Figure 3.5. Comme précédemment indiqué dans le chapitre 2, nous avons adopté ce cycle de température dans le but de reproduire le contexte du climat Algérien caractérisé par un hiver froid et humide où la température est basse et un été sec et chaud où les températures sont élevées.

2.3.2. DESCRIPTION DU CYCLE MECANIQUE

Le cycle mécanique consistant en un chargement et déchargement statique est réalisé sur une machine d'essai universelle Ibertest ayant une capacité maximale de 200 kN. Comme illustré sur la Figure 3.6, Les éprouvettes sont sollicitées en flexion trois points avec un chargement qui ne dépasse pas les 10 kN. Autrement dit, du fait que la machine est pilotée par ordinateur, après le démarrage de l'essai, nous pouvons suivre sur l'écran de l'ordinateur l'évolution du chargement durant l'essai. Lorsque la charge appliquée atteint la limite de 10kN, nous procédons à l'arrêt de l'essai. La vitesse de chargement retenue est de l'ordre de.....

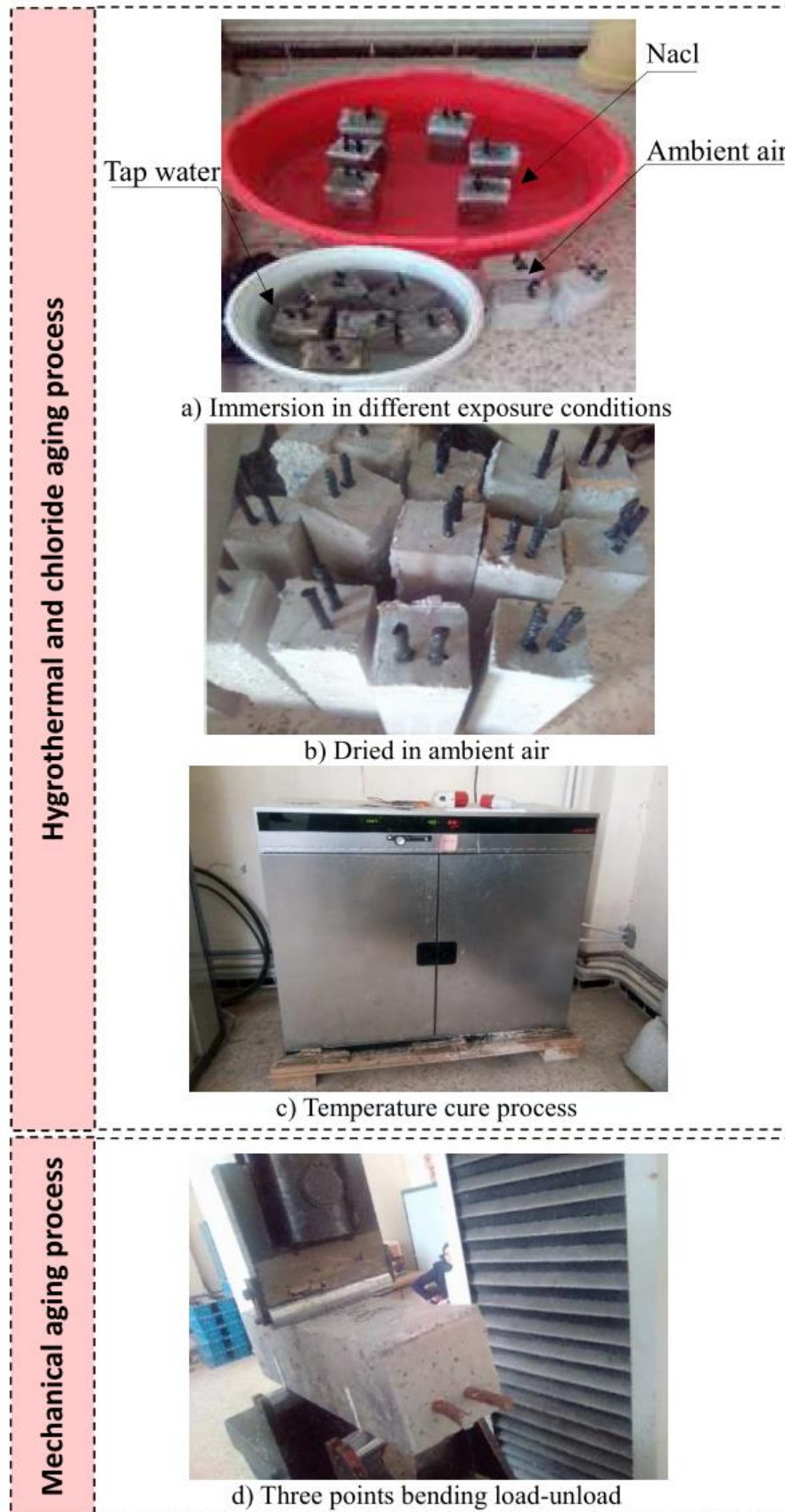


Figure 3.4 : Description du cycle combiné hygrothermo-mécanique & chlorures.

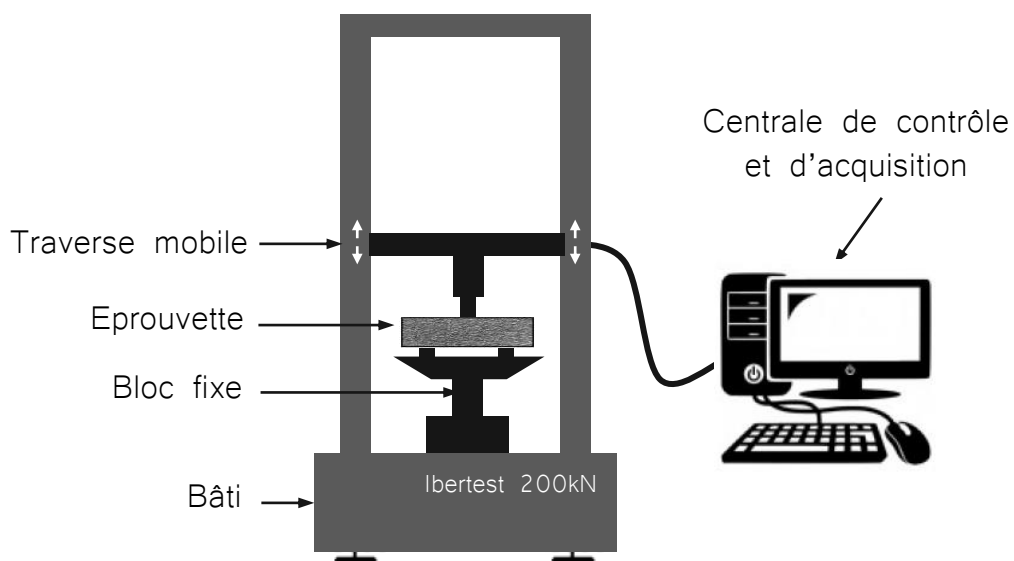
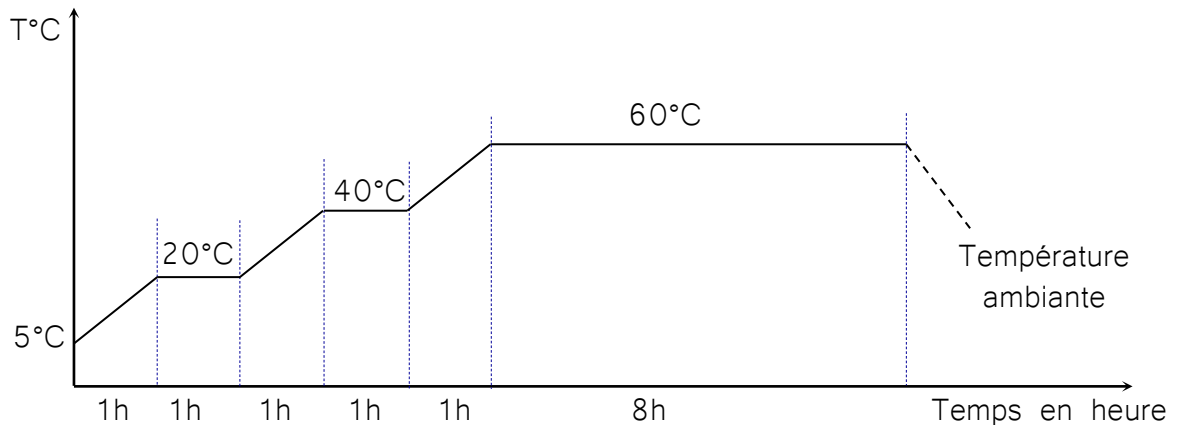


Figure 3.6 : Schéma du dispositif de Chargement-Déchargement en flexion trois points.

3. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE DE MESURE DU POTENTIEL DE CORROSION

Pour suivre le comportement d'un élément d'une structure en béton armé en service, sur une longue période, il était impératif que ces essais soient non destructifs. La détection de la sévérité de la corrosion dans les barres d'acier noyées dans le béton peut se faire en mesurant le potentiel de corrosion car il est qualitativement lié à la vitesse de corrosion de l'armature.

La cartographie de la corrosion par demi-piles est une méthode efficace pour évaluer la sévérité de l'activité de corrosion dans les structures en béton. Cette méthode fournit des informations précieuses sur la probabilité de corrosion.

Selon la norme ASTM C-876-91 (ré-approuvée en 1999), la probabilité de corrosion active est déterminée en fonction de la valeur mesurée du potentiel de corrosion à demi-cellule (Tableau 3.5). Pour une valeur mesurée supérieur à -200 mV, la probabilité de corrosion active est inférieure à 10%. Pour les valeurs mesurées comprises entre -200 mV et -350 mV, l'interprétation des résultats du test est incertaine. Pour une valeur mesurée inférieure à -350 mV, la probabilité de corrosion active est supérieure à 90 %.

Tableau 3.5: Valeurs du potentiel de corrosion citées dans la norme ASTM C-876-91

Potentiel Mesuré	Probabilité de présence de l'activité de corrosion
Potentiel > -200 mV	Probabilité de corrosion $< \text{à } 10\%$
-350 mV $<$ Potentiel < -200 mV	probabilité de corrosion de 50%
Potentiel < -350 mV	Probabilité de corrosion comprise entre 50% et 90%

Dans le cadre de cette étude, Afin de détecter toute activité de corrosion, nous avons utilisé l'appareil CANIN+ (Corrosion Analyzing Instrument) comme instrument de mesure du potentiel électrique [26].

Le principe de l'appareil CANIN+ est basé sur la mesure du potentiel électrique détecté à la surface du béton et généré par le processus électrochimique de corrosion des armatures. Comme le montre la Figure 3.7, pour détecter les valeurs de potentiel, l'électrode de référence Cu-CuSO₄, composée d'une tige de cuivre immergée dans une solution de sulfate de cuivre saturée, est connectée à la barre d'acier via un voltmètre à haute impédance.

Comme le montre la Figure 3.8, pour chaque éprouvette, nous avons défini trois points de mesure suivant sa longueur. Le premier point se trouve dans la zone du haut, le deuxième point se trouve dans la zone du milieu et enfin le troisième point se trouve dans la zone du bas (conformément à la Figure 3.3).

Dans le but de réduire l'influence de l'erreur et assurer ainsi la reproductibilité des mesures, nous effectuons pour chacun des points de mesure décrits ci-dessus trois lectures.

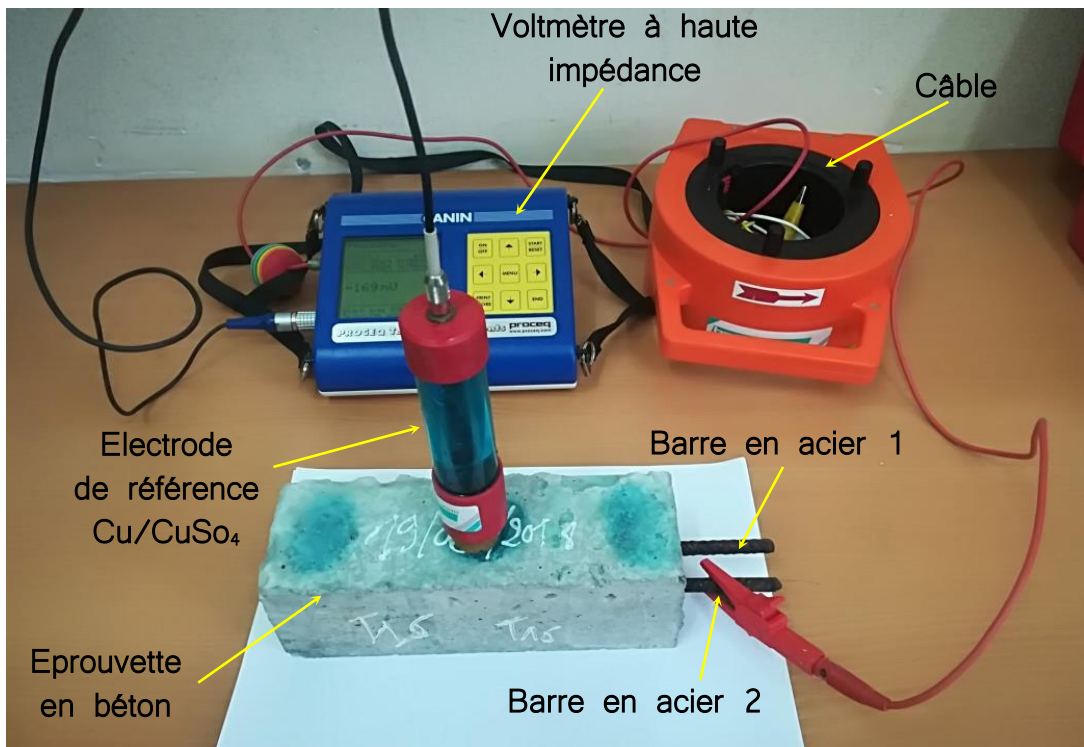


Figure 3.7 : Principe et composants de la mesure du Potentiel de corrosion par demi-pile : Appareil Canin+ proceq.

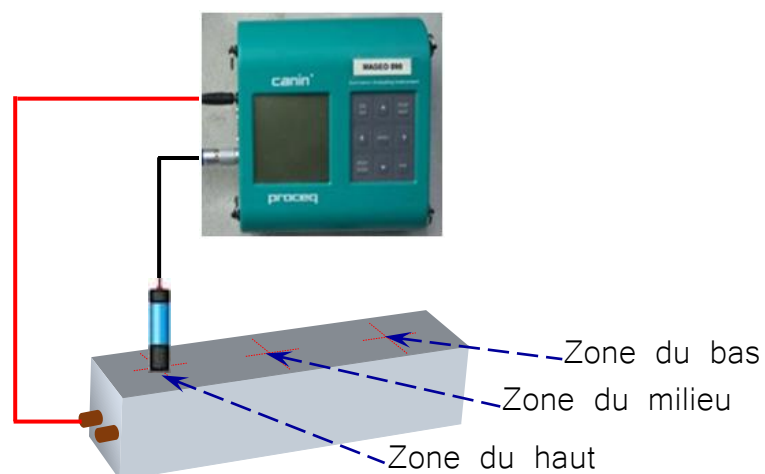


Figure 3.8 : Description des trois points de mesures du potentiel de corrosion.

4. DESCRIPTION DU TEST DE CARBONATATION

La carbonatation du béton est l'une des principales raisons de la corrosion des armatures. En effet, le béton lui-même très alcalin (valeur élevée du pH), Cette alcalinité élevée réagit avec l'acier d'armature nu et crée autour de lui un film d'oxyde appelé couche de passivation. Cette couche protège la barre d'acier de la corrosion.

La carbonatation est un processus au cours duquel le dioxyde de carbone de l'atmosphère se diffuse à travers le béton et peut réduire le pH à un niveau à partir duquel le film de passivation/oxyde n'est plus stable.

Ce processus de carbonatation comprend les deux étapes suivantes :

- Tout d'abord, le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) réagit avec l'eau dans les pores du béton pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3).
- Ensuite, l'acide carbonique réagit avec l'hydroxyde de calcium [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] pour former du carbonate de calcium (CaCO_3). Ce processus entraîne une réduction de la valeur du pH du milieu de 12,5 à 13,5 à environ 8 à 9, ce qui provoque la dépassivation de la couche protectrice des barres d'armature et initie ainsi leur corrosion.

Afin de déterminer l'étendue de l'infiltration de dioxyde de carbone dans l'échantillon de béton, nous utilisons un indicateur de pH. La phénolphthaléine est l'indicateur de pH le plus couramment utilisé.

Le test est réalisé en pulvérisant simplement la solution de phénolphthaléine sur une surface de béton fraîchement fracturée. Cette solution est préparée en dissolvant 1g de poudre de phénolphthaléine dans une solution de 100 ml composée de 70ml d'éthanol et de 30ml d'eau désionisée.

Un changement de couleur vers le rose ou le violet indique que le béton n'est pas carbonaté.

S'il n'y a pas de changement de couleur, le béton peut être considéré comme carbonaté.

5. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.

Le Microscope Electronique à Balayage, communément désigné par le MEB est une technique analytique puissante qui permet d'effectuer des analyses sur une large gamme de matériaux.

Le microscope électronique à balayage présente de nombreux avantages par rapport aux microscopes traditionnels. En effet, Le MEB a une grande profondeur de champ, ce qui permet de mettre au point une plus grande partie de l'échantillon en même temps.

Le MEB a également une résolution beaucoup plus élevée, de sorte que des spécimens très rapprochés peuvent être agrandis à des niveaux beaucoup plus élevés. Comme le MEB utilise des électro-aimants plutôt que des lentilles, le chercheur a beaucoup plus de contrôle sur le degré d'agrandissement. Tous ces avantages, ainsi que les images de haute résolution avec une clarté saisissante, font du microscope électronique à balayage l'un des instruments les plus utiles de la recherche actuelle.

L'analyse au MEB est considérée comme "non destructive", c'est-à-dire que les rayons X générés par les interactions électroniques n'entraînent pas de perte de volume de l'échantillon, de sorte qu'il est possible d'analyser les mêmes matériaux à plusieurs reprises.

Comme illustrer sur la Figure 3.9, cette technique d'analyse est basée sur la détection d'électrons à haute énergie émis par la surface d'un échantillon après avoir été exposé à un faisceau d'électrons très focalisé provenant d'un canon à électrons. Ce faisceau d'électrons est focalisé sur un petit point de la surface de l'échantillon à l'aide de l'objectif du MEB. Ceci permet de générer une variété de signaux à la surface de cet échantillon solide. Les signaux issus des interactions entre les électrons et l'échantillon révèlent des informations sur ce dernier, notamment sa morphologie externe (texture), sa composition chimique, ainsi que la structure cristalline et l'orientation des matériaux qui le composent.

Dans la plupart des applications, les données sont collectées sur une zone sélectionnée de la surface de l'échantillon, et une image bidimensionnelle est générée qui affiche les variations spatiales de ces propriétés.

Des zones d'une largeur d'environ 1cm à 5microns peuvent être imagées en mode balayage à l'aide de techniques SEM conventionnelles (grossissement allant de 20X à environ 30000X, résolution spatiale de 50 à 100nm).

Le MEB est également capable d'effectuer des analyses de points sélectionnés sur l'échantillon ; cette approche est particulièrement utile pour déterminer qualitativement ou semi-quantitativement les compositions chimiques (à l'aide de l'EDS), la structure cristalline et les orientations cristallines (à l'aide de l'EBSD).

Il existe deux modes de détection des électrons qui permettent différents types d'imagerie et d'analyse, chacun apportant des informations essentielles :

- ❑ Les électrons rétrodiffusés peuvent être détectés pour créer un contraste basé sur les différentes compositions chimiques d'une image.
- ❑ Les électrons secondaires, émis près de la surface de l'échantillon, donnent des informations sur la topographie de la surface.

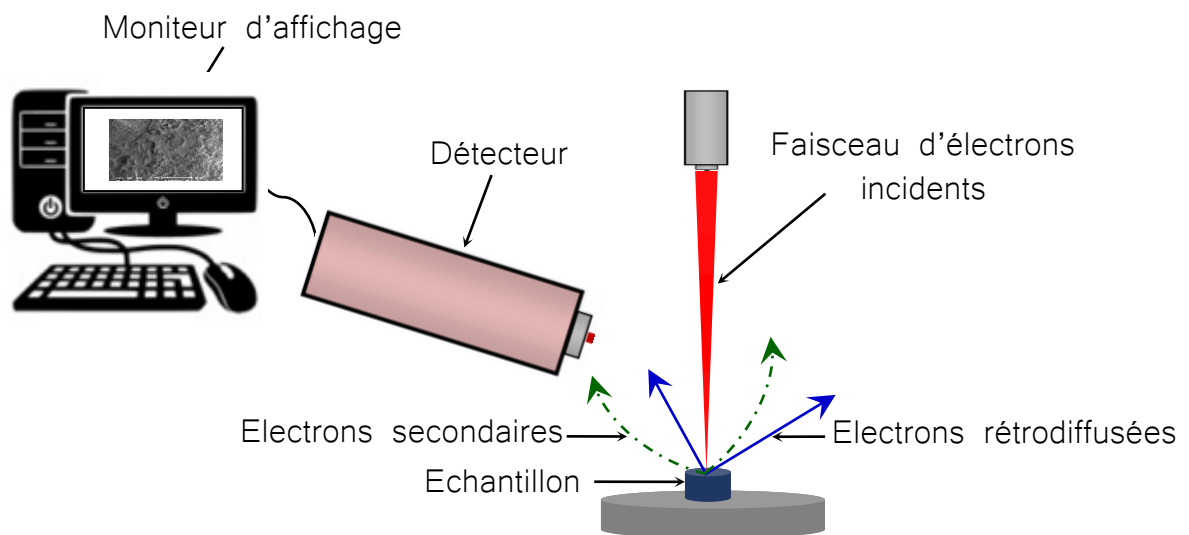


Figure 3.9 : Principe et composants de l'analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

6. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE PAR LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS)

L'analyse par Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) est une technique analytique très faiblement destructive, utilisée pour déterminer la composition chimique des éléments de la structure. L'analyse LIBS est une technologie d'analyse chimique rapide qui utilise une courte impulsion laser pour créer un micro-plasma sur la surface de l'échantillon. La Figure 3.10 présente le principe et les principaux composants du dispositif d'analyse par LIBS.

Comme illustrer sur cette Figure 3.10, la lumière émise par le plasma est recueillie et couplée à un module de détection ICCD/spectrographe pour l'analyse spectrale LIBS. Les lignes spectrales atomiques obtenues peuvent être utilisées pour déterminer la composition de l'élément chimique dans l'échantillon. En fait, chaque élément chimique est associé à des pics spectraux LIBS uniques.

La composition chimique peut donc être déterminée en identifiant les différents pics obtenus pour les échantillons testés. En outre, nous pouvons utiliser les informations sur les intensités des pics LIBS pour quantifier la concentration des différents éléments dans l'échantillon testé.

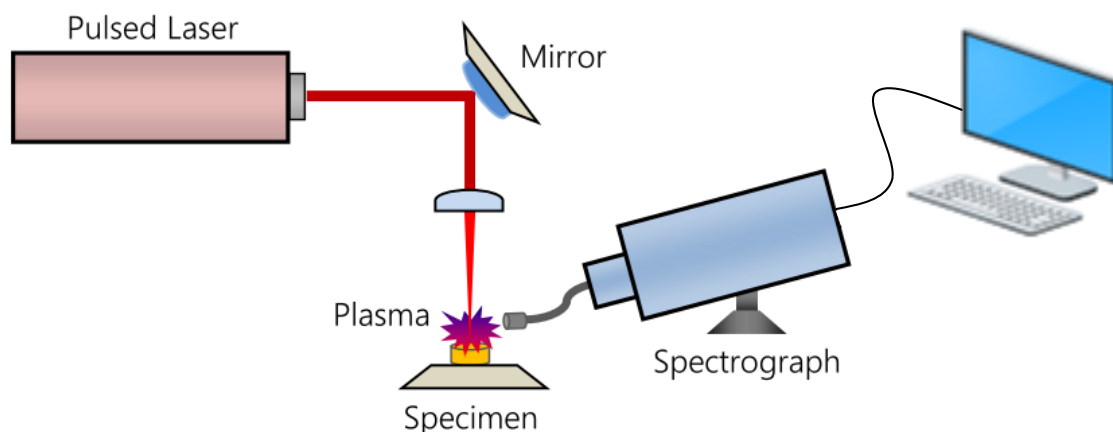


Figure 3.10: Principe et principaux composants du dispositif du Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS).

7. RESULTATS ET DISCUSSION

7.1. EVOLUTION DU POTENTIEL DE CORROSION EN FONCTION DES CONDITIONS D'EXPOSITION

Nous présentons sur les figures 3.11, 3.12 et 3.13 l'évolution dans le temps du potentiel de corrosion des différentes éprouvettes testées.

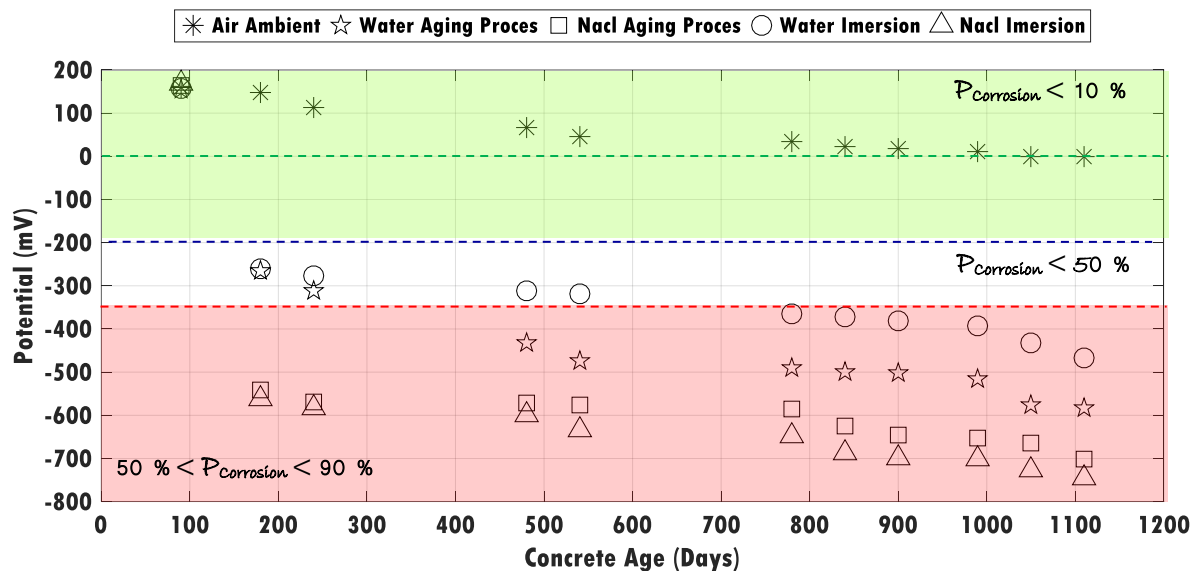


Figure 3.11: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du bas en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition

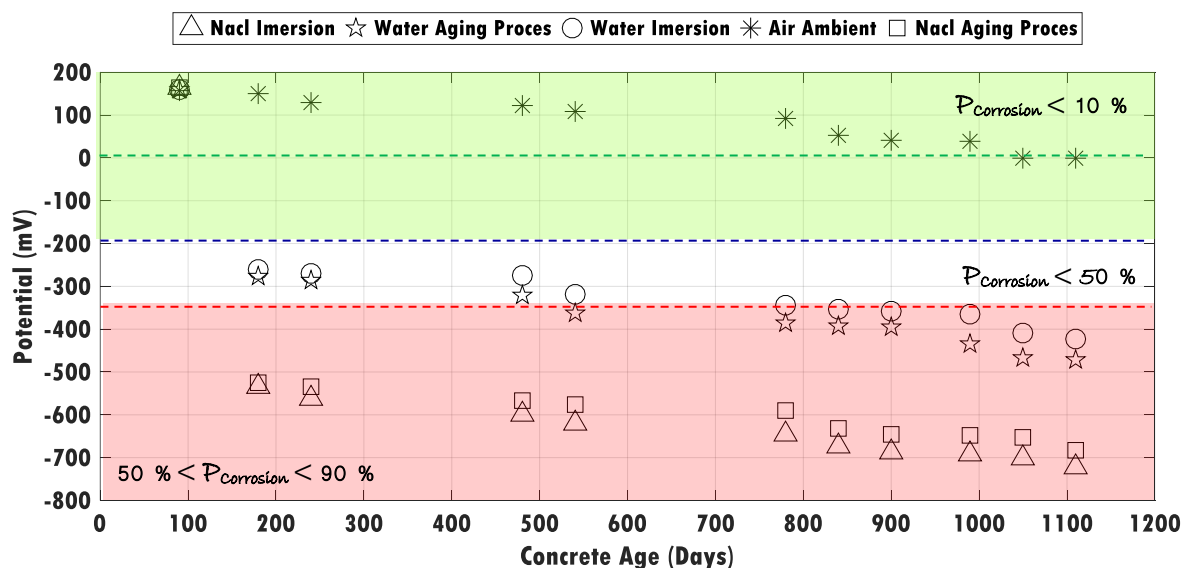


Figure 3.12: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du milieu en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition

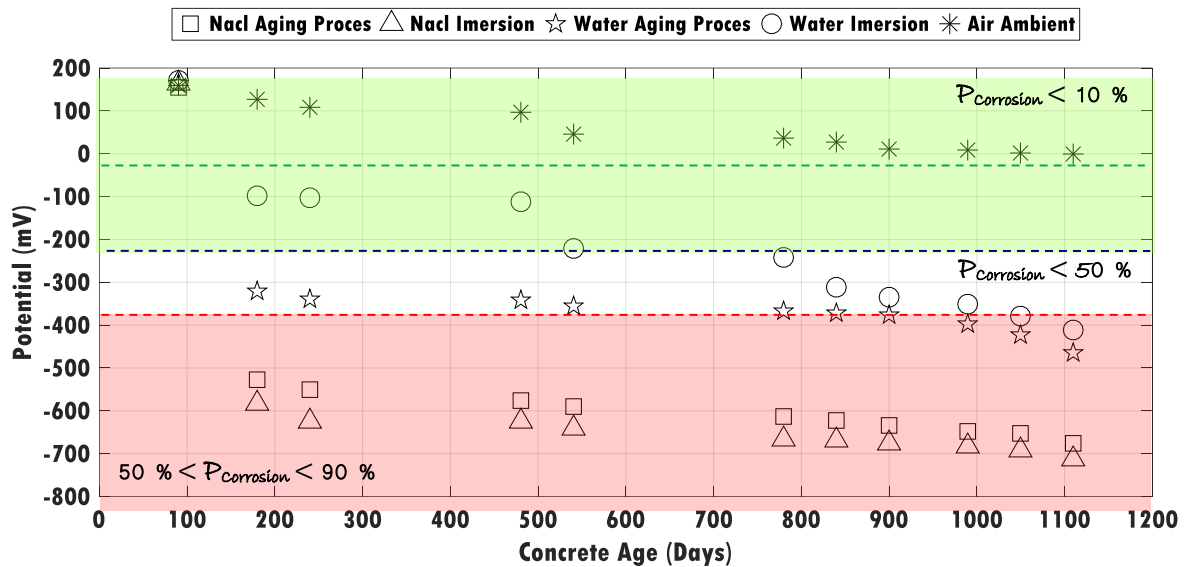


Figure 3.13: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré dans la zone du haut en fonction de l'âge du béton pour différentes conditions d'exposition.

A travers les résultats obtenus nous constatons que pour toutes les éprouvettes étudiées, après n cycles de vieillissement accéléré, les courbes représentant l'évolution du potentiel de corrosion présente la même allure à savoir une diminution du potentiel de corrosion au fur et à mesure que l'on avance dans le temps. Il y a lieu d'indiquer aussi qu'au début du processus de vieillissement, cette diminution est légère. Cependant, à la fin du processus cette diminution est plus importante.

L'effet le plus important est obtenu dans le cas de l'immersion des éprouvettes dans une solution chlorures. L'effet le moins important est obtenu dans le cas des éprouvettes exposées à l'air ambiant.

L'effet obtenu dans le cas des éprouvettes soumises à un cycle combiné hygrothermo-mécanique et chlorures est légèrement moins important comparé à celui de l'immersion dans une solution chlorure.

L'effet obtenu dans le cas des éprouvettes soumises à un cycle combiné hygrothermo-mécanique et chlorures est plus visible comparé à l'effet obtenu sur des éprouvettes soumise à un cycle de vieillissement dans l'eau.

Il y a lieu d'indiquer que les courbes montrent que l'effet obtenu dans le cas des éprouvettes soumises à un cycle d'immersion dans de l'eau du robinet est moins important que lorsque l'éprouvette subis des cycles d'immersion et séchage toujours dans de l'eau du robinet combiné à un chargement-déchargement mécanique.

7.2. EVOLUTION DU POTENTIEL DE CORROSION EN FONCTION DU POINT DE MESURE

Dans le but d'analyser l'effet de la position du point de mesure sur la valeur du potentiel, nous présentons sur les figures 3.14 à 3.18 l'évolution dans le temps (en fonction de l'âge du béton) du potentiel mesuré selon les trois zones de mesures présentées sur la figure 3.3.b à savoir la zone du bas, la zone médiane et la zone du haut et cela pour les différentes conditions d'exposition.

Ce que l'on retient à partir de ces figures est le fait que globalement les mesures réalisées selon les trois zones sont d'une manière générale proches. En effet si nous analysons avec plus détails cette comparaison selon les conditions d'exposition nous pouvons constater ce qui suit :

Comme le montre la figure 3.14 dans le cas de l'éprouvette soumise à l'air ambiant, les mesures sont très proches avec une légère différence qui apparaît pour la mesure dans la zone médiane avec des valeurs plus élevées.

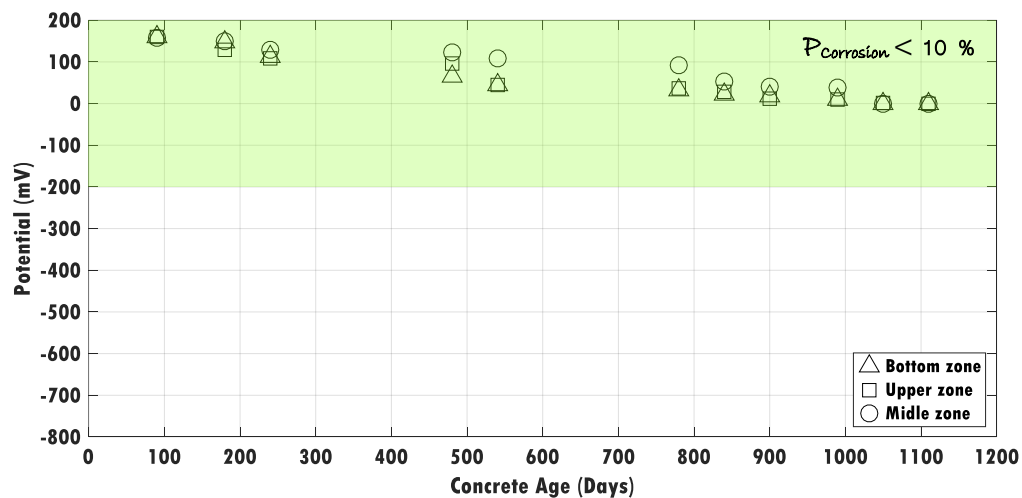


Figure 3.14: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise à l'air ambiant, selon la zone de mesure.

Comme le montre la Figure 3.15 dans le cas de l'éprouvette immergée dans l'eau, nous constatons que dans les premiers cycles du vieillissement accéléré les mesures dans la zone du bas et la zone médiane de l'éprouvette sont assez proches. Par contre, il y a une différence notable avec les mesures dans la zone du haut de l'éprouvette avec des valeurs plus faibles ce qui traduit une activité de corrosion moins importante. Au fur et à mesure de les cycles augmentent les mesures

tendent à se rapprocher avec une légère différence au niveau de la zone du bas. Ceci est dû probablement à la position dans laquelle est immergée l'éprouvette (voir figure 3.4.a)

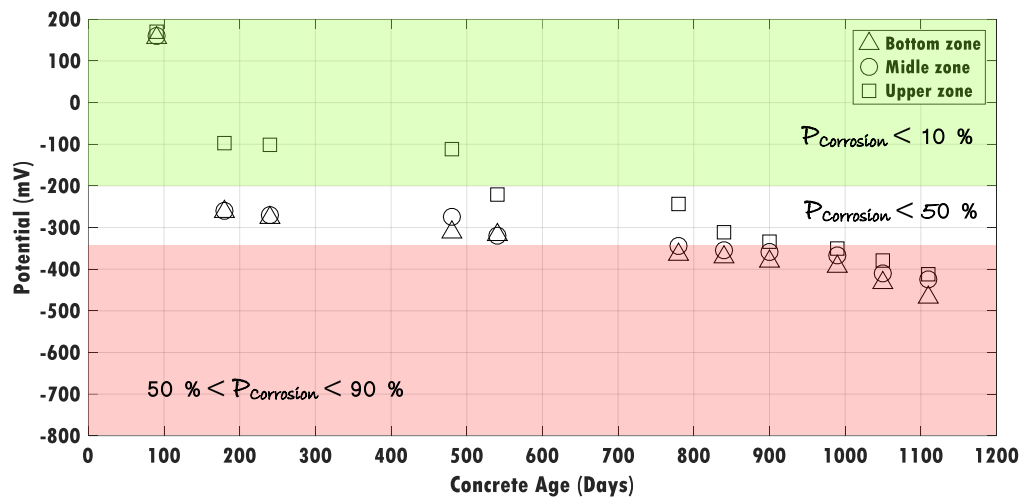


Figure 3.15: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette immergée dans l'eau, selon la zone de mesure.

Dans le cas de l'éprouvette soumise aux cycles hygrothermo-mécanique, nous constatons à travers la Figure 3.16 que les mesures dans la zone du haut et la zone médiane de l'éprouvette sont assez proches en particulier dans les premiers cycles. Par contre, au fur et à mesure de les cycles augmentent les mesures au niveau de la zone du bas sont plus faibles. Ceci est dû probablement à la position dans laquelle est immergée l'éprouvette (voir figure 3.4.a)

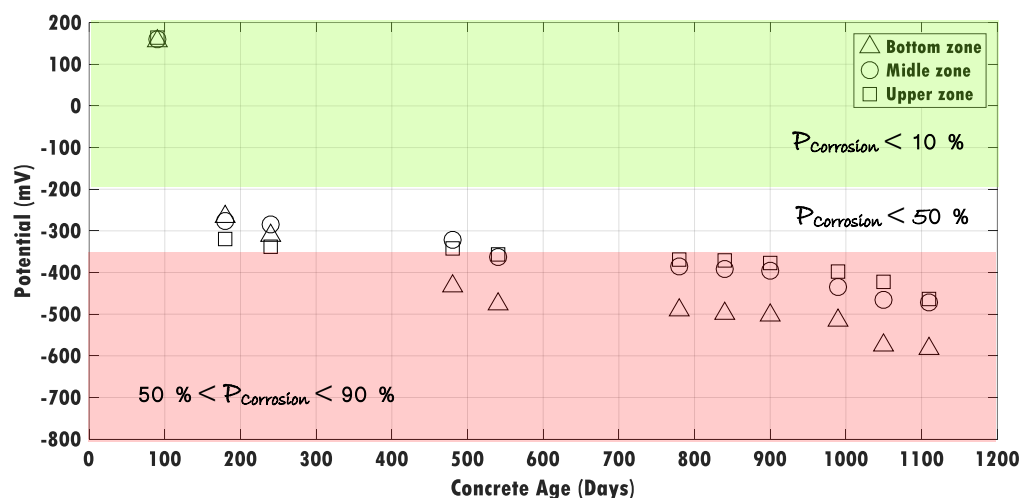


Figure 3.16: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise au cycle hygrothermo-mécanique, suivant la zone de mesure.

Comme le montre la Figure 3.17 dans le cas de l'éprouvette immergée dans de l'eau salée (chlorures), nous constatons que les mesures dans les trois zones proches. Ceci indique que l'activité de corrosion est la même tout le long de l'éprouvette.

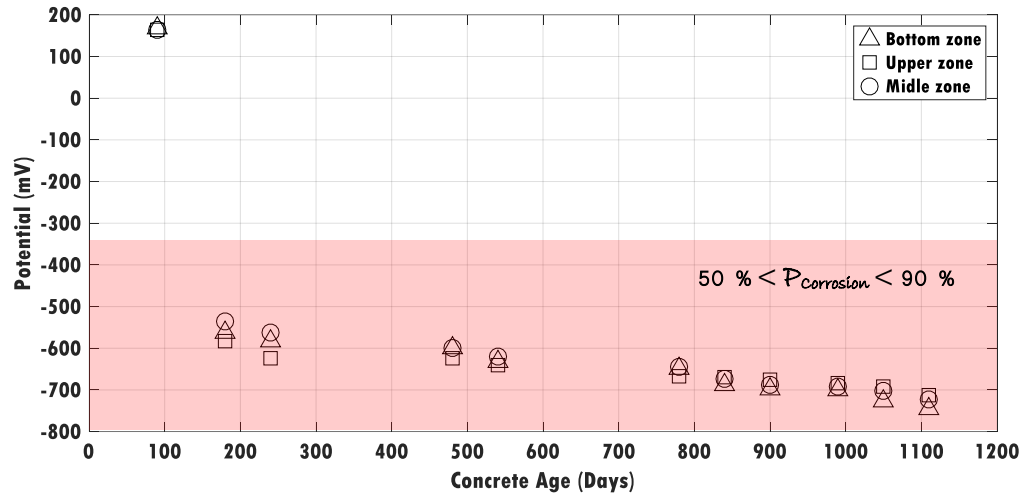


Figure 3.17: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette immergée dans l'eau salée (Chlorures), selon la zone de mesure.

Comme le montre la Figure 3.18 dans le cas de l'éprouvette soumise aux cycles combinés hygrothermo-mécanique & chlorures, nous constatons que les mesures dans les trois zones proches. Ceci indique que l'activité de corrosion est uniforme tout le long de l'éprouvette.

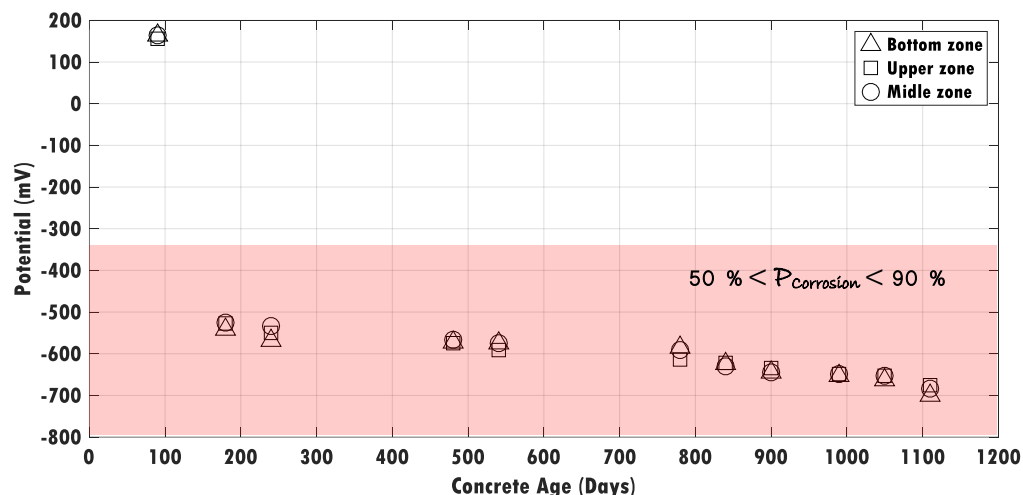


Figure 3.18: Evolution dans le temps du potentiel de corrosion mesuré sur l'éprouvette soumise au cycle hygrothermo-mécanique & chlorures, suivant la zone de mesure.

7.3. RESULTATS DE L'ESSAI DE CARBONATATION



a) Hygrothermo-mécanique & Chlorures



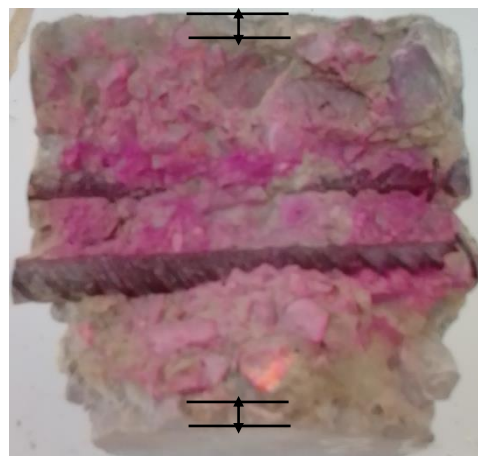
b) Hygrothermo-Mécanique



c) Immersion dans les Chlorures



d) Immersion dans l'Eau



e) Air Ambient

Figure 3.19: Image de l'essai de carbonatation à la Phénolphtaléine selon les conditions d'exposition (Après 1110 jours).

Comme le montrent les Figures 3.19-a, 3.19-b, 3.19-c et 3.19-d, l'indicateur de pH pulvérisé a changé de couleur (il est devenu violet), ce qui suggère que le pH du béton reste élevé. Cela indiquerait que le béton n'est pas carbonaté. Comme prévu, dans un béton saturé, l'humidité constitue une barrière à la pénétration du dioxyde de carbone. Par conséquent, la carbonatation sera lente.

Comme le montre la Figure 3.19-e, l'indicateur de pH pulvérisé n'a pas changé de couleur près des surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon (au niveau des bords), ce qui suggère que ces régions proches de la surface sont carbonatées.

Au centre de l'échantillon, où l'indicateur a changé de couleur (il est devenu violet), le pH du béton reste élevé. Cela indique que le béton n'est pas carbonaté.

7.4. ANALYSE VISUELLE DES ÉPROUVETTES

Nous présentons sur la figure... les coupes transversales des éprouvettes utilisées dans cette étude et cela pour les différentes conditions d'exposition. Il y a lieu de préciser que ces coupes ont été obtenues sur le béton à l'âge de 1110 jours.

Nous constatons comme nous pouvons le voir sur la Figure 3.20, que Lors de l'inspection visuelle de ces sections transversales, à l'exception des éprouvettes conservées à l'air ambiant, des signes de corrosion des barres d'acier ont été observés pour toutes les autres éprouvettes.

En effet, comme on peut le voir sur les images présentées dans la Figure 3.20, à l'exception de l'échantillon exposé à l'air ambiant (Figure 3.20-e), de la rouille a été observée sur tous les autres échantillons ; échantillon immergé dans de l'eau à base de chlorures (Figure 3.20-a), échantillon exposé à un vieillissement combiné au chlorures (F3.20-b), échantillon exposé à un vieillissement combiné à l'eau (Figure 3.20-c), échantillon immergé dans de l'eau (Figure 3.20-d).



a) Immersion dans les Chlorures



b) Hydrothermo-mécanique & Chlorures



c) Hydrothermo-Mécanique



d) Immersion dans l'Eau



e) Air Ambiant

Figure 3.20: Image des coupes transversales des éprouvettes selon les conditions d'exposition (Après 1110 jours)

Si nous analysons avec plus de détails les images de la figure 3.20, nous constatons que :

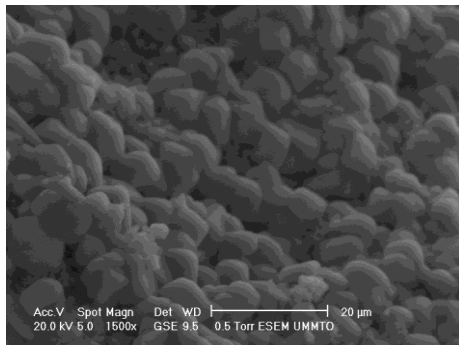
- ⊕ les barres d'acier noyées dans les éprouvettes de béton exposées à un vieillissement combiné aux chlorures sont plus corrodées que dans les autres conditions d'exposition.
- ⊕ Les barres d'acier noyées dans les éprouvettes de béton immergées dans l'eau sont plus corrodées que les barres d'acier des éprouvettes de béton exposées à un vieillissement combiné à l'eau.

Il est important de mentionner que les observations visuelles concordent bien avec les résultats obtenus en mesurant le potentiel de corrosion à l'aide de mesures du potentiel de demi-cellule. En fait, comme indiqué précédemment dans le paragraphe :

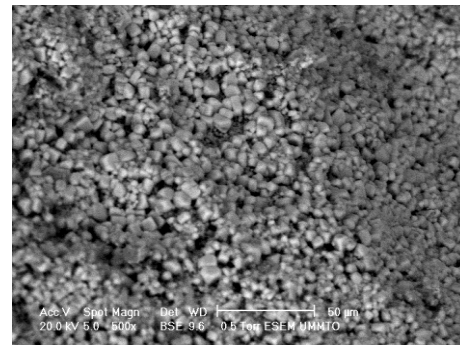
- ⊕ la mesure du potentiel de demi-cellule après 1110 jours est plus négative que -350 mV.
- ⊕ Comme indiqué ci-dessus, après 1110 jours, aucun signe de corrosion n'est observé dans le cas des barres d'acier encastrées dans des échantillons de béton exposés à l'air ambiant. Ces observations visuelles concordent bien avec la valeur mesurée du potentiel de demi-cellule, plus positive que -200 mV.

7.5. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR MEB

Nous présentons sur les Figures 3.21 à 3.25 une première analyse des éprouvettes en utilisant le Microscope Electronique à balayage (MEB).

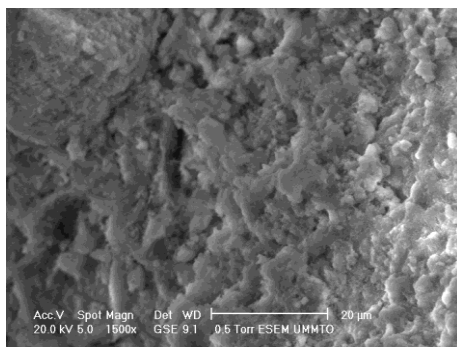


a) Image GSE- 20 micron

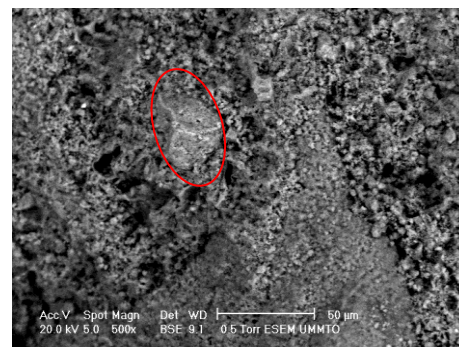


b) Image BSE- 20 micron

Figure 3.21: Image MEB d'une éprouvette témoin.

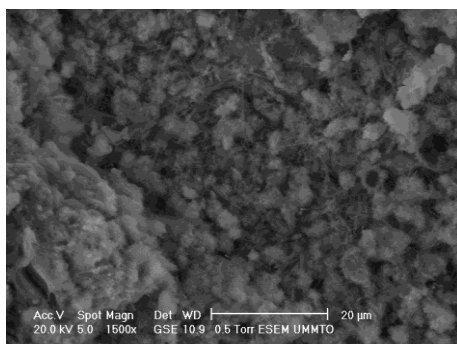


a) Image GSE- 20 micron

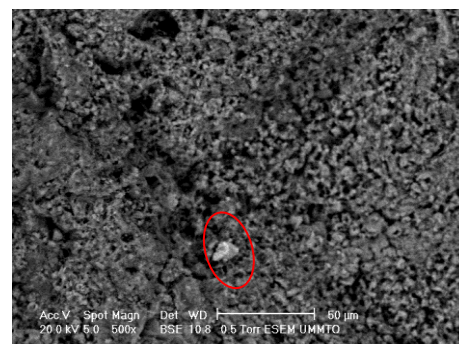


b) Image BSE- 20 micron

Figure 3.22: Image MEB de l'éprouvette immergé dans l'eau.

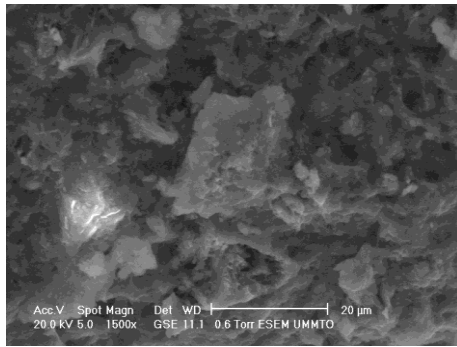


a) Image GSE- 20 micron

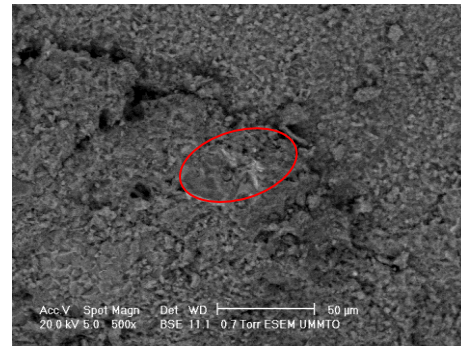


b) Image BSE- 20 micron

Figure 3.23 : Image MEB de l'éprouvette soumise à l'effet hygrothermo-mécanique.

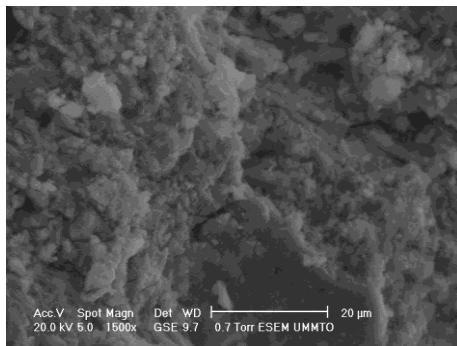


a) Image GSE- 20 micron

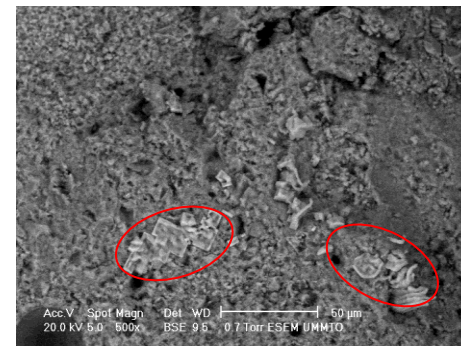


b) Image BSE- 20 micron

Figure 3.24: Image MEB d'un échantillon de l'éprouvette immergé dans les chlorures.



a) Image GSE- 20 micron



b) Image BSE- 20 micron

Figure 3.25: Image MEB d'un échantillon de l'éprouvette soumise à l'effet Hydrothermo-mécanique & Chlorures.

A travers les images obtenues lors de cette première analyse par Microscope Electronique à balayage, nous pouvons constater globalement que la structure est différente d'une éprouvette à une autre.

En effet nous constatons que d'une éprouvette à une autre il y a apparition de différentes phases.

Il y a lieu d'indiquer que nous n'avons pas pu exploiter ces résultats pour manque de détails. Cela nous a conduits à réaliser des essais supplémentaires à l'aide du MEB-EDX qui seront présentés par la suite.

7.6. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR DRX

7.6.1. EPROUVETTE IMMERGEE DANS LES CHLORURES

Nous présentons sur la Figures 3.26 les résultats obtenus par DRX sur un échantillon noté 1, prélevé sur une l'éprouvette immergée dans la solution de chlorures.

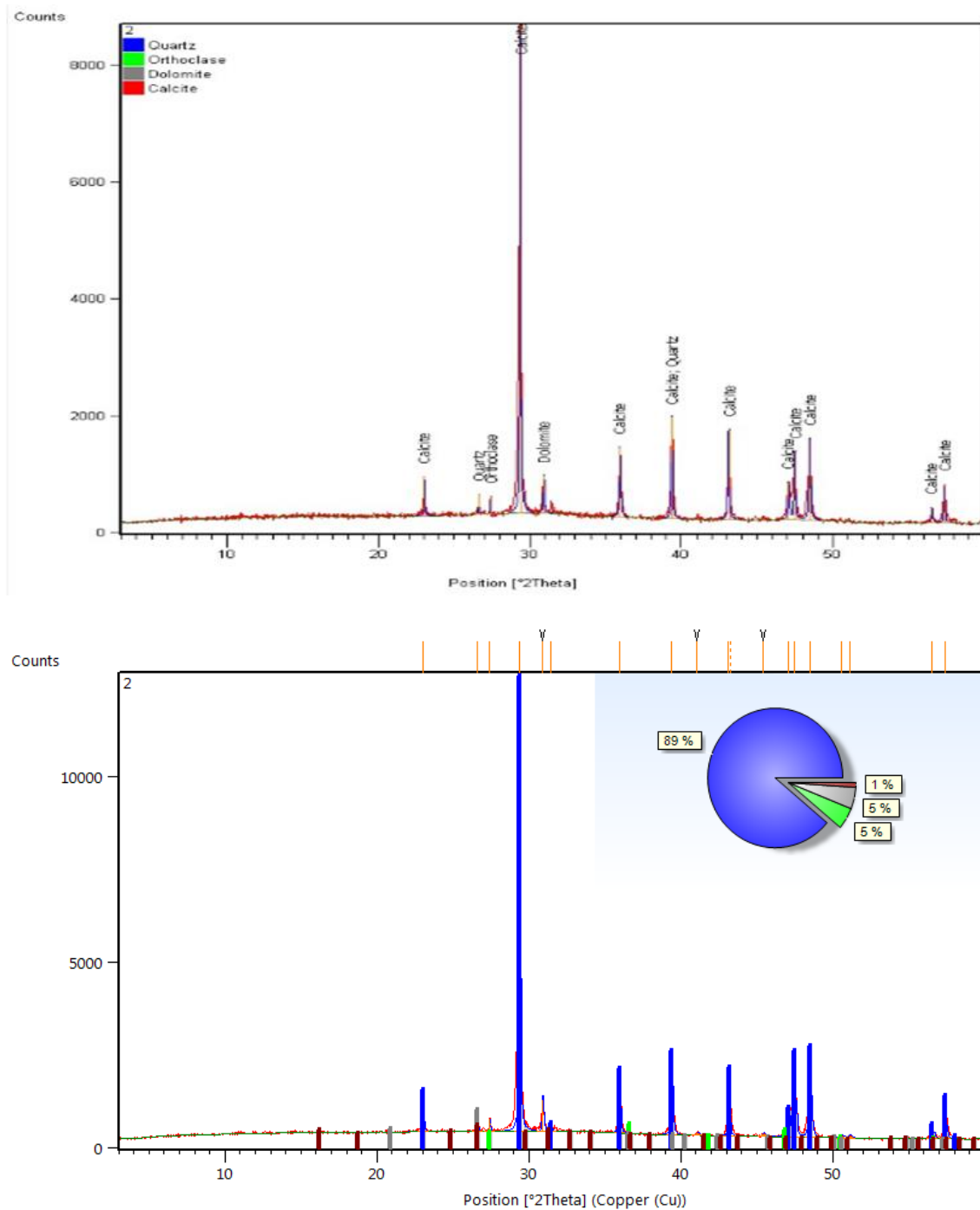


Figure 3.26: Résultat de l'analyse par DRX – Eprouvette immergée dans la solution de chlorures.

L'analyse de la Figure 3.26, montre que notre échantillon testé est formée principalement de calcite (89% CaCO_3), de quartz (5% SiO_2) et de dolomie (5% $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et de l'orthoclase (1% $\text{K al Si}_3\text{O}_8$). Ainsi nous pouvons conclure que :

- La présence de calcite et l'absence totale de portlandite montrent que les liants sont entièrement carbonatés. D'après Mertens et al. [2.3], le quartz n'est pas un liant et il constitue une partie de la fraction de sable fin de l'agrégat.
- La formation de ces carbonates est liée aux conditions bio-physico-chimique des éléments en béton. Bien que, la calcite est le produit de la carbonatation de la chaux, cette dernière, une fois mélangée à l'eau et gâchée avec du sable, possède la propriété de faire prise rapidement en agglomérant des particules inertes, tel que le quartz [1.3].
- En effet, la forte présence de la calcite a stabilisé l'argile par la cimentation de quartz, et la matrice de ciment a renforcé les liens entre les grains.

7.6.2. EPROUVETTE SOUMISE AU CYCLE HYGRO-THERMOMECHANIQUE & CHLORURES

Nous présentons sur la Figure 3.27 les résultats obtenus par DRX sur un échantillon noté 2, prélevé sur l'éprouvette soumise à la combinaison d'un cycle hygrothermo-mécanique avec un cycle immersion/séchage dans une solution à base de chlorures.

L'analyse de la Figure 3.27 montre que notre échantillon testé est formée principalement de calcite (83% CaCO_3), de quartz (2% SiO_2) et de dolomie (7% $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et de portlandite (4%) Et de pyroaurite (4% $\text{MgFeOHCOH}_2\text{O}$). Ainsi nous pouvons conclure que :

- La présence de calcite montre que les liants sont entièrement carbonatés. D'après Mertens et al. [2.3],
- La présence de calcite (83%) et de dolomite avec (7%) sont liées aux réactions alcali-granulats entre la pâte de ciment et la silice des granulats.

- La formation de ces carbonates est liée aux conditions bio-physico-chimique des éléments en béton. Bien que, la calcite est le produit de la carbonatation de la chaux, cette dernière, une fois mélangée à l'eau et gâchée avec du sable, possède la propriété de faire prise rapidement en agglomérant des particules inertes, tel que le quartz [1.3].

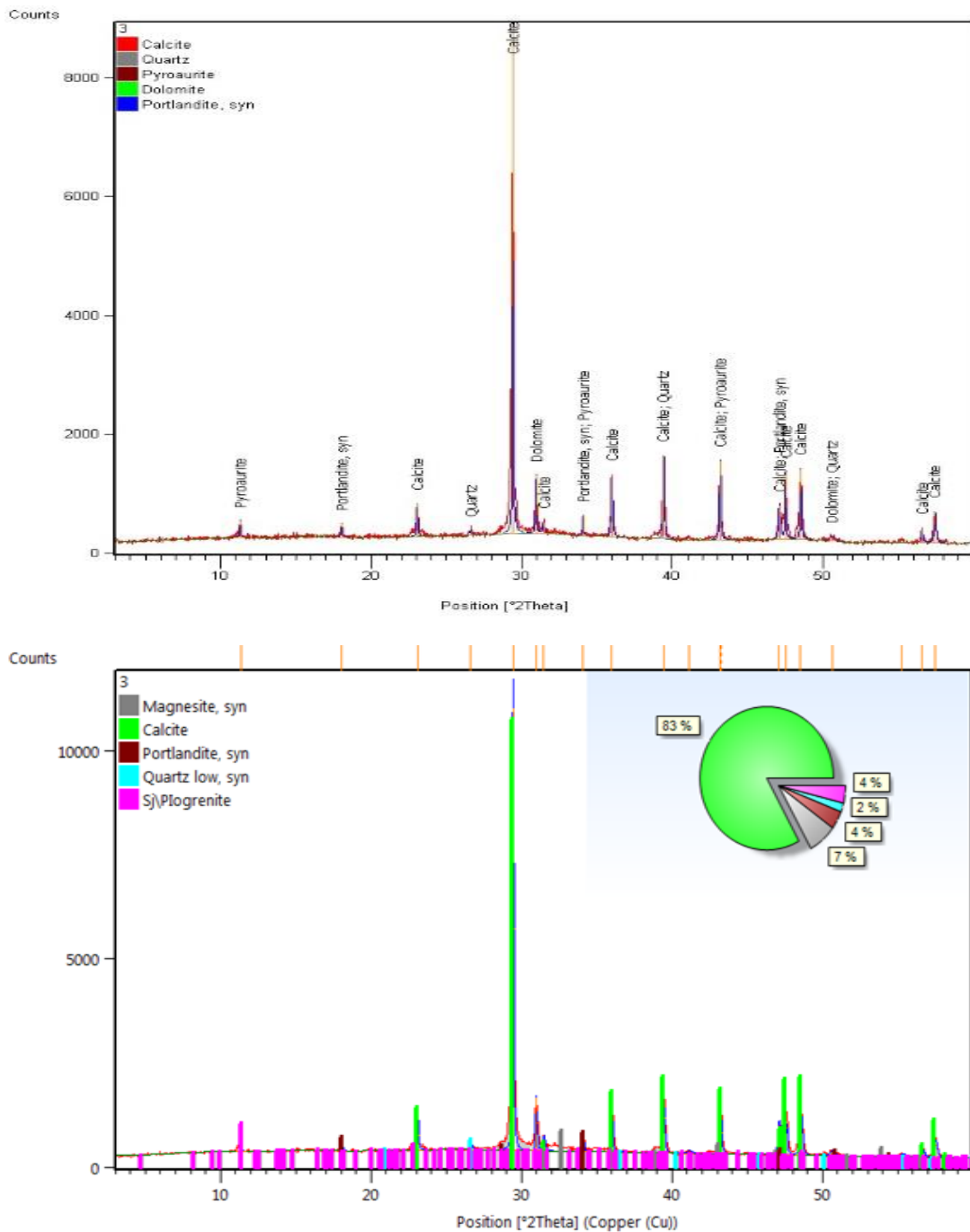


Figure 3.27: Résultat de l'analyse par DRX – l'éprouvette soumise à la combinaison d'un cycle hydrothermo-mécanique & chlorures.

7.6.3. EPROUVETTE TEMOIN

Nous présentons sur la Figure 3.28 les résultats obtenus par DRX sur un échantillon noté 3, prélevé sur l'éprouvette soumise à l'air ambiant considérée comme l'éprouvette de référence (témoin).

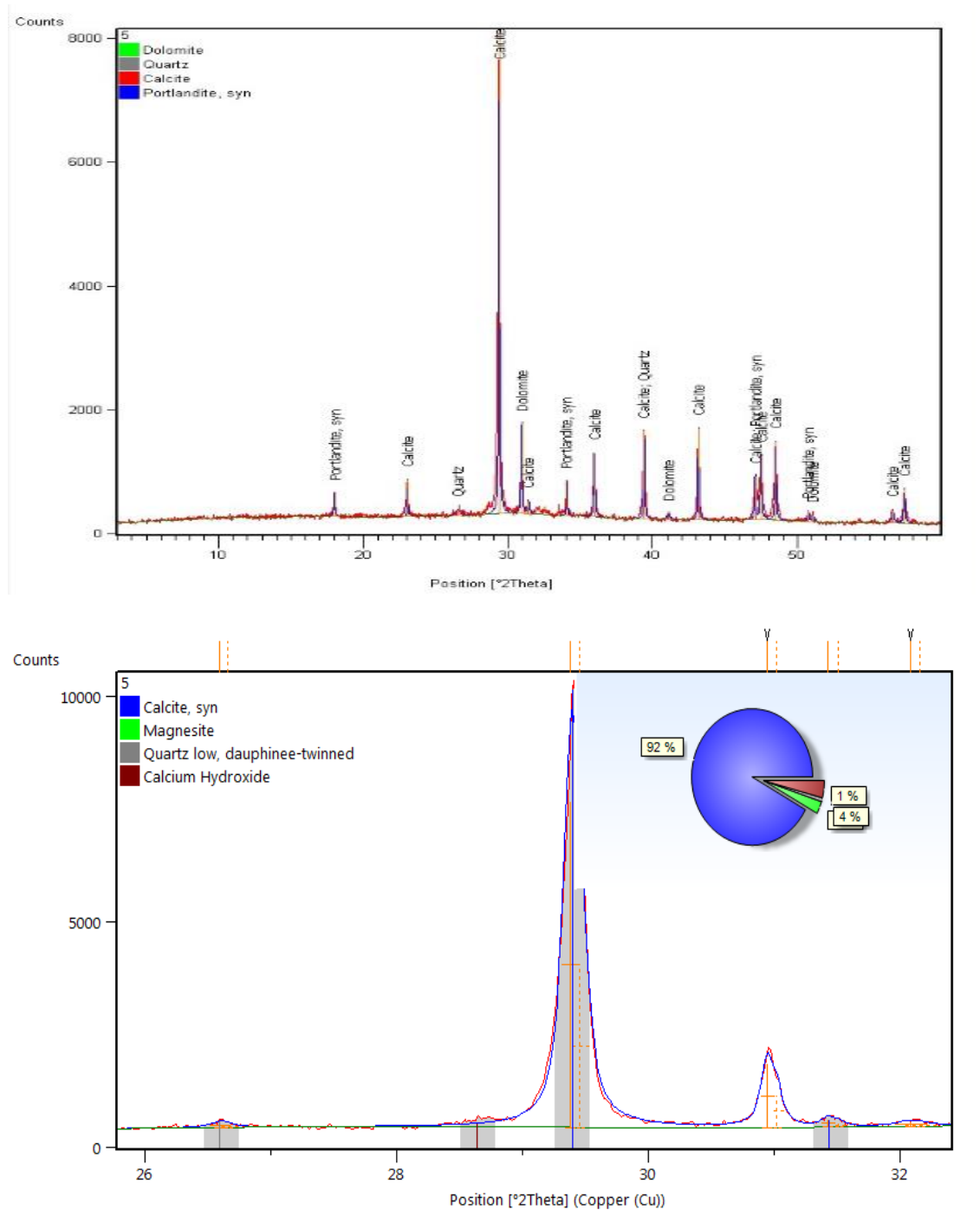


Figure 3.28: Résultat de l'analyse par DRX – Eprouvette soumise à l'air ambiant.

L'analyse de la Figure 3.28 montre que notre échantillon testé est formée principalement de calcite (92% CaCO_3), de quartz (1% SiO_2) et de dolomie (3% $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et de portlandite (4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ainsi nous pouvons conclure que :

- La présence de la calcite (92%) et montrent que les liants sont entièrement carbonatés. D'après Mertens et al. [2.3].
- La présence de quartz (1%) n'est pas un liant et il constitue une partie de la fraction de sable fin de l'agrégat.

Si nous effectuons la comparaison des résultats obtenus pour les trois échantillons, nous constatons que :

- il y a une dégradation très importante de l'éprouvette immergée dans une solution à base de chlorures (NaCl) comparée aux autres éprouvettes échantillons du a la présentions de calcite et l'absence totale de la portlandite (pauvre en calcium ca).
- La présence de la calcite et de la dolomite est due à la réaction alcali granulat.
- les alcalinités très élevées favorisent la corrosion des armatures, et une diminution de sa résistance

Tableau 3.6: Récapitulatif des résultats obtenus lors de l'essai DRX

Oxydo	Echantillons		
	1	2	3
Calcite	89%	83%	92%
Dolomite	5%	7%	3%
Quartz	5%	2%	1%
Portlandite	0%	4%	4%

7.7. RESULTATS DE L'ANALYSE PAR MEB-EDX

7.7.1. EPROUVETTE SOUMISE A L'AIR AMBIANT.

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus à l'aide du microscope à balayage électronique combiné à l'EDX sur un échantillon prélevé sur l'éprouvette soumise à l'air ambiant (témoin).

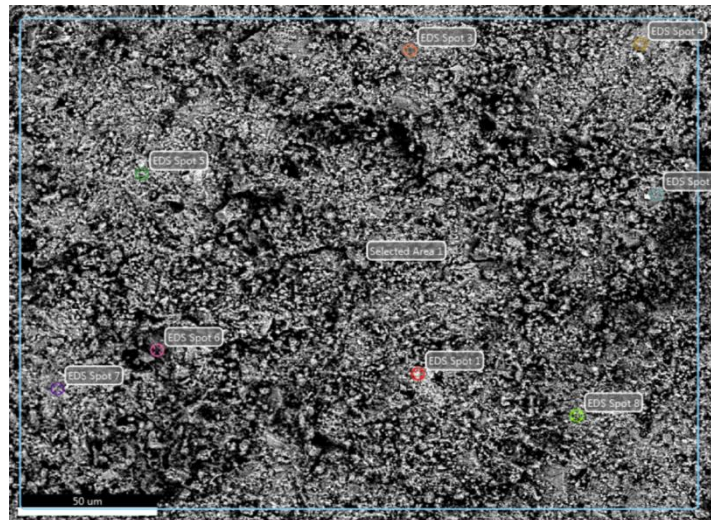


Figure 3.29 : Image MEB des points d'analyse: Echantillon soumise à l'air ambiant.

Les résultats obtenus montrent que :

- dans de nombreuses zones il y a présence à la fois du Si, du Ca, du O, du Mg mais aussi de l'aluminium Al, C, Fe, K, S.
- dans les Spots (2,3), nous constatons des niveaux plus élevés de Ca, O. Ce qui fait la présence de la calcite CaCO_3 en grandes quantités (Spot2) $\text{CaCO}_3 = 88.93 \geq 75\%$ conformément aux exigences de la norme EN 197-1 (2012) relatives aux ajouts minéraux utilisés, qui est dû à la présence de la matrice du carbonate.
- Dans le Spot (1), nous constatons des niveaux plus élevés de Si, O. ce qui fait la présence de siliceux (quartz) SiO_2 en grandes quantités.
- Dans le Spot (4), nous constatons des niveaux plus élevés de Mg, O, Ca. ce qui fait la présence de magnésium (dolomite) CaMgCO_3

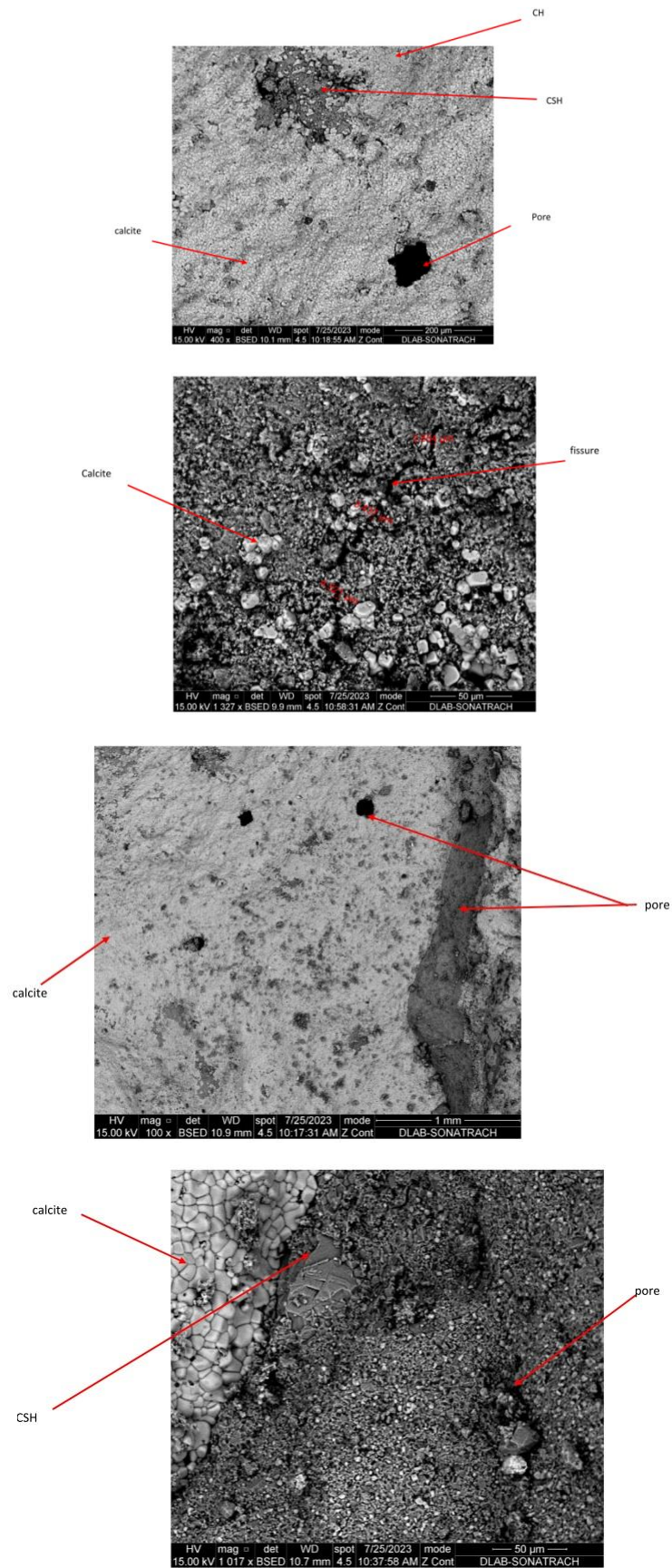


Figure 3.30 : Images MEB : Echantillon soumise à l'air ambiant.

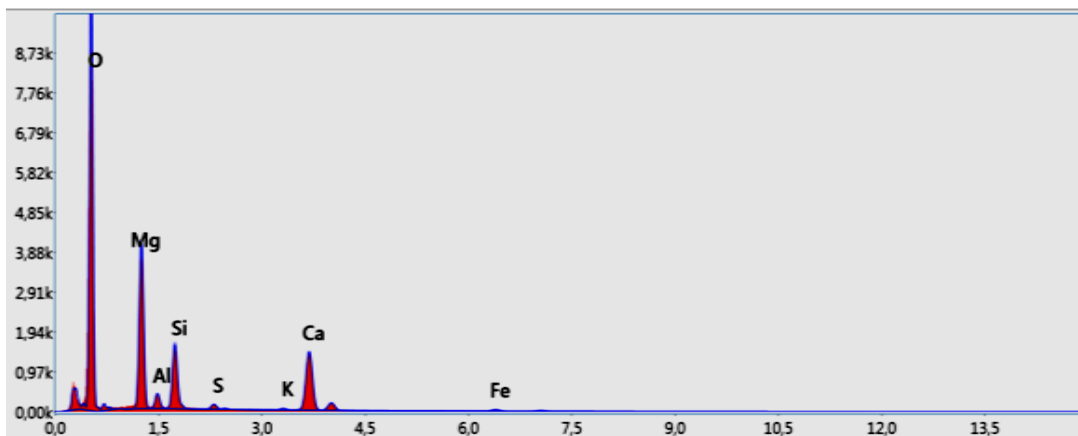
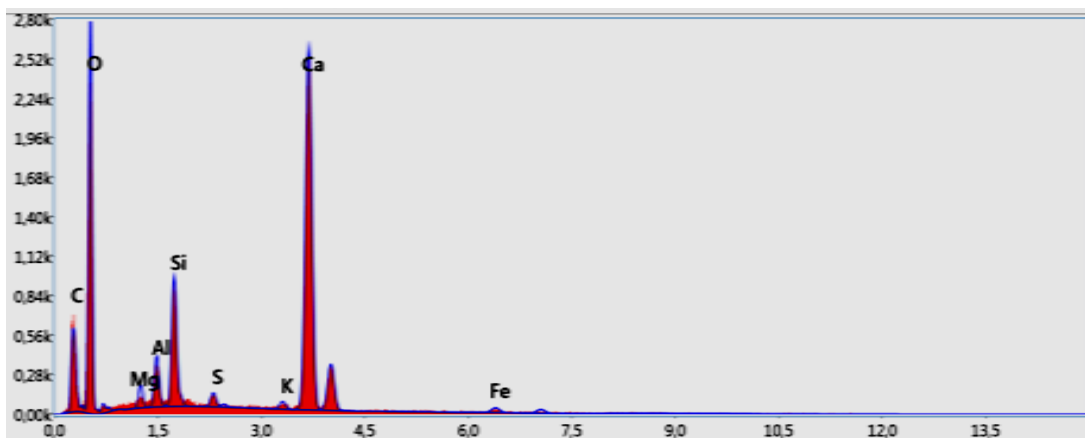
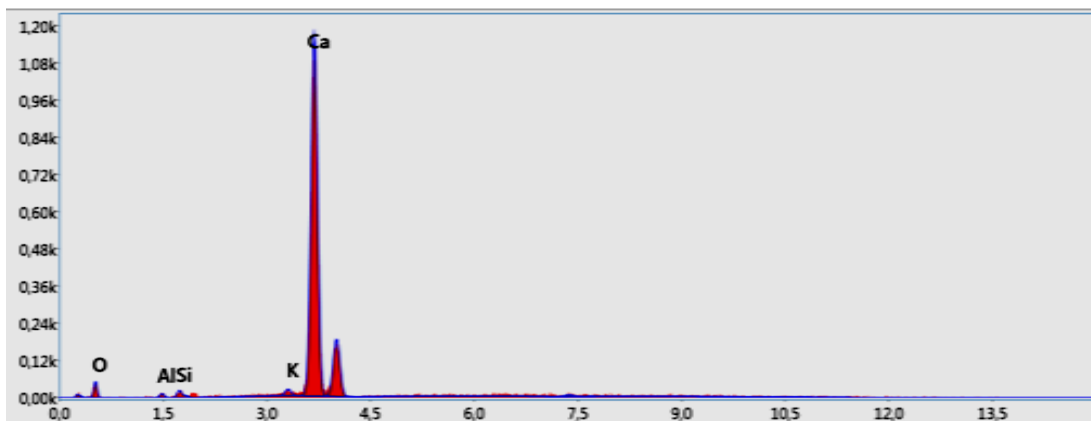
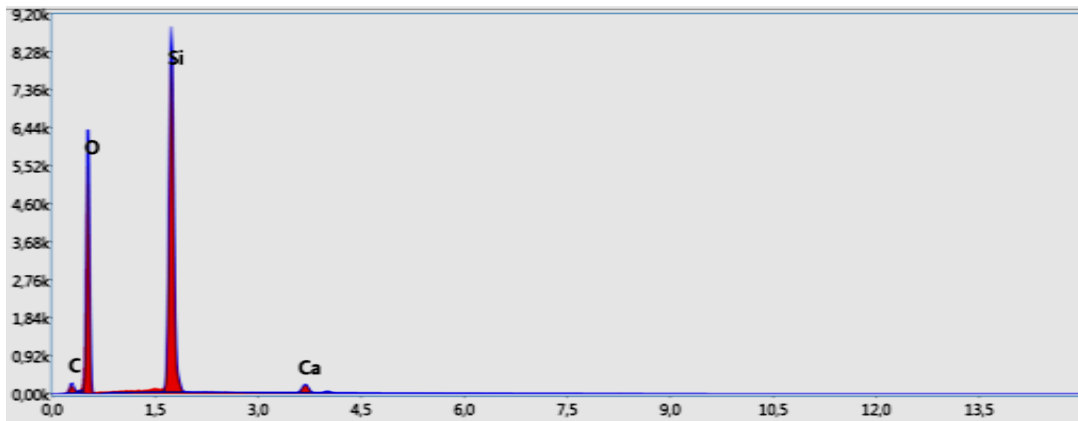


Figure 3.31 : Identification des éléments : Spot 1-2-3-4.

Tableau 3.7: Quantification des différents éléments.

Spot 1				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	5,33	8,61	7,53	16,82
O	51,09	61,93	367,62	9,17
Si	40,56	28	708,87	3,78
Ca	3,02	1,46	22,43	7,16
Spot 2				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
O	9,08	19,94	2,96	17,31
Al	0,37	0,49	1,02	17,87
Si	0,62	0,77	1,9	13,49
K	0,99	0,89	2,26	27,96
Ca	88,93	77,91	130,51	2,95
Spot 3				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	2,4	4,42	7,64	17,78
O	47,79	66,15	160,91	10,79
Mg	0,99	0,9	11,85	11,65
Al	2,01	1,65	27,95	8,42
Si	4,94	3,89	75,47	5,89
S	0,72	0,5	9,13	19,05
K	0,59	0,33	5,88	21,97
Ca	38,93	21,51	286,8	2,83
Fe	1,64	0,65	4,86	13,61
Spot 4				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	0	0	0,01	99,99
O	60,25	74,02	587	9,19
Mg	15,49	12,53	296,15	6,71
Al	1,51	1,1	28,17	9,2
Si	6,11	4,27	128,57	5,84
S	0,63	0,38	11,14	14,82
K	0,28	0,14	3,8	26,46
Ca	14,55	7,14	157,96	3,21
Fe	1,17	0,41	5,27	14,19

7.7.2. EPROUVETTE IMMERGEE DANS L'EAU

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus à l'aide du microscope à balayage électronique combiné à l'EDX sur un échantillon prélevé sur l'éprouvette immergée dans l'eau.

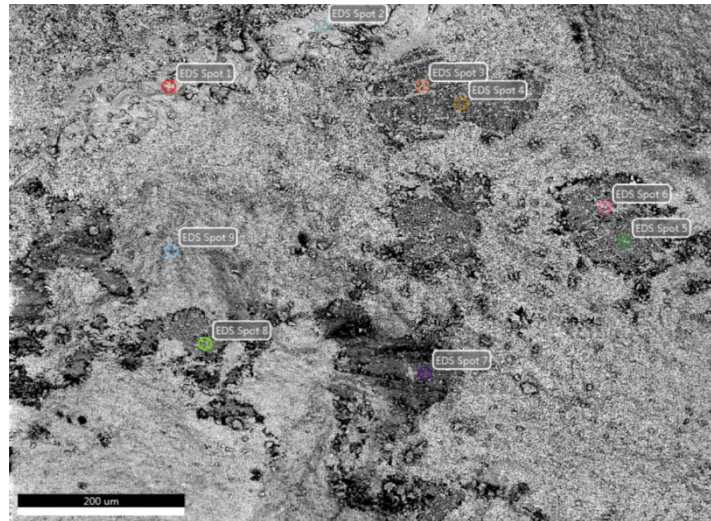


Figure 3.32 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon immergée dans l'eau.

Les résultats obtenus montrent que :

- dans de nombreuses zones il y a présence à la fois du Si, du Ca, du O, du Mg mais aussi de l'aluminium Al, C, Fe, K.
- Nous constatons des niveaux plus élevés de Ca, O. Ce qui fait la présence de la calcite CaCO_3 .

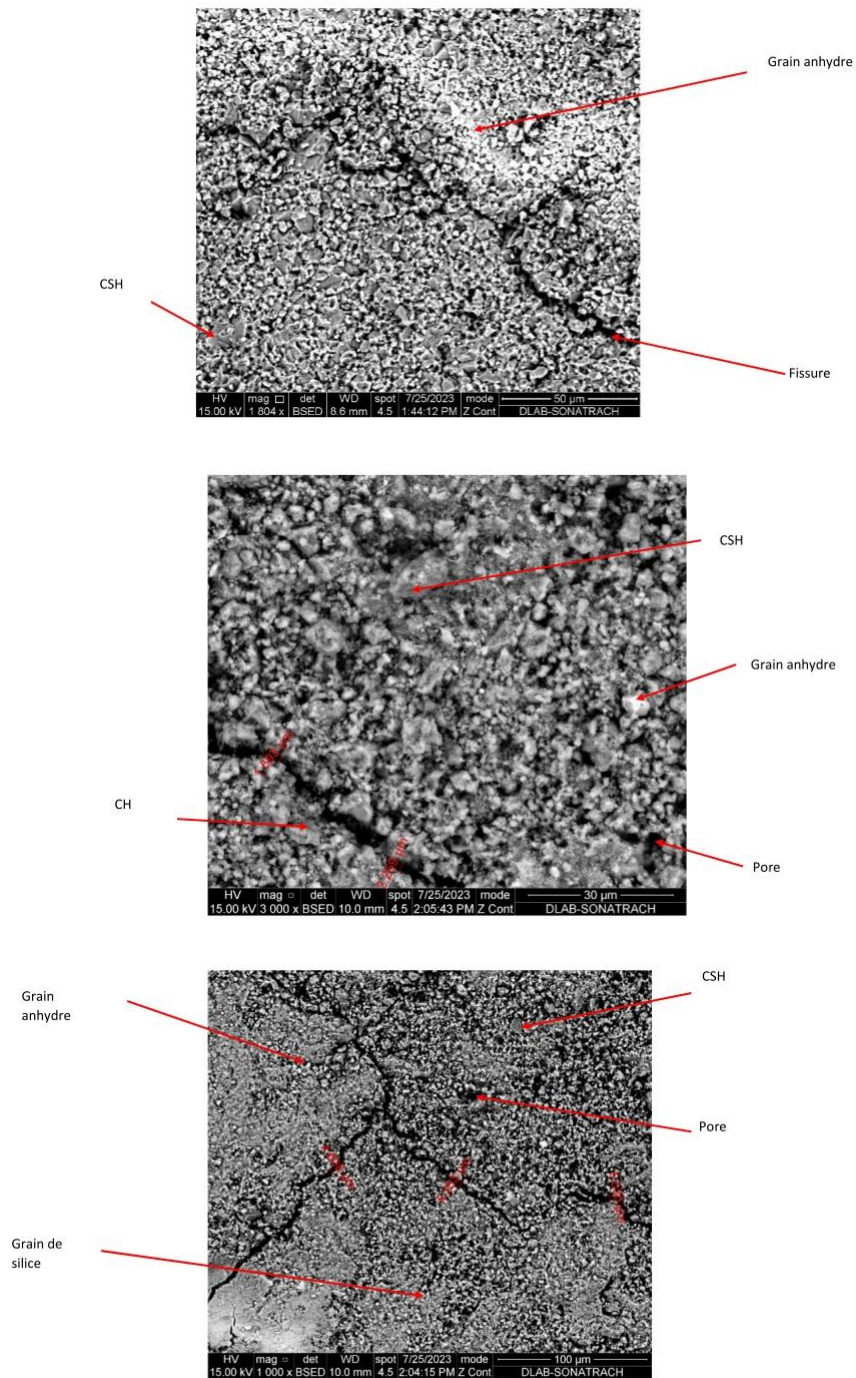


Figure 3.33 : Images MEB : Echantillon immergée dans l'eau.

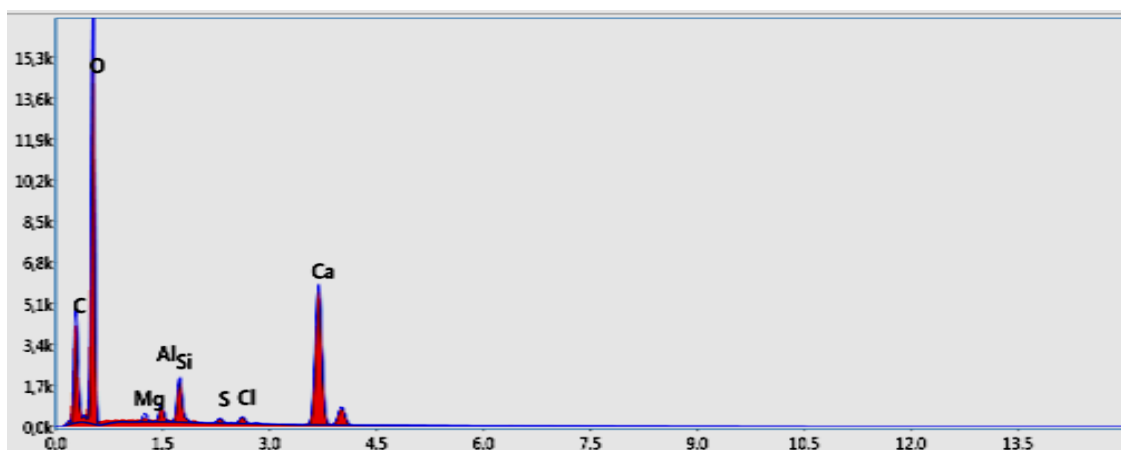
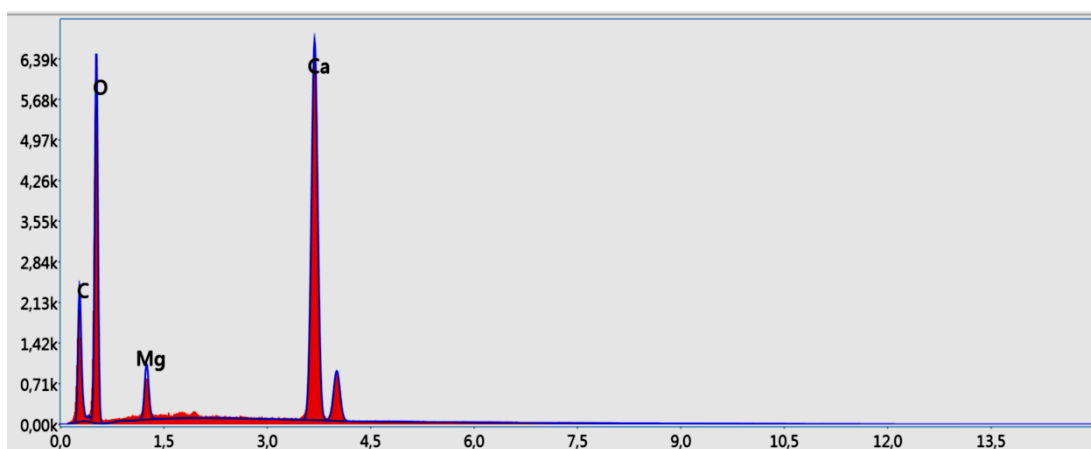
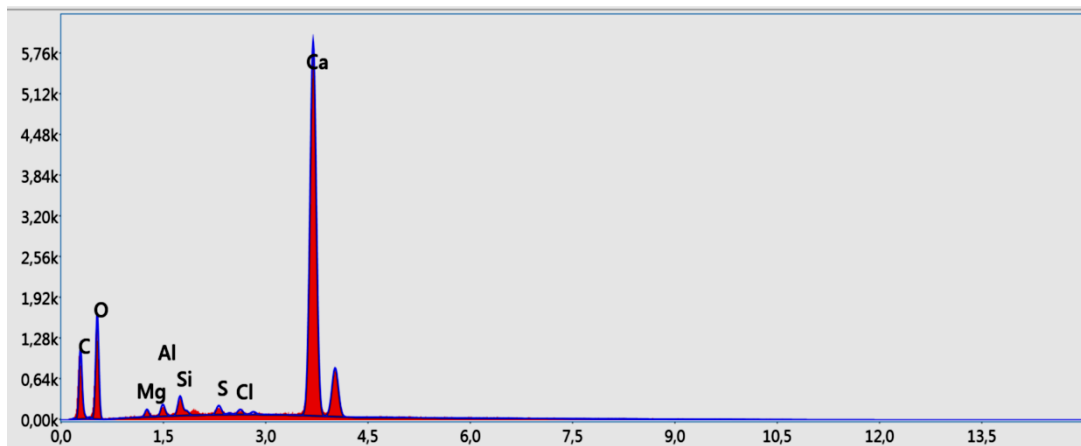


Figure 3.34 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.

Tableau 3.8: Quantification des différents éléments.

Spot 1				
Element	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	8,71	17,69	51,6	11,02
O	28,35	43,21	93,84	11,54
Mg	0,49	0,49	8,78	13,47
Al	0,7	0,63	14,55	10,52
Si	1,09	0,94	25,19	7,34
S	0,68	0,51	13,37	15,58
Cl	0,44	0,3	7,84	16,48
Ca	59,54	36,22	653,14	2,46
Spot 2				
Element	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	9,25	15,81	99,34	10,41
O	47,9	61,46	371,8	10,56
Mg	2,37	2	69,95	7,98
Ca	40,48	20,73	738,4	2,4
Spot 3				
Element	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	13,47	20,17	194,81	10,42
O	59,34	66,7	1036,07	9,84
Mg	0,53	0,39	25,15	10,49
Al	1,02	0,68	56,27	7,67
Si	2,48	1,59	150,44	5,29
S	0,36	0,2	18,06	15,04
Cl	0,6	0,3	26,94	9,18
Ca	22,21	9,97	639,17	2,46

7.7.3. EPROUVETTE SOUMISE A UN EFFET COMBINE HYGROTHERMO-MECANIQUE

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus à l'aide du microscope à balayage électronique combiné à l'EDX sur un échantillon prélevé sur l'éprouvette soumise à un effet combiné hygrothermo-mécanique.

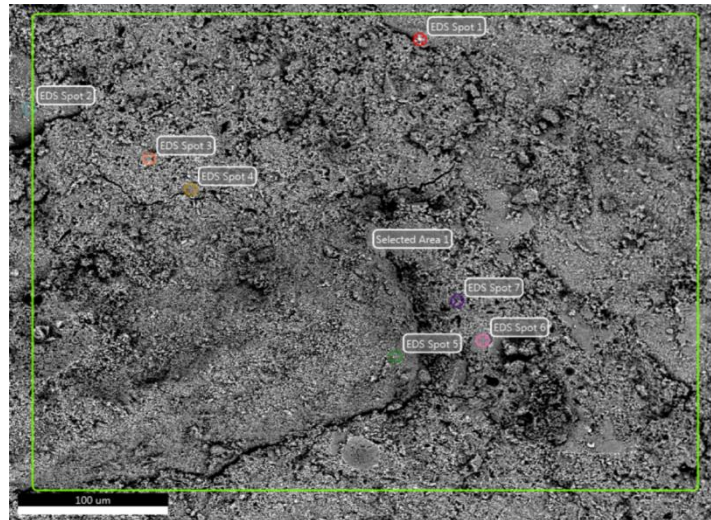


Figure 3.35 : Image MEB des points d'analyse: Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique.

Les résultats obtenus montrent que :

- dans de nombreuses zones SPOT (1,2,3) il y a présence à la fois du Si, du Ca, du O, du Mg mais aussi de l'aluminium Al, C, Fe, K, C et Na.
- dans le SPOT (1,2), nous constatons des niveaux plus élevés de Ca, Ce qui fait la présence de la calcite CaCO_3 en grandes quantités.
- Dans le Spot (1,2,3), nous constatons des niveaux plus élevés de Si, O. ce qui fait la présence de siliceux (quartz) SiO_2 en grandes quantités.
- Mais aussi des intensités élevées des pic de Al, ce qui fait la présence de l'oxyde d'aluminium AlO

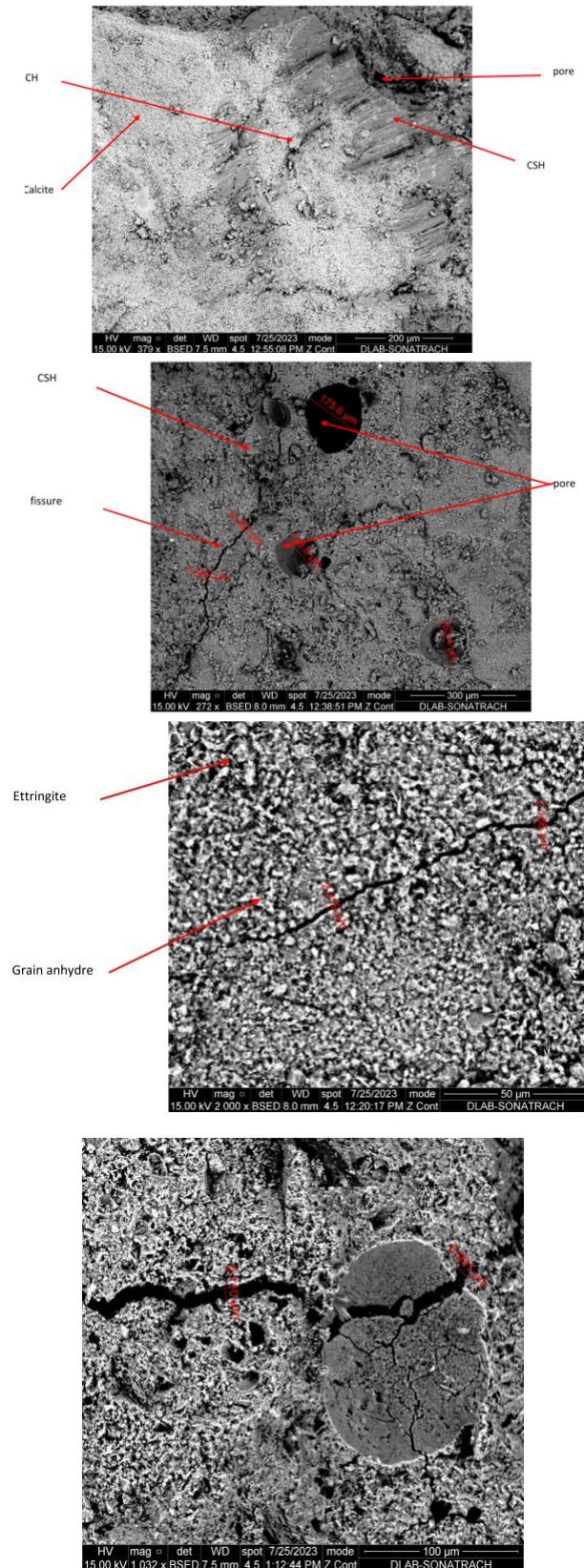


Figure 3.36 : Image MEB : Echantillon soumis à un effet combiné hydrothermo-mécanique.

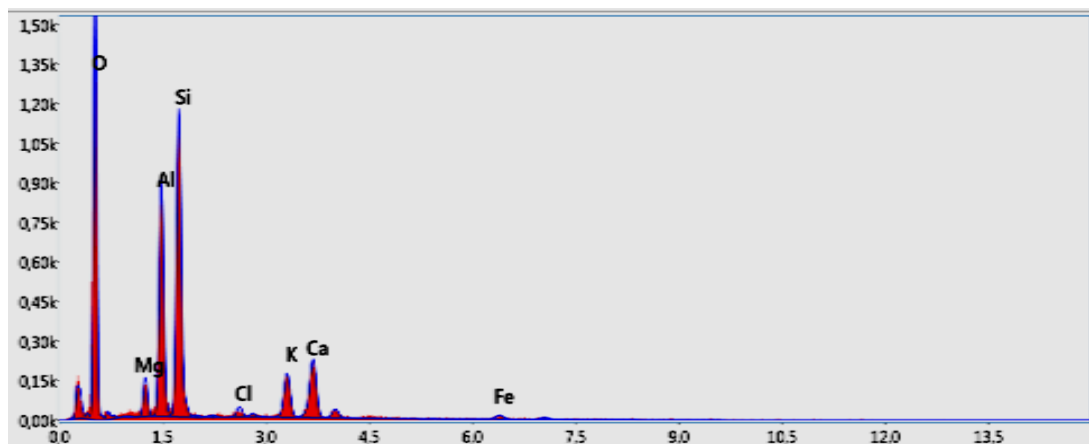
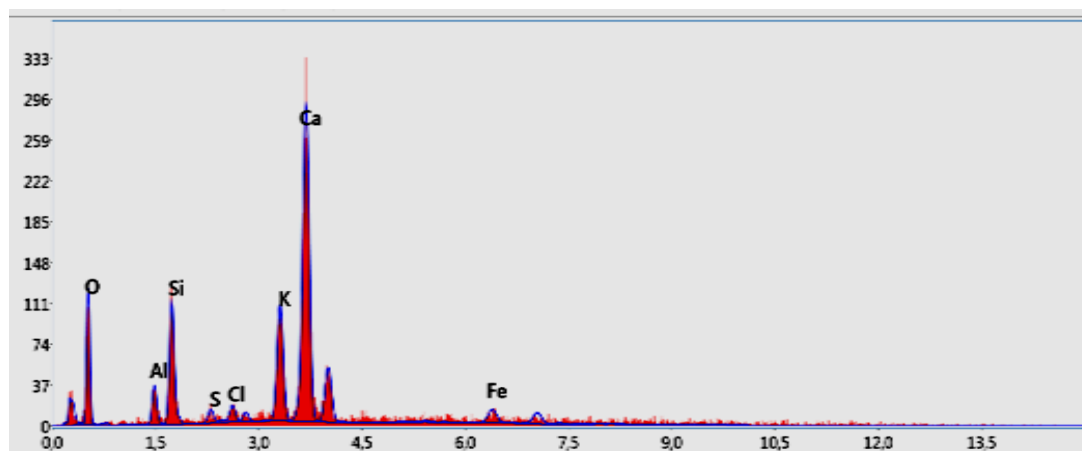
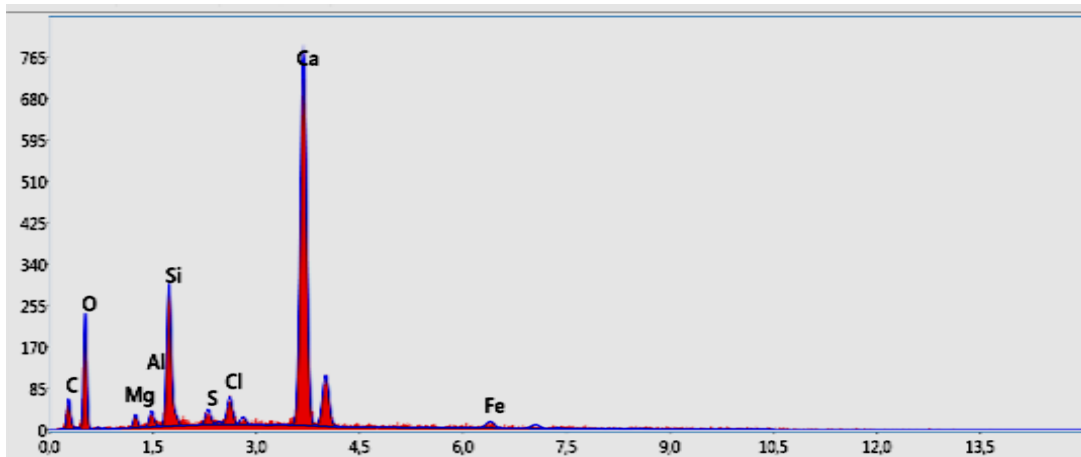


Figure 3.37 : Identification des éléments : Spot 1-2-3.

Tableau 3.9: Quantification des différents éléments.

Spot 1				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	4,28	9,3	2,51	19,23
O	26,61	43,37	13,85	13,32
Mg	0,76	0,81	1,98	18,84
Al	0,85	0,82	2,57	17,97
Si	7,06	6,55	23,67	6,77
S	1,06	0,86	2,91	23,9
Cl	2,17	1,6	5,44	13,19
Ca	54,29	35,33	86,06	3,45
Fe	2,92	1,36	1,85	25,42
Spot 2				
O	28,8	48,73	7,29	14,59
Al	1,96	2,01	2,78	15,13
Si	5,91	5,82	9,22	8,62
S	0,88	0,76	1,14	30,11
Cl	1,27	0,99	1,49	23,09
K	11,72	8,28	11,39	8,02
Ca	44,3	30,55	32,32	4,63
Fe	5,76	2,85	1,73	21,96
Spot 3				
O	47,74	63,87	94,38	10,24
Mg	2,25	1,98	10,88	9,87
Al	13,09	10,38	69,49	6,23
Si	18,43	14,04	95,36	5,77
Cl	1	0,6	3,7	19,76
K	5,77	3,16	17,9	7,78
Ca	9,79	5,23	24,79	5,91
Fe	1,94	0,74	2,09	24,94

7.7.4. EPROUVETTE IMMERGEE DANS LES CHLORURES

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus à l'aide du microscope à balayage électronique combiné à l'EDX sur un échantillon prélevé sur l'éprouvette immergée dans les chlorures.

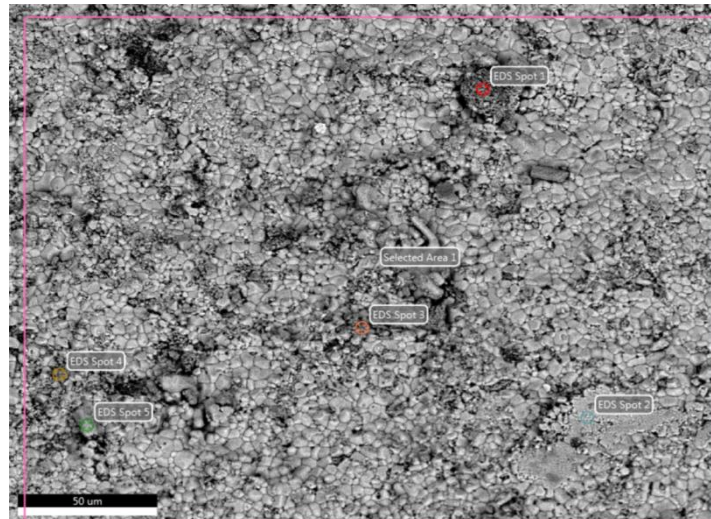


Figure 3.38 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon immergée dans les chlorures.

Les résultats obtenus montrent que :

- de nombreuses zones SPOT (1,2,3,4,5), présentant à la fois du Ca, du O, du Na, du Cl mais aussi de l'aluminium Al, Mg, C, Fe, K, Fe, Ti, S, C.
- les Spots (1,4) montrent des intensités très élevées avec des pics de Ca, ce qui fait à la présence de la calcite CaCO_3 .
- Les Spots (2,3,5) montrent des intensités très élevées avec des pics de Na, Cl, du à la solution de chlorures. Pour avoir Na Cl ne montre que peu de traces de calcite Ca du à la consommation des ions de calcium Ca pour avoir CaC. Ceci se traduit par un PH Acide

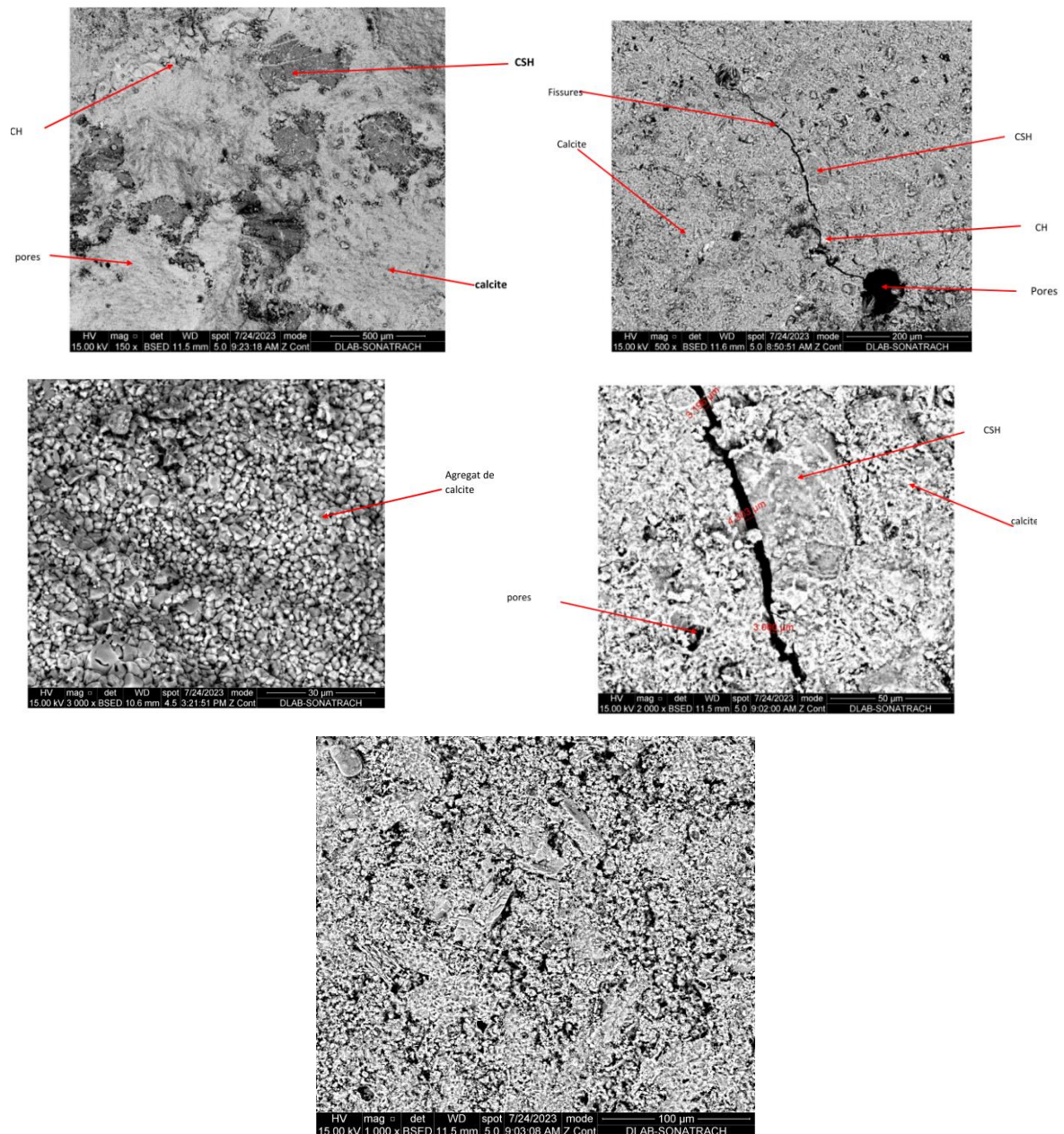


Figure 3.39 : Image MEB : Echantillon immergée dans les chlorures.

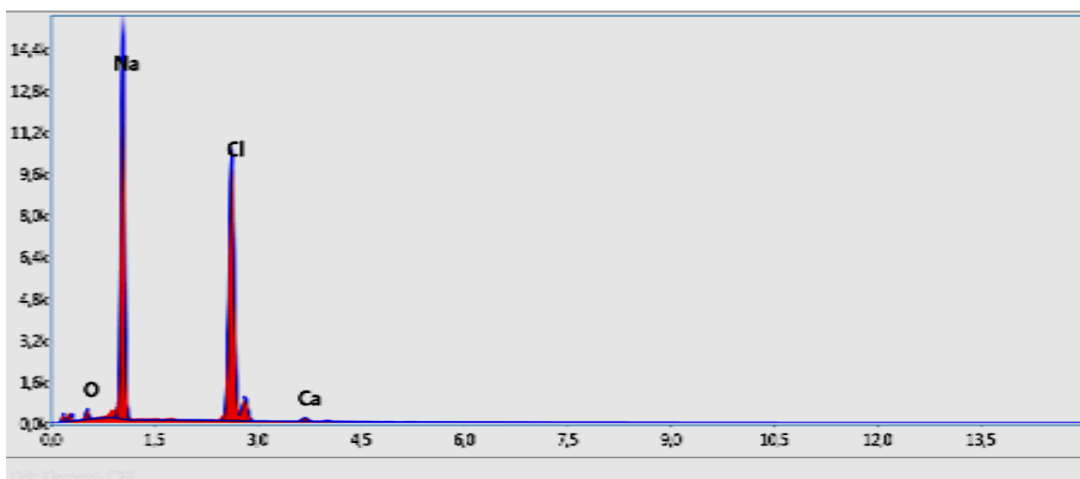
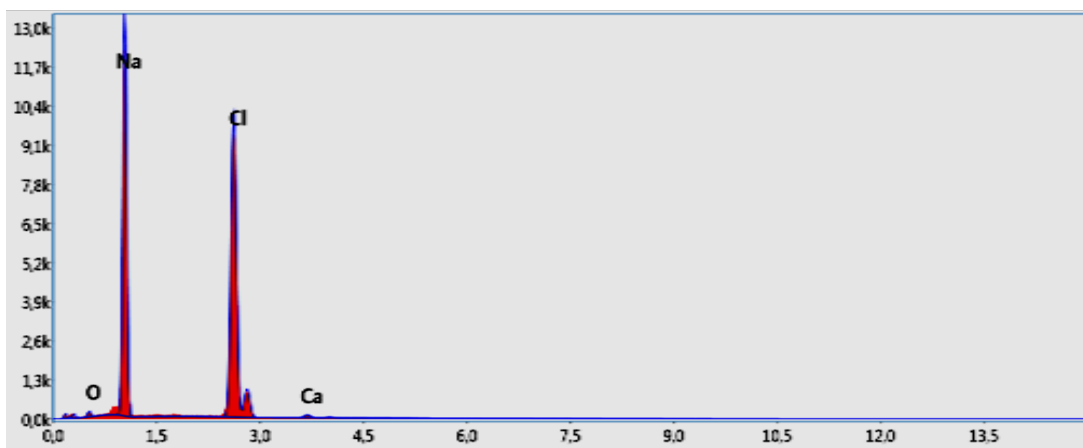
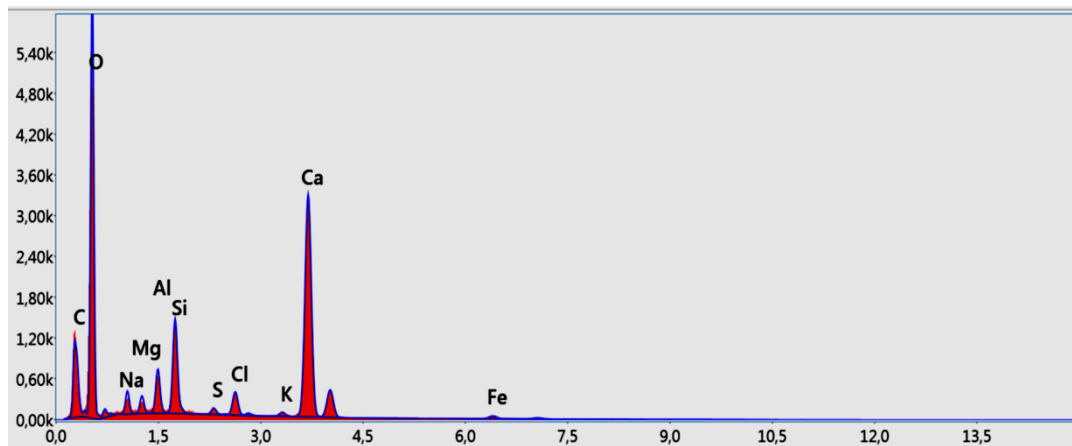


Figure 3.40 : Identification des éléments : Spot 1-2-3

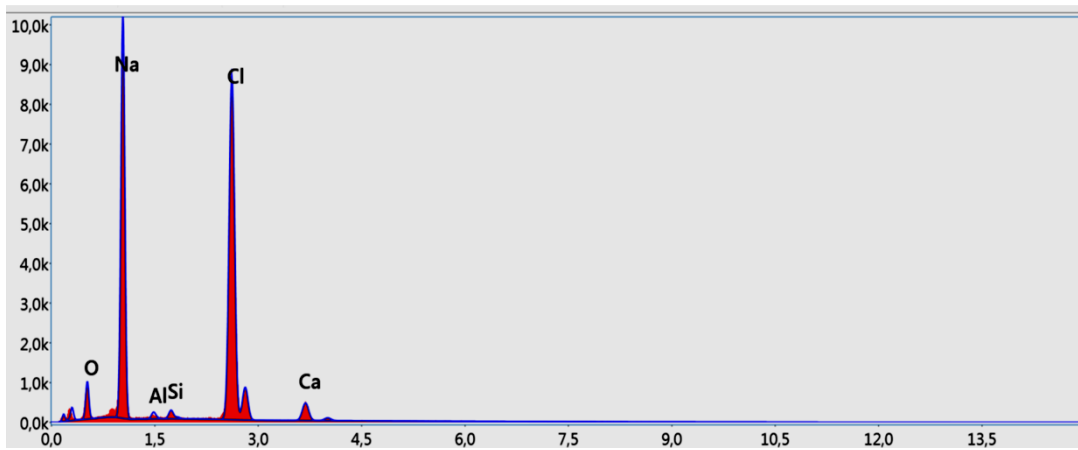
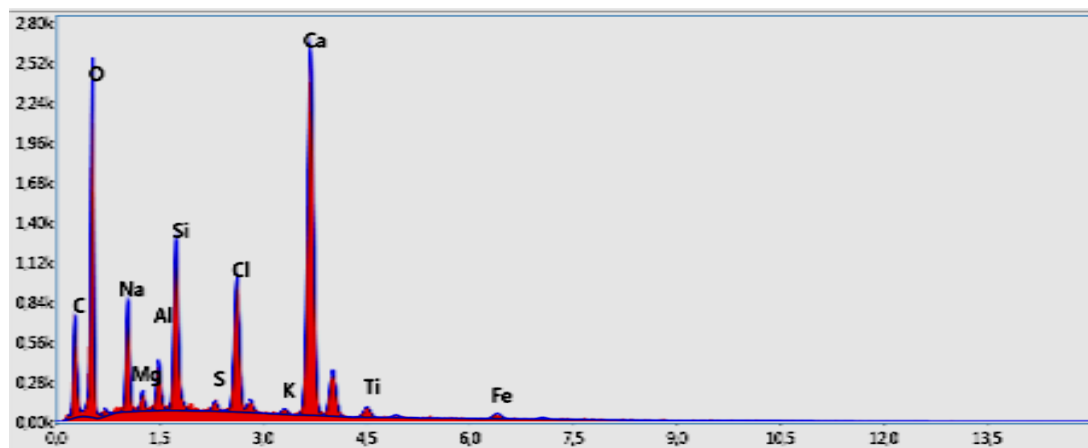


Figure 3.41 : Identification des éléments : Spot 4-5

Tableau 3.10: Quantification des différents éléments.

Spot 1				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	2,17	3,78	10,12	18,54
O	54,18	70,78	360,78	10,24
Na	1,97	1,79	23,44	11,04
Mg	0,98	0,84	19,02	10,94
Al	2,22	1,72	50,07	7,73
Si	4,57	3,4	113,64	5,62
S	0,41	0,27	8,44	18,85
Cl	1,77	1,04	33,02	7,65
K	0,39	0,21	6,25	21,39
Ca	30,16	15,73	363,14	2,75
Fe	1,19	0,44	5,81	16,79
Spot 2				
O	1,63	2,87	10,22	17,19
Na	44,55	54,51	918,23	5,85
Cl	52,93	42	965,4	3,06
Ca	0,89	0,62	9,78	16,65
Spot 3				
O	3,24	5,57	23,58	13,33
Na	46,17	55,27	1057,54	5,83
Cl	49,34	38,3	997,85	3,08
Ca	1,24	0,85	15,32	11,52
Spot 4				
C	7,27	13,46	19,29	14,14
O	36,65	50,89	145,23	10,95
Na	5,8	5,61	55,36	9,33
Mg	0,73	0,66	10,67	12,97
Al	1,63	1,34	27,73	8,43
Si	5,39	4,26	101,02	5,53
S	0,43	0,3	6,72	20,13
Cl	6,65	4,17	92,51	4,29
K	0,37	0,21	4,23	26,44
Ca	32,31	17,91	288,96	2,98
Ti	1,31	0,61	9,02	14,93
Fe	1,47	0,58	5,37	24,43

Suite Tableau 3.10: Quantification des différents éléments.

Spot 5				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
O	8,85	14,93	53,84	11,62
Na	38,09	44,74	698,85	6,34
Al	0,65	0,65	13,12	12,06
Si	0,76	0,73	17,79	9,68
Cl	47,12	35,89	831,4	3,08
Ca	4,54	3,06	48,78	6,11

7.7.5. EPROUVETTE SOUMISE A UN EFFET COMBINE HYGROTHERMO-MECANIQUE & CHLORURES

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus à l'aide du microscope à balayage électronique combiné à l'EDX sur un échantillon prélevé sur l'éprouvette soumise à un effet combiné hygrothermo-mécanique et chlorures.

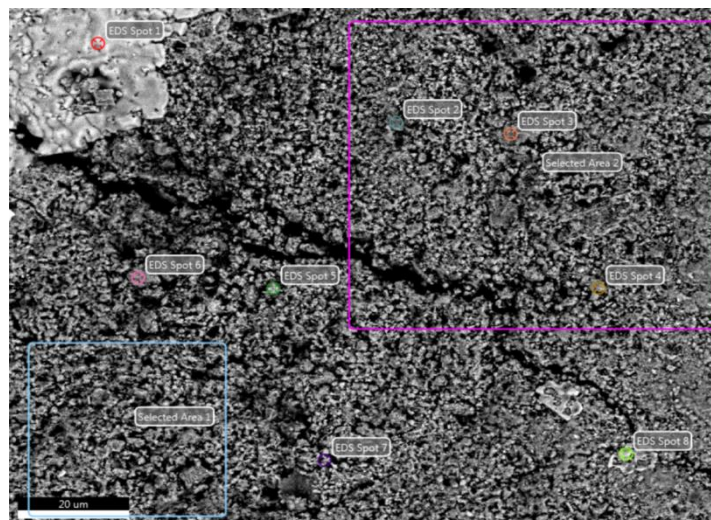


Figure 3.42 : Image MEB des points d'analyse : Echantillon soumis à un effet combiné hygrothermo-mécanique.

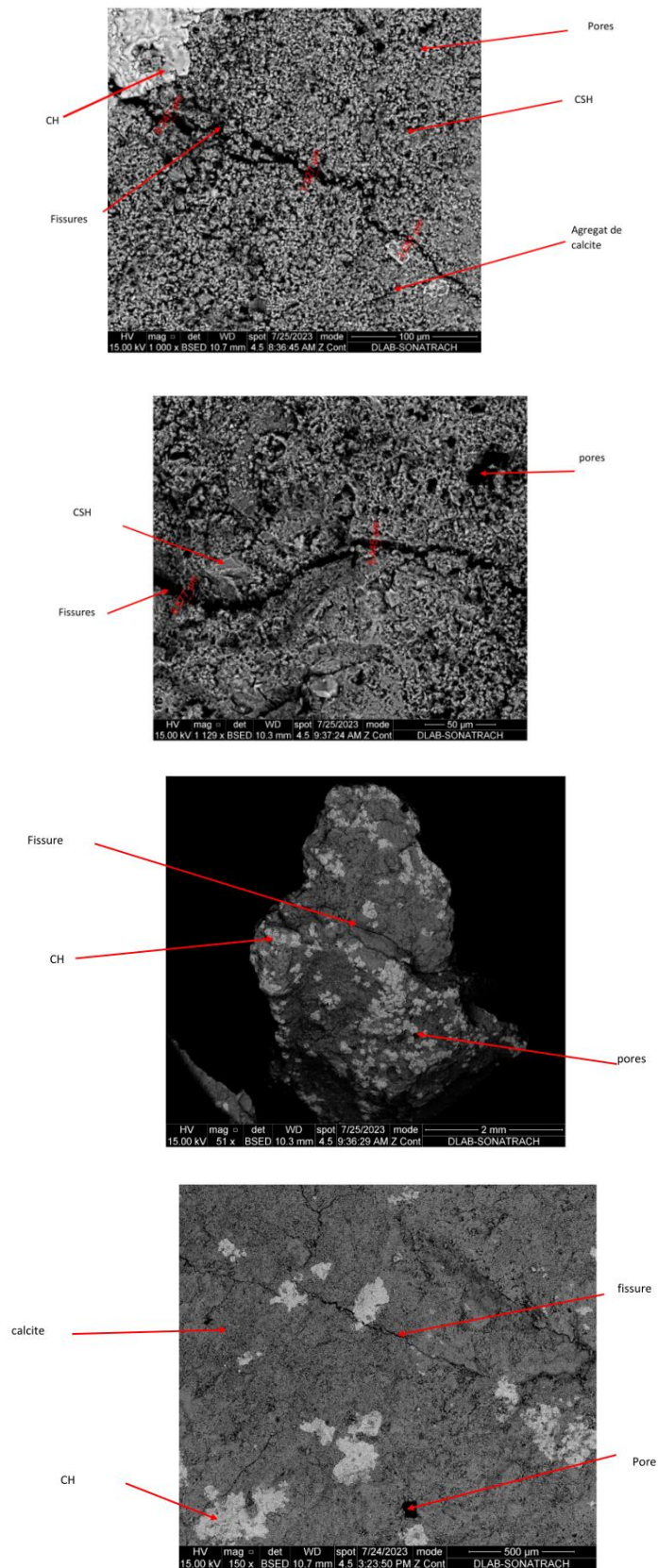


Figure 3.43 : Image MEB : Echantillon soumis à un effet combiné hydrothermo-mécanique.

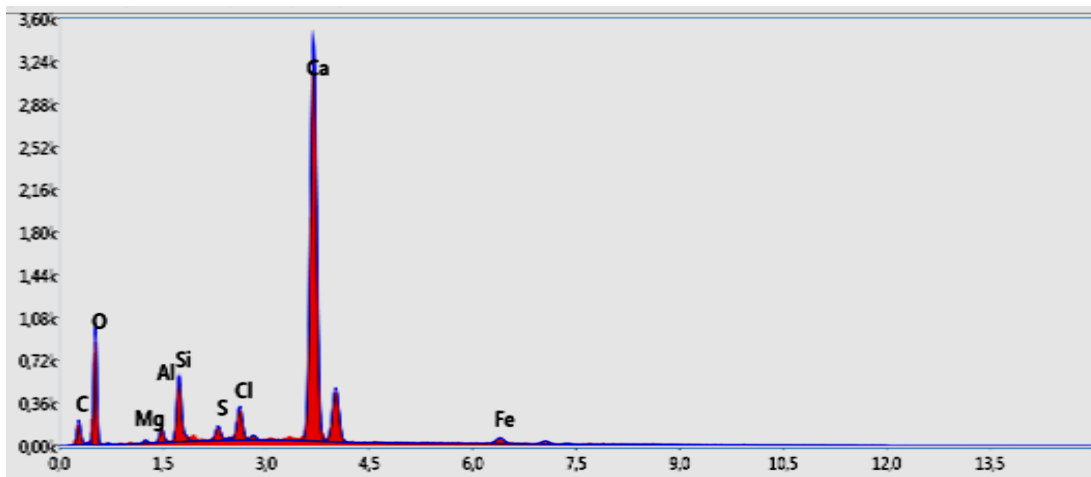
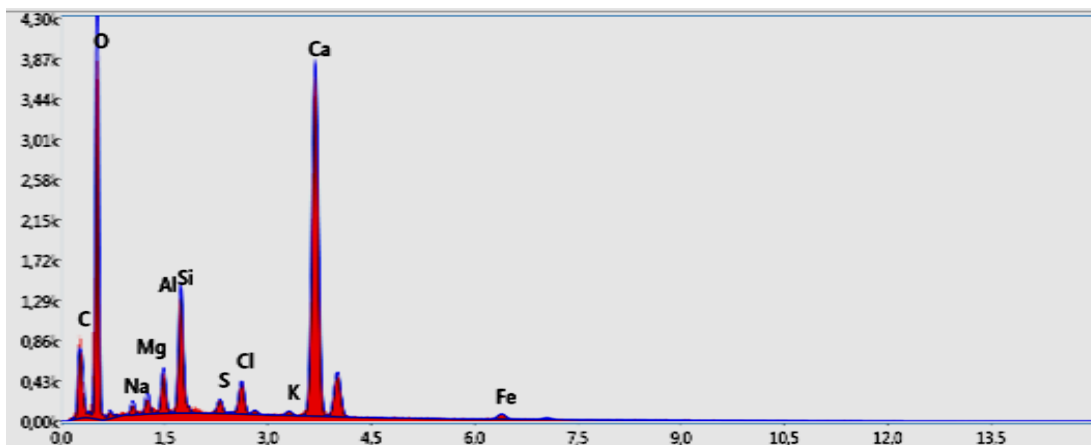
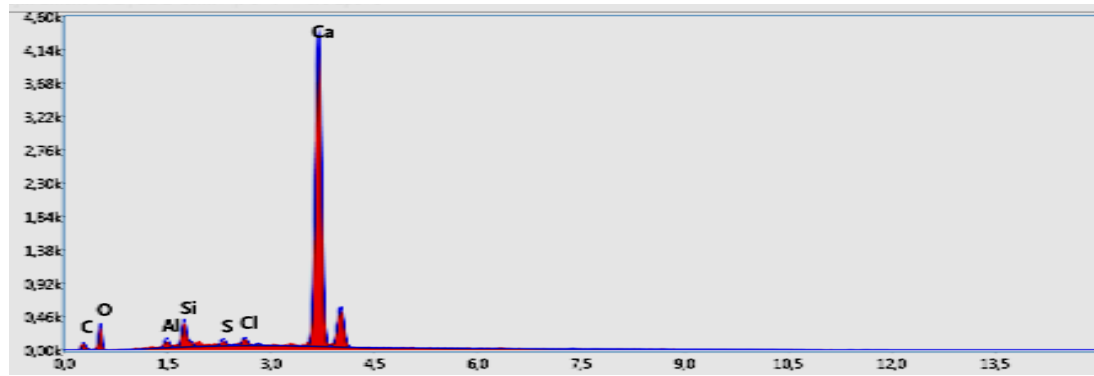


Figure 3.44 : Identification des éléments : Spot 1-2-3

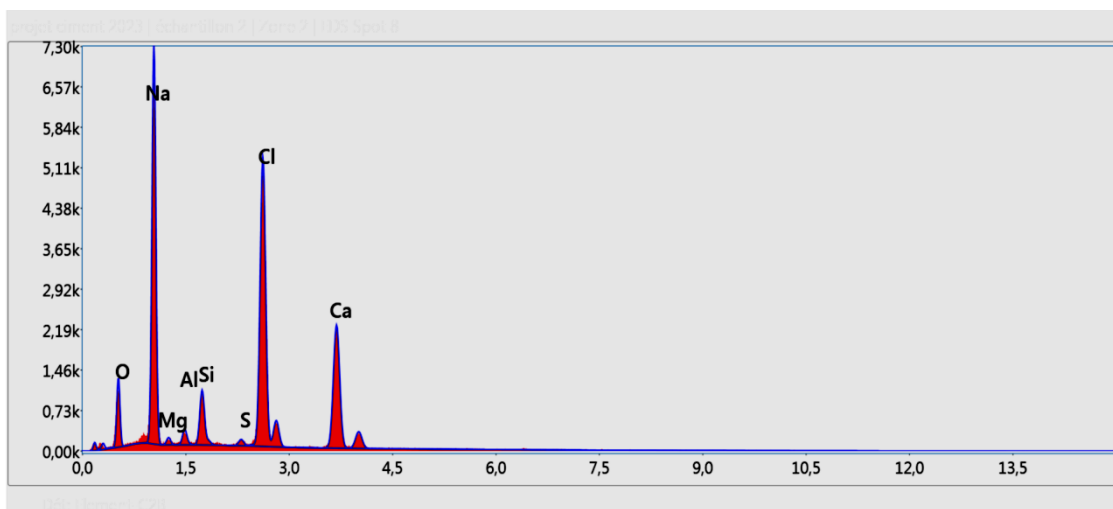
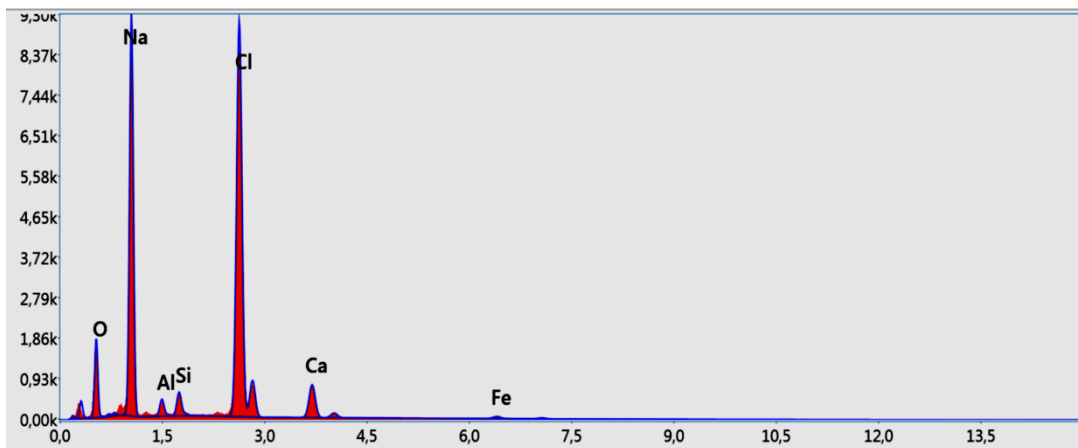


Figure 3.45 : Identification des éléments : Spot 4-5

Tableau 3.11: Quantification des différents éléments.

Spot 1				
Elément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
C	1,36	3,61	4,02	16,74
O	14	27,82	20,88	13,1
Al	0,91	1,07	10,47	10,98
Si	2,4	2,72	30,95	6,85
S	0,82	0,82	9,1	18,27
Cl	1,09	0,98	10,99	13,47
Ca	79,42	63	486,08	2,58
Spot 2				
C	0,85	1,58	3,72	27,24
O	49,45	68,62	269,34	1053
Na	0,93	0,9	10,22	13,88
Mg	0,94	0,86	17,25	11,14
Al	1,74	1,43	36,96	8,02
Si	4,73	3,74	111,1	5,52
S	0,7	0,49	13,78	15,06
Cl	1,91	1,2	33,85	7,53
K	0,32	0,18	4,91	27,58
Ca	36,7	20,33	415,2	2,7
Fe	1,71	0,68	7,83	15,4
Spot 3				
C	2,95	6,49	7,94	15,06
O	28,55	47,16	59,48	11,81
Mg	0,2	0,21	2,09	24,19
Al	0,74	0,72	9,15	11,75
Si	3,36	3,16	46,42	6,28
S	0,98	0,8	11,37	13,34
Cl	2,62	1,95	27,61	6,92
Ca	58,03	38,27	381,09	2,71
Fe	2,59	1,23	6,75	14,13
Spot 4				
O	14,39	23,7	103,56	10,9
Na	32,19	36,9	633,68	6,76
Al	1,25	1,22	29,9	9,08
Si	1,63	1,53	44,46	7,26
Cl	42,65	31,7	873,51	3,08
Ca	6,64	4,37	83,61	5,06
Fe	1,24	0,59	6,98	17,35

Suite Tableau 3.11: Quantification des différents éléments.

Spot 5				
Élément	% de masse	% atomique	Intensité tot	Erreur %
O	13,44	22,58	70,93	11,62
Na	30,44	35,61	492,89	7,06
Mg	0,55	0,61	9,56	15,06
Al	1,07	1,06	21,81	10,52
Si	3,48	3,33	80,86	6,48
S	0,51	0,43	10,36	20
Cl	28,41	21,55	500,66	3,35
Ca	22,1	14,83	246,24	3,57

Les résultats obtenus montrent que :

- Dans les Spots(1,2,3,4,5) : On trouve de nombreuses zones présentant à la fois du Ca, du O, Na, Cl mais aussi de l'aluminium Al,Si,Mg, Cl, C, Fe, K, .
- Les Spots (1,2,3) montrent des intensités très élevées avec des pics de Ca, ce qui fait référence à la présence de la calcite CaCO_3 en grandes quantités(Spot1) $\text{CaCO}_3 = 79.42 \geq 75\%$ conformément aux exigences de la norme EN 197-1 (2012) relatives aux ajouts minéraux utilisés. qui est dû à la présence de la matrice du carbonate.
- Les Spots (1,2,3,5) montrent que le calcaire présente une dominance de cristaux à base de calcium en l'occurrence la calcite et ne montre que peu de traces de silice.
- Les Spots (4,5) montrent des intensités très élevées avec des pics de Na, Cl, du à la solution à base de chlorures. pour avoir Na Cl ne montre que peu de traces de calcite Ca du à la consommation des ions de calcium Ca pour avoir CaCl

7.8. ANALYSE DES RESULTATS LIBS

Dans le but de réaliser l'analyse avec le Laser Induced Breakdown Spectroscopy, nous avons prélevé pour chaque condition d'exposition trois (3) échantillons. En considérant les cinq (5) conditions d'expositions présentées précédemment, nous avons obtenus ainsi (15) échantillons. Pour chaque éprouvette donc les trois échantillons correspondent au trois zones définies précédemment dans la Figure 3.3. Nous présentons dans la Figure 3.46 une image des échantillons préparés avant l'essai. Le détail de ces différents échantillons est récapitulé dans le Tableau 3.12.

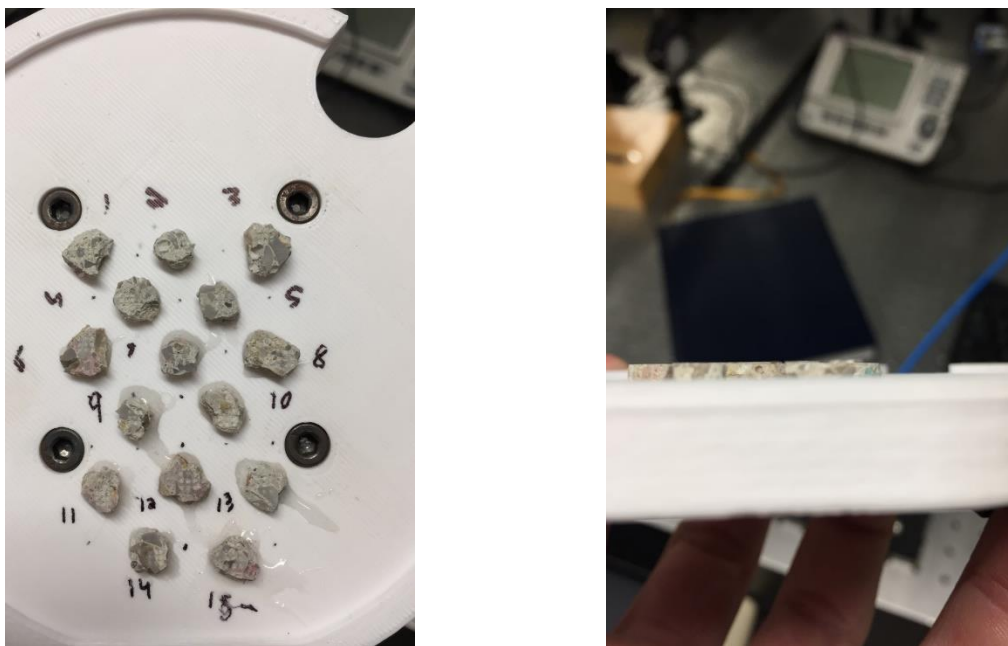


Figure 3.46 : Image de la préparation des échantillons pour l'essai LIBS.

Il y a lieu d'indiquer qu'avant de tester les différents échantillons :

- ⊕ Tous les échantillons ont été poncés à l'eau en utilisant de l'eau distillée pour la lubrification.
- ⊕ Pierres de ciment époxiées à la surface
- ⊕ Pierres poncées à l'eau avec du papier de verre de grain 80.
- ⊕ Pierres finies avec du papier de verre humide de 400 grains.
- ⊕ Chaque échantillon a été mesuré 25 fois en 9 endroits différents (225 mesures au total).
- ⊕ Les 10 premières mesures sur 25 sont supprimées avant de prendre la moyenne des 9x15 mesures.

Tableau 3.12 : Descriptif des échantillons utilisés lors de l'essai LIBS

Echantillon	Conditions d'exposition		
	Zone	Hygrothermique	mécanique
1	Bas	Non	Non
2	milieu	Non	Non
3	haut	Non	Non
4	Bas	Oui	Oui
5	milieu	Oui	Oui
6	haut	Oui	Oui
7	Bas	Oui	Oui
8	milieu	Oui	Oui
9	haut	Oui	Oui
10	Bas	immersion	Non
11	milieu	immersion	Non
12	haut	immersion	Non
13	Bas	immersion	Non
14	milieu	immersion	Non
15	haut	immersion	Non

Sur la figure ci-dessous, nous présentons un exemple de courbes issues de l'analyse par Le LIBS. Il s'agit des deux échantillons 9 et 12.

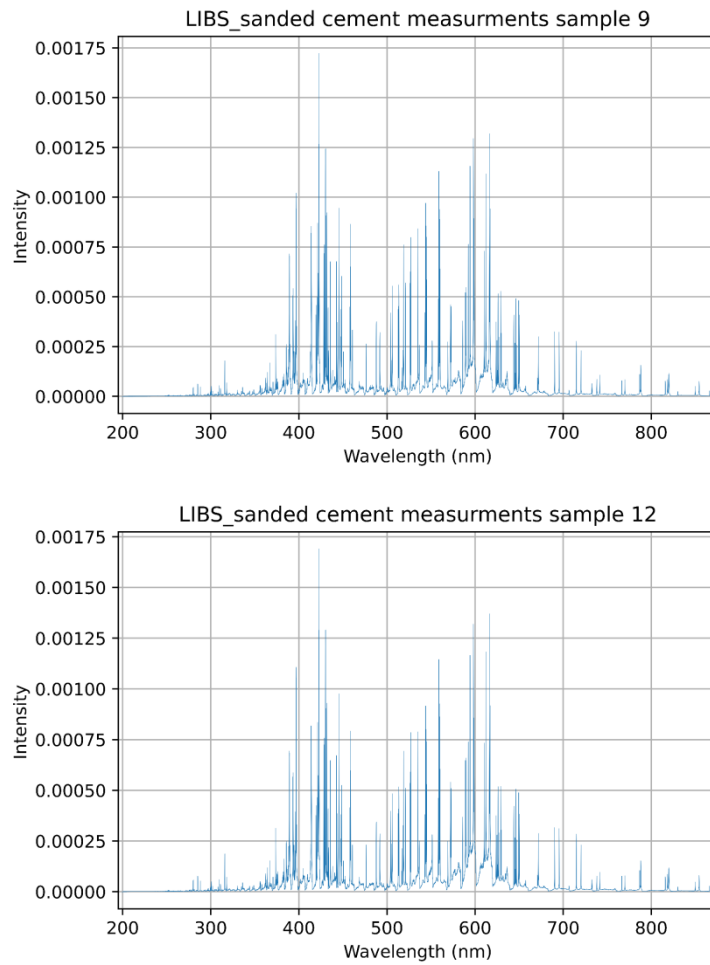


Figure 3.47 : Résultat de l'analyse par LIBS- Echantillon 9 et 12.

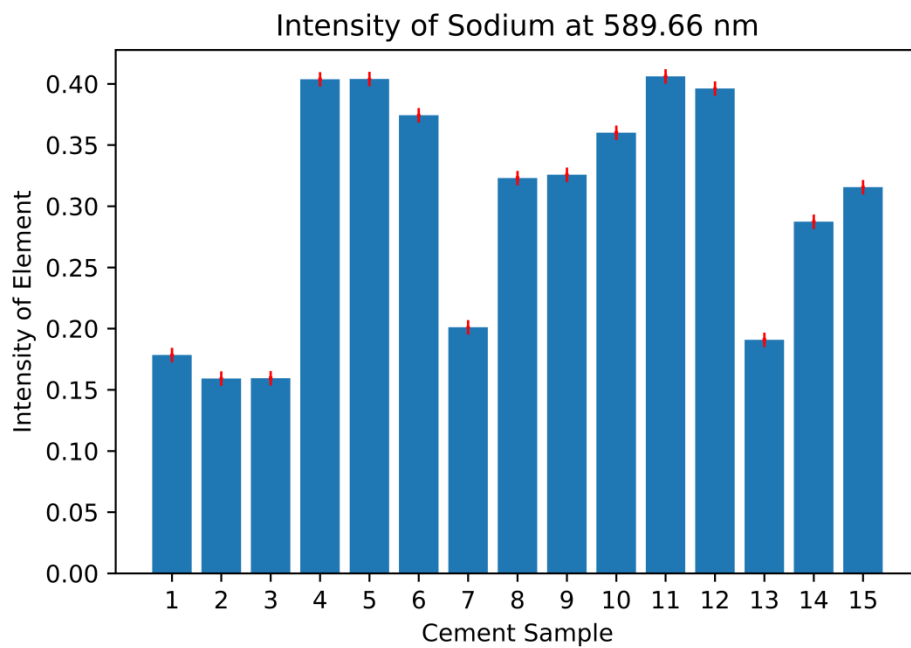


Figure 3.48 : Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément Na pour les 15 échantillons.

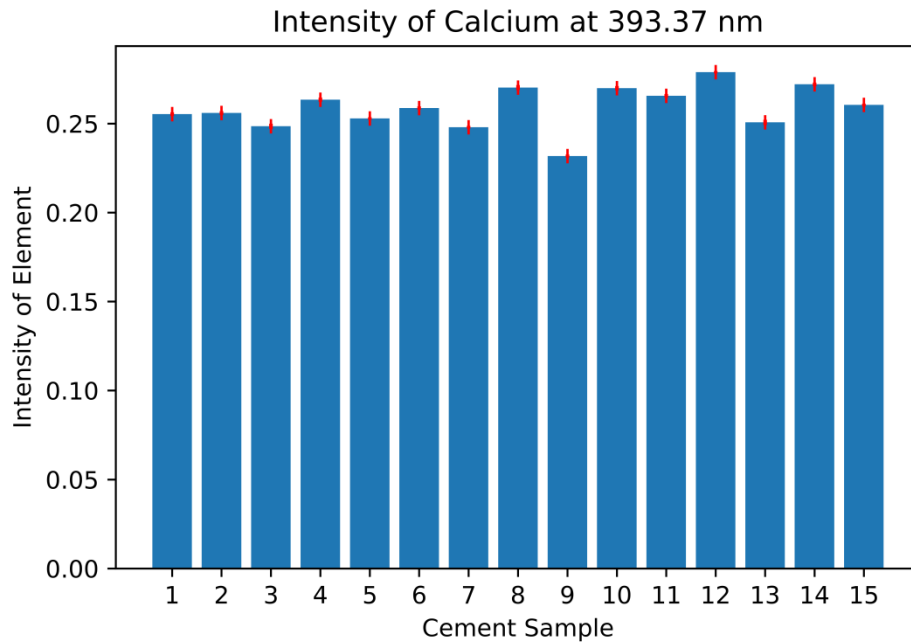


Figure 3.49 : Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément Ca pour les 15 échantillons.

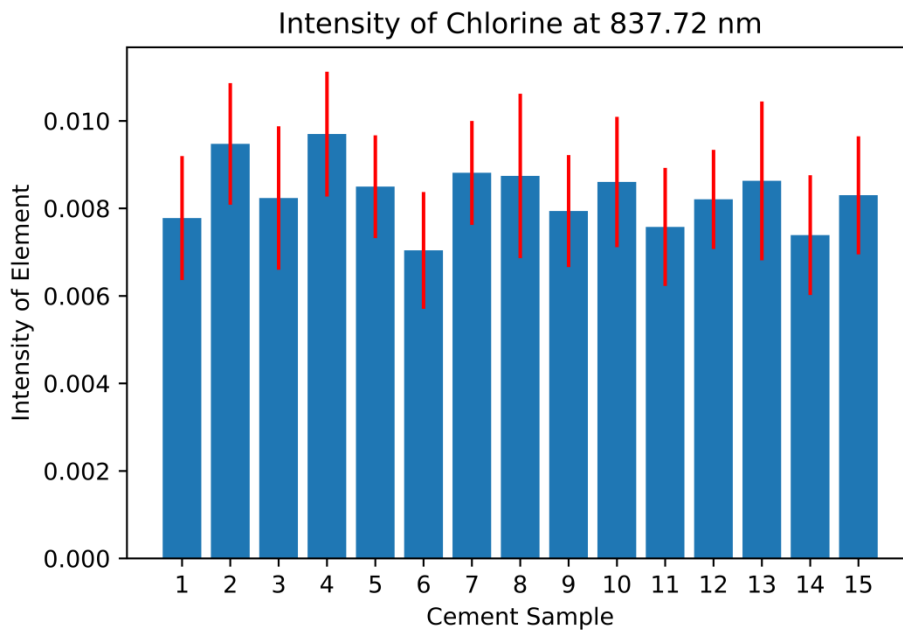


Figure 3.50: Résultat de l'analyse par LIBS concernant l'élément CL pour les 15 échantillons.

A partir des résultats obtenus nous pouvons conclure que :

- ☐ La ligne d'émission du sodium à Na I 589,66 nm a été détectée avec succès. La courbe de la ligne de sodium dans le béton

contenant différents médiums a été réalisée. La courbe linéaire certifie que la raie de sodium peut être utilisée comme empreinte digitale pour l'évaluation de la résistance du béton.

- La dégradation des éléments en béton armé est confirmée par l'augmentation de la longueur d'onde Na pour les échantillons testés dans un environnement agressif (40g/ L NaCl) (Eau) par rapport à l'environnement de référence. L'agressivité est confirmée avec différents environnements.
- Si l'on considère l'effet hygrothermique, la longueur d'onde d'intensité de Na pour les éprouvettes testées dans un environnement agressif (40g/ L) augmente par rapport aux éprouvettes testées dans un environnement agressif (40g/ L) sous l'effet hygrothermique-mécanique.

En ce qui concerne l'environnement de référence et l'eau de surface .

- Le calcium a été émis par le matériau en béton, qui contient du Ca comme élément principal. Le pic le plus élevé correspond aux lignes ioniques du Ca à des longueurs d'onde de 393,37 nm, tandis que la ligne du sodium neutre se situe à une longueur d'onde de 589,66 nm. Les résultats confirment que la présente méthode peut être employée pour détecter le Na dans le béton afin d'évaluer la corrosivité du béton.
- La ligne spectrale du chlore à 837,72 a été signalée comme étant bien détectable dans le béton pour l'évaluation du béton armé contre les corrosives.
- l'augmentation du signal Cl était apparemment due à une quantité importante de monochlorures CaCl
- Bien que la raie spectrale du chlore soit faible par rapport aux autres raies spectrales, principalement celle du calcium, elle est la seule caractéristique spectrale appropriée pour la détection du chlorure dans les matériaux de construction.

8. CONCLUSION

L'objectif de cette partie de notre travail est d'étudier les effets combinés des sollicitations dues à l'exposition aux effets hygrothermiques, aux sollicitations mécaniques et à l'effet des chlorures. Nous avons essayé de reproduire autant que possible les conditions réelles auxquelles seront soumises les structures de génie civil. Afin de détecter les dégradations (dommages) subi par les éprouvettes en béton armé, nous avons utilisé la combinaison de plusieurs essais de caractérisation à savoir :

- La mesure du potentiel de corrosion.
- L'Analyse par DRX
- L'Analyse par LIBS
- L'Analyse MEB
- L'essai de carbonatation
- L'inspection visuelle

En se basant sur les différents résultats expérimentaux obtenus et sur les différentes observations du comportement des éléments en béton armé étudiés, nous pouvons retenir les points essentiels suivants :

- Pour toutes les éprouvettes étudiées, après n cycles de vieillissement accéléré, nous constatons une diminution du potentiel de corrosion Cette constatations est en adéquation avec les résultats issus de la littérature.
- Au début du processus de vieillissement, cette diminution est légère. Cependant, à la fin du processus cette diminution est plus importante.
- La dégradation la plus importante a été obtenue dans le cas de l'immersion des éprouvettes dans une solution chlorures.
- La dégradation obtenue dans le cas des éprouvettes soumises à un effet combiné hygrothermo-mécanique et chlorures est moins importante comparé à celle de l'immersion dans une solution chlorure mais il est plus important comparé aux autres cas.
- L'effet de l'immersion dans l'eau est plus important que lorsque l'éprouvette subis des cycles d'immersion et séchage combiné à un effet mécanique (chargement-déchargement).

- En effet les résultats obtenus montrent clairement l'effet de la combinaison du chargement-déchargement avec le cycle hygrothermique. Cet effet qui léger dans le début du processus du vieillissement devient plus notable au fur et à mesure que le nombre de cycles augmente.
- Il y a lieu d'indiquer que les courbes montrent que l'effet obtenu dans le cas des éprouvettes soumises à un cycle d'immersion dans de l'eau du robinet est moins important que lorsque l'éprouvette subit des cycles d'immersion et séchage toujours dans de l'eau du robinet combiné à un chargement-déchargement mécanique.
- Les observations visuelles concordent bien avec les résultats obtenus en mesurant le potentiel de corrosion. En effet, d'une part, les valeurs mesurées du potentiel après 1110 jours sont inférieures à la valeur limite -350 mV. D'autre part, après 1110 jours, aucun signe de corrosion n'est observé dans le cas des barres d'acier encastrées dans des échantillons de béton exposés à l'air ambiant ce qui correspond à des valeurs mesurées du potentiel, supérieures à -200 mV.
- Il y a lieu de préciser que certains résultats doivent être développés pour qu'on puisse faire une analyse plus détaillée.

Il y a lieu pour finir d'indiquer que d'une part l'objectif principal assigné à cette partie consistait à suivre la dégradation d'un élément en béton armé soumis à différentes conditions d'exposition et ce en mesurant les paramètres physiques et chimiques qui permettent la connaissance de l'état de l'élément.

D'autre part, nous avons essayé de combiner les différentes techniques d'auscultations et d'analyse afin de pouvoir établir une corrélation entre les différents paramètres mesurés. A ce titre, nous avons fait appel pour la première fois à la technique du Laser Induced Breakdown Spectroscopy dans le cadre d'une collaboration scientifique.



Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

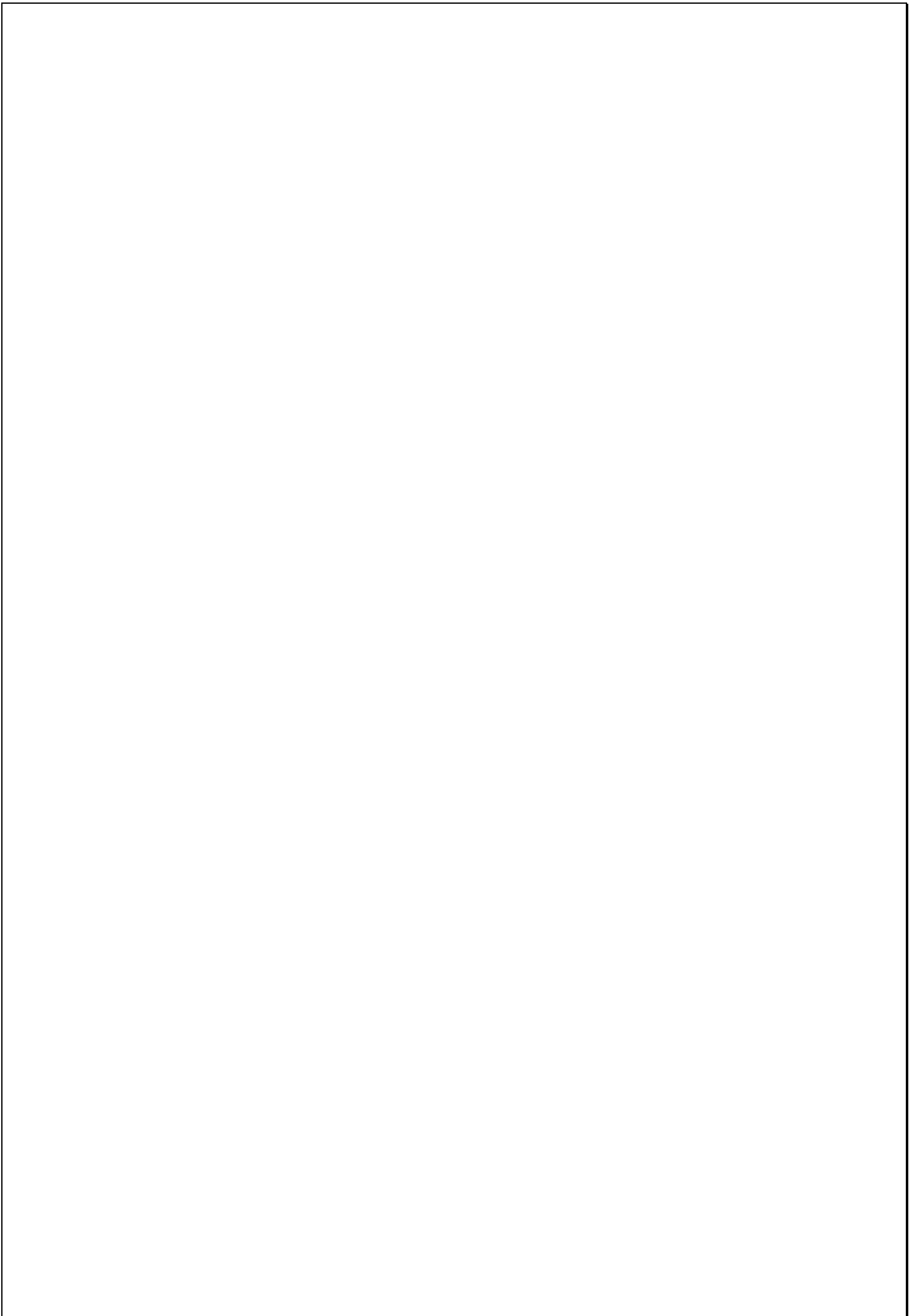
- [1] Jonathan MAI –NHU (2013) « Corrosion des armatures du béton : Couplage carbonatation / Chlorures en présence de cycles hydriques »
- [2] Chérifi W., Houmadi Y. Benali O. « Corrosion des armatures : méthodologies de suivi de la durée de vie des ouvrages en béton armé »
- [3] C. Fang , K. Lundgren, L. Chen, et al(2004) , Corrosion influence on bond in reinforced concrete, Cem. Concr. Res .34(11) 2159–2167
- [4] Yiyan Lu, Wenshui Tang, Shan Li, Mingyong Tang (2018), Effects of simultaneous fatigue loading and corrosion on the behavior of reinforced beams, Construction and Building Materials,18185–93.
- [5] A. Duan, I. G. Dai, W. L . Jin (2011). Probabilistic approach for durability designs of concrete structures in marine environments. Mater. Civ. Eng. 27 (2) A4014007.
- [6] H.L. Wang,J.G,Dai ,X.Y. Sun ,et al (2016).., Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration , Constr. Build. Mater .107216–225.
- [7] E. Sola, J. Ozbot. (2016), Modeling corrosion of steel reinforcement in concrete: natural VS. Accelerated corrosion , Conference paper.
- [8] C. Q. Li, R.E. Melchers (2006), Analytical model for corrosion – induced crack width in reinforced concrete structures, ACI Mater . J. 103(4) 479–487.
- [9] K. Bhargava ,A.K. Ghosh ,Y. Mori ,et al (2006).., Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures, Eng .Struct .28(8) 1093–1109.
- [10] C.Q. Li ,J.J. Zheng, W. Lawanwisut, et al(2007).., Concrete delimitation caused by steel reinforcement corrosion ,J. Mater .Civ.Eng.19(7) 591–600
- [11] Y. Auyeung, P. Balguru, L . Chung (2000), Bond behavior of corroded reinforcement bars, ACI Struct.J.97 (2) 214–220
- [04] YiyanLu, Wenshui Tang, Shan Li, Mingyong Tang (2018), Effect of Simultaneous Fatigue Loading and Corrosion on The Behavior of Reinforced Beams ,Const .Build. Mater .18185–93
- [13] B. Pradhan y B. Bhattacharjee (2009), Performance evaluation of rebar in chloride contaminated concrete by corrosion rate, Construction and Building materials, vol .23 n°6,pp .2346,
- [14] G. Roa–Rodriguez, W. Aperador Ya. Delgado (2013), Calculation of Chloride Penetration Profile in Concrete Structures” , International Journal of electrochemical Science ,vol .8,n°1,pp .5002–5035.

- [15].D. Breysse ,J.P. Balayssac (2018)., Non-Destructive Testing and Assessment of Reinforced Concrete and Masonry Structures , Const. Build. Mater.1821-9,
- [16] A. Zaki , Hwa Kian Chai , D.G. Aggelis and N.Alver (2015), Non- Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete : A Review and Capability of Acoustic Emission Technique.
- [17] Z. Grdic, G. Toplicic Curcic, N. RISTIC, D. Grdic (2013) , Nondestructive methods for determination of reinforcement steel corrosion in concrete, ZASTITA MATERIJALA 54 broj 3.
- [18] J. Ozbolt. F.Orsanié. G. Balabanié. M. Kuster (2012), Modeling damage in concrete caused by corrosion of reinforcement : coupled 3D FE model.
- [19] H.Dong ,Y.Zhou, and N. Zhuang (2020), Study on Corrosion Characteristics of Concrete-Filled CFRP-Steel Tube Piles under Hygrothermal Environment, Advances in Materials Science and Engineering.
- [20] F.Bernal Castillo , G.Roa-Rodriguez, C.Cabrera , N.Sierra-Melo, W. Aperado (2015), Determination of the probability and rate of corrosion on reinforced concrete specimens through a remote corrosion monitoring system , Tecciencia.
- [21] Apostolopoulos CA, Papadakis VG (2008) Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. Constr Build Mater 22:2316-2324
- [22] Cairns J, Plizzari GA, Du Y, Law DW, Franzoni C (2005) Mechanical properties of corrosion -damaged reinforcement . ACI Mater J 102:256-264
- [23] Ohtsu, M. and Tomoda, Y,(2008); Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by AE, ACI Mater .J. 105,194-199.
- [24] M. Ohtsu, K. Mori, Y. Kawasaki (2011), Corrosion Process and Mechanism of Corrosion- Induced Cracks in Reinforced Concrete identified by AE Analysis, Strain Volume 47, Issue Supplement s2, pages 179-186.
- [25] Melchers, R. E ; and Li,C. Q; Phenomenological Modeling of Reinforcement Corrosion In Marine Environments, ACI Material Journal ,V. 103, No . 1, Jan -Feb .(2006) ,pp. 25-32.
- [26] Y. Pan, G. W u,X, Cheng et al (2015); Galvanic corrosion behavior of carbon fiber reinforced polymer/magnesium alloys coupling”, Corrosion Science,vol.98,pp.672-677.
- [27] J. Zhang and C. Wu (2009), Corrosion protection behavior of AZ31magesium alloy with cathodic electrophoretic coating pretreated by silane, Progress in Organic Coating, vol.66, no.4, pp,387-392,

- [28] ASTM99. ASTM C876. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Norme ASTM, 1991, réapprouvés en 1999.
- [29] Sail L. (2013), Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton armé ; Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, soutenue en
- [30] Rosenberg A, Hansson C, Andrade C (1989), Mechanism of corrosion of steel in concrete, *Materials Science of Concrete*, American Ceramic Society, 1285-314.
- [31] Sanjeev K.V., Sudhir S.B., Saleem A. (2013). Estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structures, *American J. of Civ. Eng. and Architecture*, 1(5), pp. 92-96.
- [32] M. Torres-Luque, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, M. Sánchez-Silva, J.F. Osmá (2014), Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges, *Construction and Building Materials*, Volume 68, , Pages 68-81,



Conclusion Générale



CONCLUSION GENERALE

En raison de sa grande résistance, de sa durabilité et de son coût, le béton armé a été pendant de nombreuses années le premier choix en tant que matériau de construction. En effet, les ouvrages en béton se caractérisent par une durabilité relativement longue. Cependant, sous l'effet d'attaques mécaniques et chimiques (charges et décharges, fluctuations de température et d'humidité, corrosion des armatures), des défaillances prématurées de ces ouvrages sont souvent observées.

Pour assurer la sécurité, la stabilité et l'aptitude au service des ouvrages de génie civil, il est nécessaire d'en assurer une surveillance continue. Pour effectuer des prévisions quantitatives de la durée de vie des structures de génie civil, il est essentiel de mieux comprendre les mécanismes des différents processus de dégradation et leur cinétique.

C'est dans ce contexte que s'est inscrite cette thèse. En effet, L'objectif principal de cette étude est d'étudier expérimentalement les effets combinés sur un élément en béton et élément en béton armé, des sollicitations dues à l'exposition aux effets hygrothermiques et aux sollicitations mécaniques et aux chlorures. L'objectif secondaire de cette étude est d'illustrer la combinaison d'un essai non destructif (NDT) et un essai destructif (DT) pour l'analyse et le suivi de la dégradation de cet élément.

Dans un premier temps nous avons analysé expérimentalement le comportement des colonnes courtes prismatiques en béton sous l'effet combiné d'un chargement mécanique qui consiste en un chargement-déchargement en compression simple et une exposition à un effet hygrothermique qui consiste en une immersion dans de l'eau durant 24 heures, par la suite évaporation de l'eau en température ambiante durant 24 heures et enfin une cure thermique suivant un cycle de température bien défini.

Afin de détecter les dégradations (dommages) subies par les éprouvettes en béton, nous avons utilisé d'une part les mesures des vitesses de propagation des impulsions (ondes) ultrasoniques

(UPVTesting). D'autre part, nous avons utilisé l'essai de compression simple. En se basant sur les différents résultats expérimentaux obtenus nous avons montré que :

- Pour toutes les éprouvettes étudiées, après n cycles de vieillissement accéléré, nous constatons une atténuation des vitesses de propagation des impulsions ultrasoniques.
- Au début du processus de vieillissement, les vitesses des ondes ultrasoniques diminuent légèrement. Cependant, à la fin du processus cette diminution est plus importante.
- Le processus de vieillissement hygrothermique a un faible effet sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores comparé à l'effet du processus de chargement et/ou à l'effet du processus hygrothermo-mécanique combiné.
- L'effet du rapport d'éclatement sur l'atténuation des vitesses ultrasonores mesurées dans ce travail apparaît légèrement selon les valeurs de h/b considérées. Pour plus de compréhension, il sera intéressant d'étudier les valeurs élevées de ce rapport.
- Au début du processus de vieillissement, les courbes charge-déplacement restent identiques. Au fur et à mesure que le nombre de cycles de vieillissement augmente, la différence entre les courbes devient plus notable.
- Globalement, avec l'augmentation du nombre de cycles de vieillissement, les résultats issus des essais de mesure de la vitesse de propagation de l'impulsion ultrasonique (UPV) concordent bien avec les résultats issus des essais de compression simple.

Enfin comme principale conclusion, nous pouvons dire que la courbe de décroissance de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est capable de refléter le processus d'évolution de la dégradation de nos éprouvettes étudiés.

Dans un second temps, nous avons étudié les effets combinés des sollicitations dues à l'exposition aux effets hygrothermiques, aux sollicitations mécaniques et à l'effet des chlorures. Afin de détecter les dégradations subies par les éprouvettes en béton armé, nous avons utilisé la combinaison de plusieurs essais de caractérisation à savoir :

- La mesure du potentiel de corrosion.
- L'Analyse par DRX
- L'Analyse par LIBS
- L'Analyse MEB
- L'essai de carbonatation
- L'inspection visuelle

En se basant sur les différents résultats expérimentaux obtenus et sur les nous avons montré que :

- Pour toutes les éprouvettes étudiées, après n cycles de vieillissement accéléré, nous constatons une diminution du potentiel de corrosion
- Au début du processus de vieillissement, cette diminution est légère. Cependant, à la fin du processus cette diminution est plus importante.
- La dégradation la plus importante a été obtenue dans le cas de l'immersion des éprouvettes dans une solution chlorures. La dégradation obtenu dans le cas des éprouvettes soumises à un effet combiné hygrothermo-mécanique et chlorures est moins importante comparé à celle de l'immersion dans une solution chlorure mais il est plus important comparé aux deux autres conditions d'exposition.
- Les observations visuelles concordent bien avec les résultats obtenus en mesurant le potentiel de corrosion. En effet, d'une part, les mesures du potentiel de demi-cellule après 1110 jours sont inférieures à la valeur limite fixée par la norme à savoir -350 mV. D'autre part, après 1110 jours, aucun signe de corrosion n'est observé dans le cas des barres d'acier noyées dans les échantillons de béton exposés à l'air ambiant ce qui correspond à des valeurs mesurées du potentiel supérieures à -200 mV.

L'objectif escompté à travers cette analyse expérimental est certes la compréhension de la dégradation de notre éprouvette. Cependant la finalité est évidemment d'établir sur la base des mesures expérimentales des modèles théoriques qui permettent de simuler dans le temps le comportement de l'élément étudié selon les conditions d'exposition.

Ainsi comme perspective à ce travail, il serait intéressant de reprendre ce travail avec un dispositif expérimental plus performant à savoir :

- D'une part sur le plan de l'application des sollicitations en faisant appel à une chambre climatique et une machine d'essais cycliques.
- D'autre part, l'utilisation d'un dispositif de mesure plus performant et continu dans le temps. Ceci permettra de caler des modèles théoriques qui décrivent le comportement de notre élément dans le temps et en fonction des conditions d'exposition.



Annexes

ANNEXE 1

FICHE TECHNIQUE DU CIMENT UTILISÉ

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 	
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



 A member of LafargeHolcim

Conditionnement: Sac et vrac

LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

 **LAFARGE**
لافارج

ANNEXE 2

RESULTATS DE LA MESURE DES VITESSES ULTRANSONIQUES

LONGITUDINAL	SEMI-DIRECT	TRANSVERSAL		
4836	5104	5185	5185	5182
4845	5104	5180	5181	5182
4827	5103	5192	5190	5193
4811	5105	5000	5035	5072
4786	5052	5072	5036	5185
4786	4915	5109	5036	5147
4719	5431	4908	4910	4908
4719	5423	4900	4910	4908
4719	5439	4912	4912	4912
4712	4849	4828	4861	5000
4714	5017	4828	4828	4861
4722	5034	4827	5036	5224
4603	4897	4895	4895	4901
4602	4897	4896	4895	4876
4606	4897	4895	4895	4895
4568	5000	5109	5072	5036
4598	5620	4895	4895	5000
4568	5613	5036	4895	5072
4714	5509	4861	4861	4861
4720	5504	4854	4854	4852
4708	5510	4868	4868	4868
4738	5942	5303	4965	5312
4667	5754	5285	5036	5303
4738	5900	5185	5185	5036
4545	5029	4895	4897	4894
4545	5070	4892	4896	4890
4542	4965	4890	4892	4892
4494	5023	4895	4873	4913
4583	5045	4892	4876	4920
4560	5002	4890	4869	4910
4724	5234	4860	4860	4862
4724	5231	4854	4854	4854
4725	5233	4862	4862	4861
4754	4833	4930	4730	4828
4714	4948	4895	4828	4828
4706	5123	4861	4861	4930
4687	5052	4918	4918	4920
4688	5054	4910	4918	4919
4683	5050	4919	4918	4919
4605	4882	5000	4895	5072
4620	5052	4861	4861	4895
4667	4785	4895	4895	5036