

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par : Houmeur Mouaadh Et-Tayib

Lammari Yacine

**Thème : Pathologie des bétons des stations d'épuration
sous l'influence des eaux agressives**

Sous la direction de : Mr Boudjehem hocine

2018

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Listes des figures.

Listes des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I: Les stations d'épuration

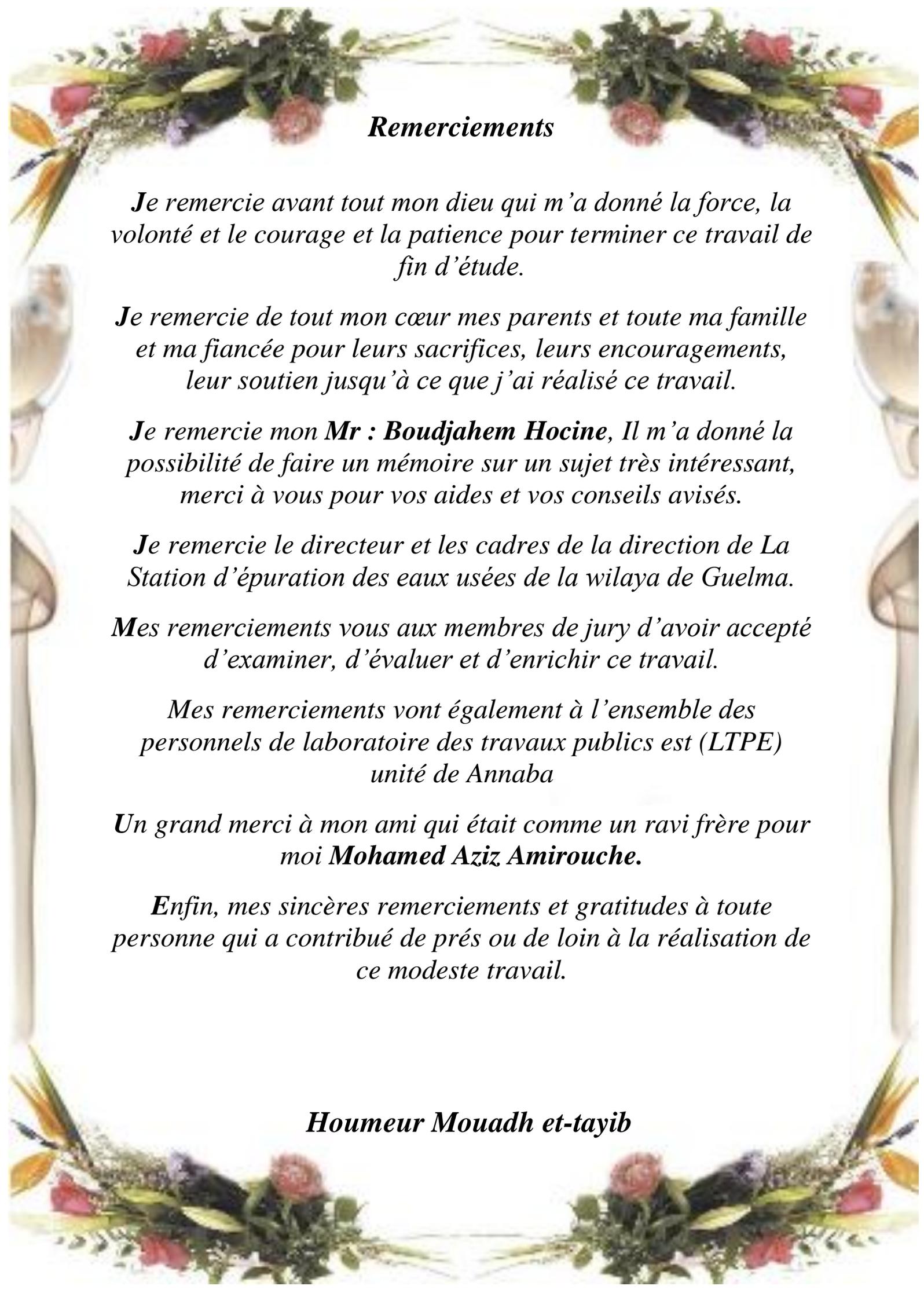
I.1. Introduction.....	5
I.1.1. Emplacement et accès.....	7
I.1.2. Caractéristique et Nature des effluents.....	7
I.1.3. Nature du réseau.....	7
I.1.4. Nature du traitement des eaux Usées avant l'emplacement de la station.....	7
I.1.5. Charges Hydrauliques et Polluantes	7
I.2. L'épuration des eaux usées.....	8
I.2.1. Principe de l'épuration.....	8
I.2.2. Les eaux usées.....	8
I.2.3. L'épuration.....	9
I.2.4. Synthèse des étapes de l'épuration.....	9
I.2.5. Processus d'épuration.....	10
1. Le prétraitement.....	10
2. Dessablage – Déshuilage.....	11
3. Traitement primaire.....	12
4. Traitement secondaire.....	13
4.1. Un traitement biologique.....	14
4.2. Elimination de carbone.....	14
5. La clarification.....	18

I.3.1. Méthode de réalisation.....	25
1. Réalisation du radier.....	25
2. Réalisation des voiles.....	26
Conclusion.....	28
CHAPITRE II: Pathologie de béton armé	
II.1. Introduction.....	29
II.2. Dégradations mécaniques.....	30
II.3. Dégradations Chimiques.....	31
II.3.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)	31
II.3.2. Attaques Sulfatiques.....	32
II.3.3. Attaques Acides.....	33
II.3.4. Lixiviation.....	34
II.4. Dégradations Physiques.....	35
II.4.1 Cycles de gel-dégel.....	35
II.4.2. Sels de déverglaçage.....	36
II.5. Les pathologies à risque élevé.....	37
A. La carbonatation.....	37
2) Les mécanismes de la carbonatation.....	37
3) Conséquences de la carbonatation.....	38
4) Les causes de la carbonatation.....	41
5) Paramètres influent sur la cinétique de carbonatation.....	42
B. La corrosion.....	44
1) Aspect physico-chimique de la corrosion.....	44
2) Phases de la corrosion.....	44
3) Formes de la corrosion.....	45
4) Facteurs influençant la corrosion des armatures.....	46
5) Humidité relative.....	46
6) Enrobage.....	46
7) Température.....	46

8) Teneur en chlorure.....	47
9) Oxygène.....	47
10) Agents agressifs autres que les chlorures.....	47
11) Réactions de corrosion des aciers dans le béton.....	47
C. Fissure.....	52
D. lézardes.....	54
E. Retrait.....	55
II.6. Pathologies à risque moyen.....	57
1. Faiençage.....	57
2. Epaufrure.....	58
3. Lichen.....	58
4. Le ressuage.....	59
4.1. Type de ressuage :	59
4.2. Les raisons du ressuage des bétons.....	60
4.3. Dispositif de mesure du ressuage.....	61
Conclusion.....	61
CHAPITRE III: Diagnostic des pathologie	
V.1. Introduction.....	62
V.2. Evaluation de l'état d'un ouvrage en contact avec l'eau.....	63
V.2.1. Pourquoi un diagnostic ?	63
V.2.2. Comment répondre à la demande du client ?	63
V.2.3. Réalisation d'un diagnostic.....	64
V.2.4. Types d'investigation.....	65
4.1. Investigations non destructives.....	65
A. Relevé visuel.....	66
B. scléromètre.....	66
C. L'auscultation sonique.....	67
D. Le radar.....	70
4.2. Investigations destructives.....	71

A. Carottage d'éléments en béton armé.....	72
B. Prélèvements d'aciers.....	73
C. Test à la carbonatation.....	74
Conclusion.....	76
CHAPITRE IV: Les méthodes de réhabilitation	
IV.1. Introduction.....	77
IV.2. Réparation des ouvrages en béton armé.....	77
IV.2.1. Réparation des surfaces.....	77
1. Dégagement des armatures.....	77
2. Le ragréage.....	78
A. Mode opératoire.....	78
B. Caractéristiques des matériaux.....	79
3. Le béton projeté.....	80
A. Technique de projection.....	80
B. Mode opératoire.....	81
C. Matériaux utilisés.....	82
D. Etude comparative (Ragréage avec passivant v/s Béton projeté).....	82
4. Tissus de fibres de carbone.....	83
A. Matériaux.....	83
B. Mode opératoire.....	84
IV.2.2. Conclusion	85
IV.3. Protection des ouvrages en béton armé.....	86
IV.3.1. Protection des surfaces.....	87
1. Imprégnation.....	87
2. Inhibiteurs de corrosion.....	88
3. Les Revêtements.....	89
4. Membrane élastomères.....	89
IV.3.2. Protection par méthodes électrochimiques.....	91

1. Protection Cathodique.....	92
2. Déchloruration.....	93
3. Ré-Alcalinisation.....	94
IV.4. En Résumé.....	96
Conclusion.....	97
CHAPITRE V:	
V.1.Introduction.....	98
V.2. Notion de durabilité.....	98
V.3. Morphologie de la microstructure du béton.....	99
V.3.1. Hydratation du ciment.....	99
V.3.2. Nature de l'eau dans le béton.....	100
V.3.3. Structure poreuse.....	101
V.4. Mécanisme de dégradation du béton.....	102
V.4.1. Divers agents agressifs.....	102
V.4.2. Modes d'action des agents agressifs.....	103
V.5. Critères généraux de la durabilité du béton.....	103
V.5.1. Rapport eau/ciment (E/C)	103
V.5.2. Nature et dosage de ciment.....	104
V.5.3. Les ajouts minéraux.....	104
V.5.4. Zone d'interface de la pate de ciment et granulats.....	105
V.5.5. Durée de murissement.....	106
V.5.6. Effet de la température sur le béton.....	107
Conclusion.....	107
Conclusion générale.....	108
Abréviation.....	109
Bibliographie et Référence.....	110



Remerciements

Je remercie avant tout mon dieu qui m'a donné la force, la volonté et le courage et la patience pour terminer ce travail de fin d'étude.

Je remercie de tout mon cœur mes parents et toute ma famille et ma fiancée pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leur soutien jusqu'à ce que j'ai réalisé ce travail.

*Je remercie mon **Mr : Boudjahem Hocine**, Il m'a donné la possibilité de faire un mémoire sur un sujet très intéressant, merci à vous pour vos aides et vos conseils avisés.*

Je remercie le directeur et les cadres de la direction de La Station d'épuration des eaux usées de la wilaya de Guelma.

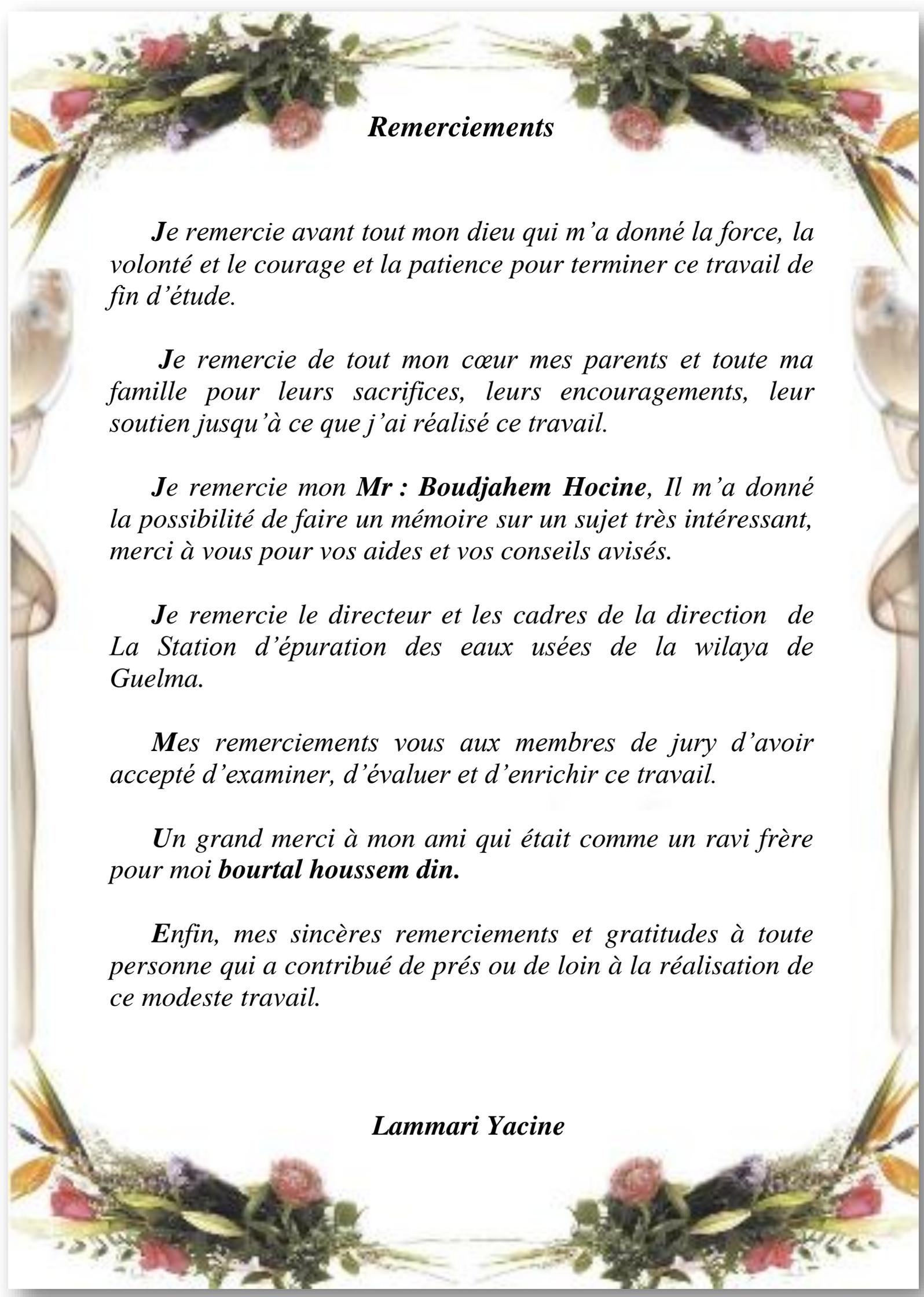
Mes remerciements vous aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnels de laboratoire des travaux publics est (LTPE) unité de Annaba

*Un grand merci à mon ami qui était comme un ravi frère pour moi **Mohamed Aziz Amirouche**.*

Enfin, mes sincères remerciements et gratitudes à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Houmeur Mouadh et-tayib



Remerciements

Je remercie avant tout mon dieu qui m'a donné la force, la volonté et le courage et la patience pour terminer ce travail de fin d'étude.

Je remercie de tout mon cœur mes parents et toute ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leur soutien jusqu'à ce que j'ai réalisé ce travail.

*Je remercie mon **Mr : Boudjahem Hocine**, Il m'a donné la possibilité de faire un mémoire sur un sujet très intéressant, merci à vous pour vos aides et vos conseils avisés.*

Je remercie le directeur et les cadres de la direction de La Station d'épuration des eaux usées de la wilaya de Guelma.

Mes remerciements vous aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.

*Un grand merci à mon ami qui était comme un ravi frère pour moi **bourtal houssem din**.*

Enfin, mes sincères remerciements et gratitudes à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Lammari Yacine



Dédicaces

*À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et
Source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour
Me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi
Mon père.*

*À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de
Mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à
mes frères Haroun et Wail et ma chère sœur Zayneb,
et ma fiancée Nessrine ,Je dédie ce Travail dont le grand
plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides
et encouragements.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
Toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon
Chemin d'études supérieures, mes aimables amis et collègues d'étude.*

Houmeur Mouaadh Et-tayib



Dédicaces

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et
Source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour
Me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi
Mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de
Mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à
Tous mes frères et mes sœurs, mes nièces Younes et Mohamed, et mes
neveux Adam,
Youssef, je dédie ce Travail dont le grand plaisir leurs revient en premier
lieu pour
Leurs conseils, aides, et encouragements.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
Toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon
Chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude,
et frères de cœur.*

Lammari Yacine

Résumé

Résumé

Plusieurs dégradations ont été constatées sur la station d'épuration de la ville de Guelma, à cause de la qualité du béton utilisées, qui n'arrivent pas à résister aux agents chimiques et physique agressifs du milieu là où ils sont implantés ce qui touche directement à leur durabilité.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la pathologie le diagnostic et la durabilité de la station d'épuration sous l'effet des agents agressifs. Pour réduire ces dépenses en décrivant les mécanismes qui entraînent les dégradations ainsi que d'établir des recommandations préventives et curatives pour l'ouvrage existant.

Mots clé : dégradations, station d'épuration, pathologie, diagnostic, durabilité.

ملخص

لوحظت العديد من التدهورات في محطة معالجة مياه الصرف الصحي لمدينة قالمة، وذلك بسبب جودة الخرسانة المستخدمة، والتي لا يمكن أن تصمد أمام العوامل الكيميائية والفيزيائية العدوانية للبيئة التي توجد فيها، والتي تؤثر بشكل مباشر على متانتها.

الهدف من هذا البحث هو دراسة علم الأمراض والتشخيص والمتانة لمحطة المعالجة تحت تأثير العوامل العدوانية. لتقليل هذه النفقات عن طريق وصف الآليات التي تؤدي إلى الانحطاط وكذلك وضع توصيات وقائية وعلاجية للعمل الحالي.

الكلمات المفتاحية: الانحلال، محطة المعالجة، علم الأمراض، التشخيص، المتانة.

summary

Several degradations were noted on the wastewater treatment plant of the city of Guelma, because of the quality of the concrete used, which can not withstand the aggressive chemical and physical agents of the environment where they are located, which directly affects to their sustainability.

The objective of this research is to study the pathology, diagnosis and durability of the treatment plant under the effect of aggressive agents. To reduce these expenses by describing the mechanisms that lead to the degradations as well as to establish preventive and curative recommendations for the existing work.

Key words: degradations, treatment plant, pathology, diagnosis, sustainability.

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

N°	Figures	Pages
I-01	vue 3D de SETP	5
I-02	vue en plan de STEP	6
I-03	Etapes de l'épuration.	9
I-04	Etapes de l'épuration.	10
I-05	dégrilleurs.	11
I-06	Dessablage – Déshuilage.	11
I-07	décanteur primaire	12
I-08	les micro-organismes existants au niveau des 02 bassins biologiques.	13
I-09	Bassin d'aération.	15
I-10	bassin d'aérations fines bulles	16
I-11	Coupe sur bassin d'aération « fines bulles ».	17
I-12	Bassin aéré mécaniquement par des turbines de surfaces.	17
I-13	Coupe sur bassin d'aération aéré mécaniquement.	17
I-14	Lits de séchage.	19
I-15	Bassin de désinfection.	19
I-16	le clarificateur.	20
I-17	Principe de fonctionnement d'un clarificateur raclé.	21
I-18	pont racleur.	21
I-19	réalisation du radier en pente (déconseillée)	22
I-20	Réalisation de la forme de pente par recharge sur radier plat (conseillé).	22
I-21	Clarificateur à pont suceur.	23
I-22	Coupe type sur silo à boues.	24
I-23	Lits de séchage.	24
I-24	Préparation au coulage d'un radier	25
I-25	Préparation au coulage d'un radier	26
I-26	Armatures de voile posées à l'avancement maintenues par système réglable.	26

Liste des figures

I-27	joint de reprise en attente dans les cages d'armatures	27
I-28	Joint de reprise après coulage d'une longueur	28
II-1	dégradations de béton armé.	30
II-2	réactions alcalis-granulats.	32
II-3	attaques sulfatiques.	33
II-4	Attaques acides.	33
II-5	lixiviation.	34
II-6	dégradation due aux sels de déverglaçage.	36
II-7	phénomène de la carbonatation.	38
II-8	schéma de la carbonatation.	40
II-9	Les phase de carbonatation.	42
II-10	Progression du front de carbonatation.	43
II-11	corrosion bar les temps.	45
II-12	les états de corrosion.	49
II-13	corrosion de l'armature.	50
II-14	Processus de corrosion.	51
II-15	Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.	52
II-16	Fissure de béton	54
II-17	lézardes.	55
II-18	phénomène de faïençage.	57
II-19	Epaufrure dans construction.	58
II-20	Lichen sur la structure.	58
II-21	ressuage de béton.	60
III-1	Choix des investigations	64
III-2	Scléromètre	67
III-3	Le radar	71
III-4	Carottage	73
III-5	Prélèvement d'aciers	74

Liste des figures

III-6	Graphique enrobage-carbonatation	75
III-7	Carbonatation sur carotte	76
IV-1	Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101	78
IV-2	Gauche à droite; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche	79
IV-3	projection par voie humide	80
IV-4	projection par voie sèche	81
IV-5	Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone	85
IV-6	Résumé des méthodes de protections	86
IV-7	Catégories des inhibiteurs de corrosion	88
IV-8	exemple de revêtement des surfaces	90
IV-9	application de membrane élastomère	91
IV-10	La protection cathodique au moyen d'anodes sacrificielles ou à courant imposé	93
IV-11	Avant & Après	95
V-1	Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté	100
V-2	Modèle de Feldman et Sereda, revue par sierra 1982	101
V-3	Représentation schématique d'un solide poreux.	102
V-4	Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C.	104
V-5	Corrélation approximative entre la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment et leur résistance mécanique.	105
V-6	Influence d'E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons.	106
V-7	Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment.	106

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

N°	Tableaux	Pages
I-1	<i>charge polluante.</i>	7
I-2	<i>Quantité de chlore a Dosé.</i>	20
IV-1	<i>Tableau comparatif (Ragréage v/s Béton projeté)</i>	83
IV-2	<i>Comparatif de la fibre de carbone avec l'acier</i>	83
IV-3	<i>Différences principales entre méthodes d'entretien électrochimiques</i>	96
IV-4	<i>Etude comparatives des méthodes de protection</i>	96

INTRODUCTION GENERALE

Les stations d'épuration représentent un cas à particulier des « réservoirs », de par leurs fonctions spécifiques.

Une station d'épuration est destinée à recevoir des eaux usées, ce terme englobe, principalement, les eaux ménagères et les eaux provenant de l'industrie, afin d'en assurer le traitement dans le but de les rejeter après leur épuration, dans un cours d'eau ou à la mer.

Il est donc impératif que ces rejets n'engendrent pas de nuisances et ne soient pas polluants, d'où la nécessité d'un traitement efficace et sûr en stations d'épuration.

Les principales pollutions à traiter en stations d'épuration sont :

Les pollutions organiques : rejets de matières organiques provenant des eaux domestiques et de l'industrie (notamment industrie alimentaire, chimiques), etc...

Les pollutions par les rejets d'azote, nitrate, de phosphore, etc... : proviennent des activités industrielles de fabrication d'engrais, des produits soufrés, d'activités agricoles, etc....

Les pollutions bactériologiques : proviennent des eaux usées, des industries agro-alimentaires diverses, des abattoirs, ect...

Les pollutions domestiques : de par les rejets ménagers divers et dangereux (lessives, produits d'origines médicales, peintures, ect... « dans ce domaine, on trouve de tout » !!!).

Les pollutions agricoles : par les engrais, les pesticides, les rejets de l'élevage, etc.

Les pollutions urbaines : induites par tout ce qui est collecté dans les réseaux d'égout des villes, etc.

Les pollutions toxiques : tels que produits chimiques, non ou difficilement dégradables, les métaux lourds, les hydrocarbures, les rejets de certaines activités industrielles, etc.

Les pollutions diverses : thermiques (rejets d'eaux chaudes des centrales nucléaires), celles provoquées par matériaux radio-actifs, etc.

Enfin toutes les pollutions qui vont entraîner une atteinte, un déséquilibre ou une disparition, à court ou à long terme de l'écho système naturel.

Le rôle des stations d'épuration est donc particulièrement important face aux différents problèmes de pollution.

L'agressivité des eaux usées dépend de la nature des rejets, de leurs concentrations, de leurs pH, de leurs températures, de leurs teneurs en oxygène, etc.

On sait combien il est important de bien « sécuriser » ces Ouvrages sensibles, ceci par des revêtements spéciaux bien adaptés.

Les Experts en pathologies des bétons sont souvent sollicités pour définir les produits qu'il convient de mettre en œuvre afin de protéger les bétons dans cet environnement très agressif et spécifique, qu'impose le traitement des eaux usées.

Leur rôle est de vous conseiller et vous aider dans le choix des revêtements de protection des supports, qui seront définis en fonction des agressions auxquelles devront résister les ouvrages à protéger, à étancher ou destinés à être réparés.

Les stations d'épuration sont des Ouvrages contenant de l'eau éventuellement chargée de matières dissoutes ou en suspension et faisant partie des stations de traitement d'eau avant rejet.

Elles sont principalement constituées de plusieurs Ouvrages ayant chacun une fonction définie, et dont l'appellation peut être par exemple :

bassin ou fosse de relevage, bassin d'aération, bassin de mélange, bassin tampon, débourbeur, cuve de contact (chlore, ozone), décanteur, dégrilleur, déssableur, déshuileur, digesteur, clarificateur, épaisseur, filtre, ouvrage de stockage, bacs de stockage des boues, ect.....

Le parcours de l'eau usée dans une station d'épuration est assez complexe et comprend de nombreuses étapes utilisant chacune un Ouvrage spécifique.

Les principales phases type de l'épuration sont : le prétraitement couvert, afin d'éviter les nuisances olfactives, qui comporte le dégrillage, le dessablage et le dégraissage.

Ensuite, ces eaux vont subir des traitements biologiques et chimiques, puis seront clarifiées afin de diminuer la quantité d'eau contenue dans les boues activées.

Après traitements et contrôle, ces eaux épurées pourront être rejetées en cours d'eau ou à la mer et les boues résiduelles seront traitées.

Le traitement des boues comprend des phases d'extraction, d'épaississement et de centrifugation dans le but de les assécher.

L'opération suivante sera souvent un chaulage et ensuite un stockage avant une utilisation en épandage agricole.

Mais d'autre type de recyclage des boues peuvent être mis en œuvre de façon à utiliser ces rejets particuliers, ou tout simplement pour les détruire.

Aujourd'hui, environ 60% des boues sont recyclées par la filière agricole, 25% sont dirigées vers des décharges contrôlées et environ 15% sont incinérées.

Tous les rejets des stations d'épuration et des collecteurs sont contrôlés par une procédure d'auto surveillance destinée au système d'assainissement dans son ensemble.

Cela induit un processus de mesures qui doivent être effectuées par les personnes en charge du bon fonctionnement de la station d'épuration.

Ces mesures vont déterminer l'efficacité du système d'épuration en relation avec les normes concernant les rejets et ainsi détecter toutes anomalies de fonctionnement.

Les mesures effectuées intègrent plusieurs valeurs représentatives du bon fonctionnement, des « STEP », on citera quelques termes, tels que :

DBO5 : exprime la Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours et c'est de plus un bon indicateur de la pollution organique des eaux usées.

La DBO5 : s'exprime en milligramme d'oxygène par litre (mgO₂/l) et représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour décomposer dans des conditions d'incubation données et sur 5 jours, les matières organiques et autres qui sont potentiellement métabolisables.

DCO : exprime la Demande Chimique en Oxygène, cela représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder à partir d'un oxydant chimique puissant et dans des conditions définies, les matières réductrices contenues dans l'eau, en particulier les matières organiques non biodégradables en 5 jours.

Le rapport DCO/DBO donne une bonne indication sur la biodégradabilité d'une eau usée. Ce rapport est généralement proche de 2,5 pour une eau usée d'origine domestique.

MES : exprime les Matières en Suspension qui représente la fraction non dissoute de la pollution dans laquelle on distingue la partie minérale et la partie organique. La quantité de MES s'exprime en milligrammes par litre (mg/l).

E.H. : c'est l'équivalent habitant qui représente la charge polluante moyenne journalière par habitant contenue dans les eaux usées. Cette notion d'E.H. sert aussi à déterminer la capacité de traitement d'une station d'épuration urbaine et à évaluer les quantités de boues résiduelles à recycler ou à éliminer. Selon la directive Européenne du 21 mai 1991, on considère qu'1 E.H. correspond à un rejet de 180 litres d'effluent caractérisé par une DBO5 de 60 gr.

Mais selon le type de « STEP », on quantifie aussi d'autres rejets tels :

L'azote, l'azote-ammoniacal, les nitrates, les nitrites, le phosphore, le carbone, le soufre, etc. et les effluents divers, ainsi que les boues d'épuration en général.

La durabilité des ouvrages en béton armé est un facteur très important dans le domaine de génie civil pour les constructions civiles ou industrielles, par ce que les altérations du béton sont variées ; elles atteignent soit la matrice cimentaire soient les armatures, et par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : la mise en œuvre et la résistance mécanique du béton, les fissures formées sous l'effet des contraintes extérieures qui s'appliquent à l'ouvrage, l'effet des agents agressifs du milieu extérieur.

La dégradation qui a été constatée au niveau des stations d'épuration nécessite la définition du taux de dégradation et le mécanisme de cette dernière notamment l'effet du gaz H₂S qui semble le plus dangereux vis-à-vis des stations d'épuration.

Afin de cerner le problème de durabilité des stations d'épuration, un programme de travail a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de master au sein du département de génie civil et d'hydraulique à l'université 8 mai 1945 de Guelma.

La présente étude se fait selon ces chapitres ci-après :

Après l'introduction générale, le premier chapitre présente une fiche technique des stations d'épuration on particulier la station d'épuration du Guelma

Le problème des pathologies du béton armé sont présentées au deuxième chapitre. Le troisième chapitre a été consacré au diagnostic. Dans le quatrième on présente Les méthodes de réhabilitation et le dernier chapitre, on présente la durabilité du béton armé. Et en fin nous terminerons cette recherche par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I : Les stations d'épuration

I.1. Introduction

La Station d'épuration des eaux usées de la wilaya de Guelma est fonctionnelle depuis le 28 Février 2008.



Figure I-1 : vue 3D de SETP. [1]

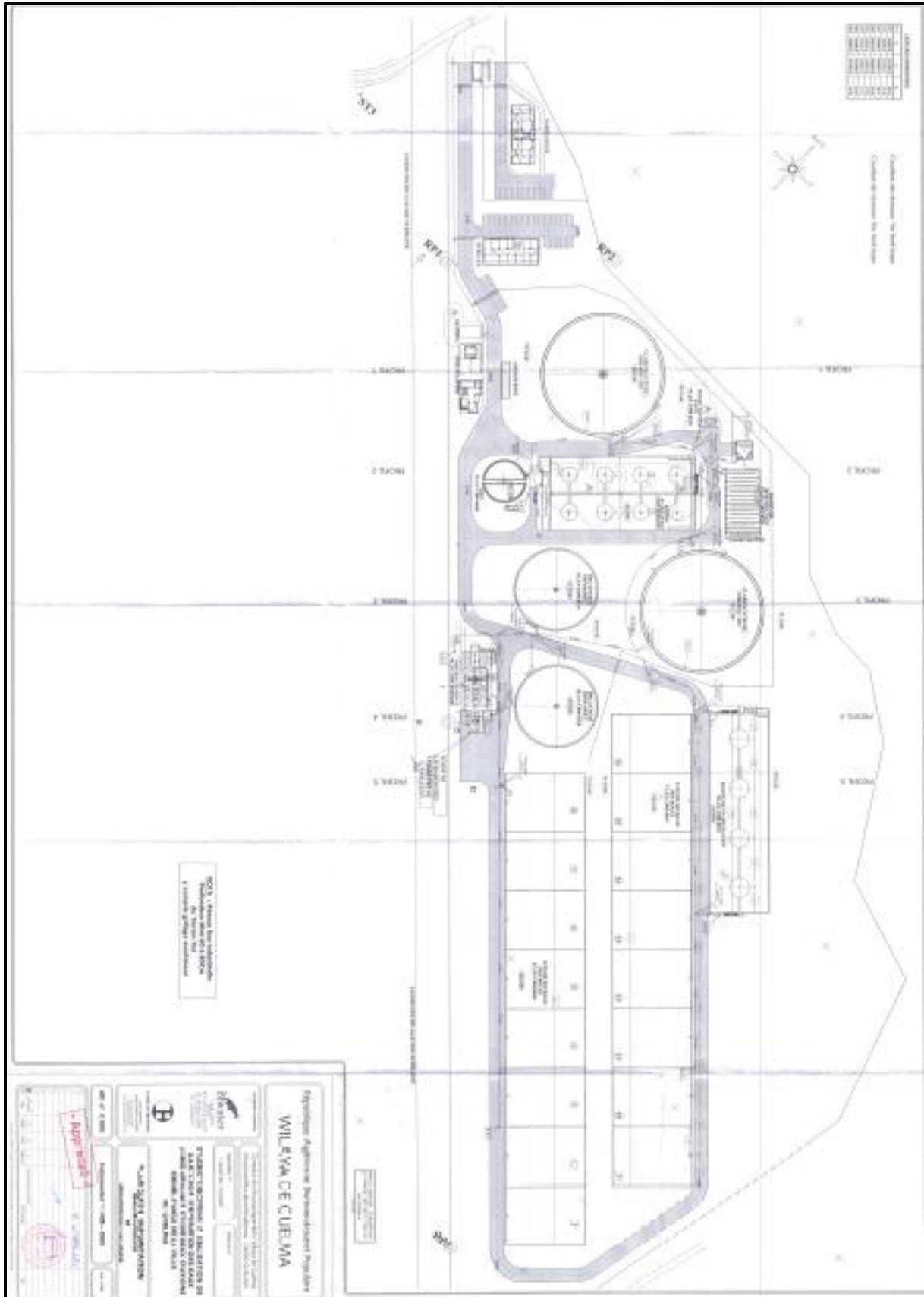


Figure I-2 : vue en plan de STEP. [1]

I.1.1. Emplacement et accès

La station est implantée sur un terrain agricole de 7.8 Hectares à (01) kilomètre environ au nord de la ville de Guelma, sur le flanc droit de la vallée développée par oued SEYBOUSE, et sans habitations existantes à la proximité.

Elle est alimentée par 02 conduites de refoulement, l'une en diamètre 700mm en provenance du premier poste de refoulement SP1 (OUED MAIZ) avec un débit de 1575m³ /h, l'autre en diamètre 500mm en provenance du second poste de refoulement SP2 (OUED SKHOUNE) son débit est de 1125m³/h. et l'emplacement de ces 02 postes était également pris en considération. (STEP Guelma, 2003). [1]

I.1.2. Caractéristique et Nature des effluents

La station est alimentée par des effluents d'origine domestique (à hauteur de 199086 Equivalent-Habitants) en 2010.

I.1.3. Nature du réseau

Les eaux Usées domestiques de la ville de Guelma sont collectées gravitairement sur 02 bassins versant par un ensemble de réseaux d'assainissement existant. Les 02 tronçons gravitaires rejoignent chacun le point bas (ou il y'a les 02 poste de refoulement).

Le réseau d'assainissement est du type unitaire (c'est-à-dire ; englobe tous en même temps; les égouts, les rejets industriels, individuels.....etc.).(STEP Guelma, 2003). [1]

I.1.4. Nature du traitement des eaux Usées avant l'emplacement de la Station

Les effluents sont collectés par le réseau d'assainissement existant, mais ne subissaient pas de traitement particulier.

I.1.5. Charges Hydrauliques et Polluantes

Les différents nombres de charges à retenir sont (Tab) :

Paramètres	Charge Kg/J	Concentration mg/l
DCO	16000	500
DBO5	10800	338
MES	14000	438

Tableau I-1 : charge polluante. [1]

I.2. L'épuration des eaux usées

Les procédés d'épuration des eaux usées sont nombreux. Par conséquent, les stations d'épuration peuvent être très différentes. Afin de cadrer les études de ce mémoire, la première étape consiste à dresser une liste des différents procédés d'épuration adaptés aux petites collectivités. Nous fournirons par la suite les principes de fonctionnement et nous identifierons les ouvrages nécessaires au processus d'épuration.

I.2.1. Principe de l'épuration

Les eaux usées ou eaux résiduaires urbaines sont collectées par des réseaux d'assainissement qui les acheminent vers les stations de traitement. Les eaux usées contiennent de nombreux polluants. Elles subissent alors différents traitements ayant pour objectif la dépollution partielle du liquide.

I.2.2. Les eaux usées

Nous distinguons trois grandes catégories d'eaux usées suivant leur provenance. Tout d'abord :

- **Les eaux pluviales**

Que l'homme pollue de façon indirecte. En effet, l'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air, lui-même chargé de particules polluées. De plus, en ruisselant, elle se mêle aux résidus déposés sur le sol tels que les huiles de vidange, les résidus de métaux lourds ou les résidus de pneus. Selon les cas, les réseaux d'eaux pluviales sont dits « séparatifs » dans le cas d'une collecte dans un système dédié ou bien « unitaires » si elles sont mélangées aux eaux usées.

Ensuite, il convient de distinguer

- **Les eaux industrielles**

Qui sont très différentes d'une industrie à l'autre. Elles peuvent contenir des produits toxiques ou bien des métaux lourds. Dans certains cas elles font l'objet d'un prétraitement par l'industriel avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte.

- **Les eaux domestiques**

Proviennent des différents usages privés et ménagers de l'eau. Elles sont essentiellement polluées par des éléments organiques. Elles sont généralement chargées de graisses, de solvants, de détergents, de matières organiques azotées et de germes fécaux.

I.2.3. L'épuration

L'épuration des eaux usées consiste à éliminer suffisamment de substances polluantes afin que l'eau rejetée dans le milieu naturel ne dégrade pas celui-ci. L'épuration est donc une démarche écologique visant à préserver notre environnement et nos ressources en eau.

I.2.4. Synthèse des étapes de l'épuration

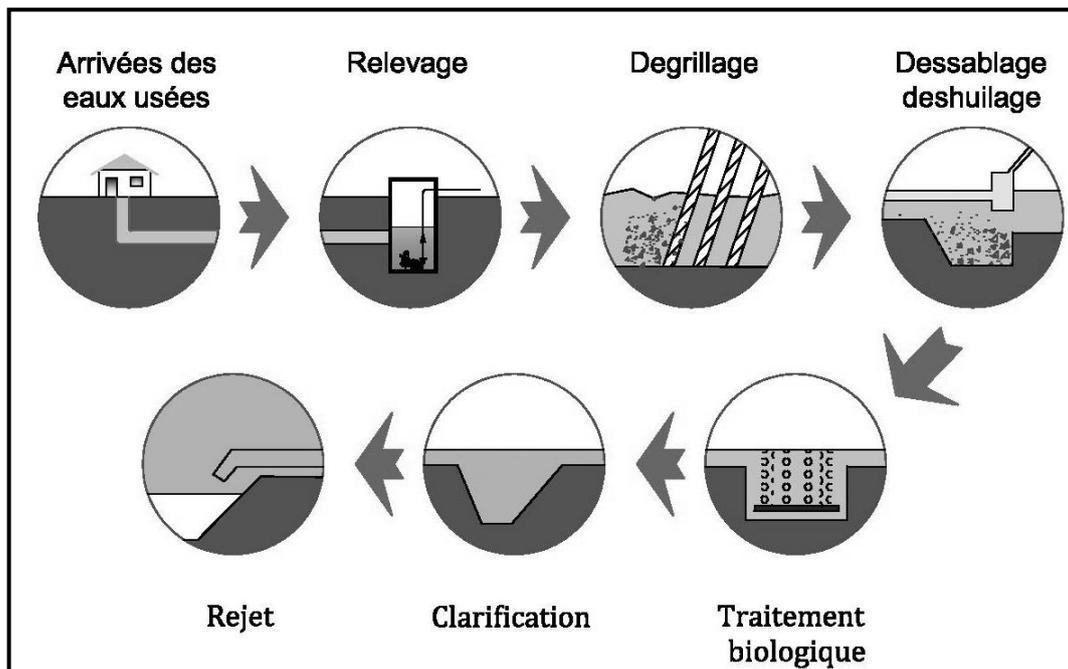


Figure I-3 : Etapes de l'épuration.

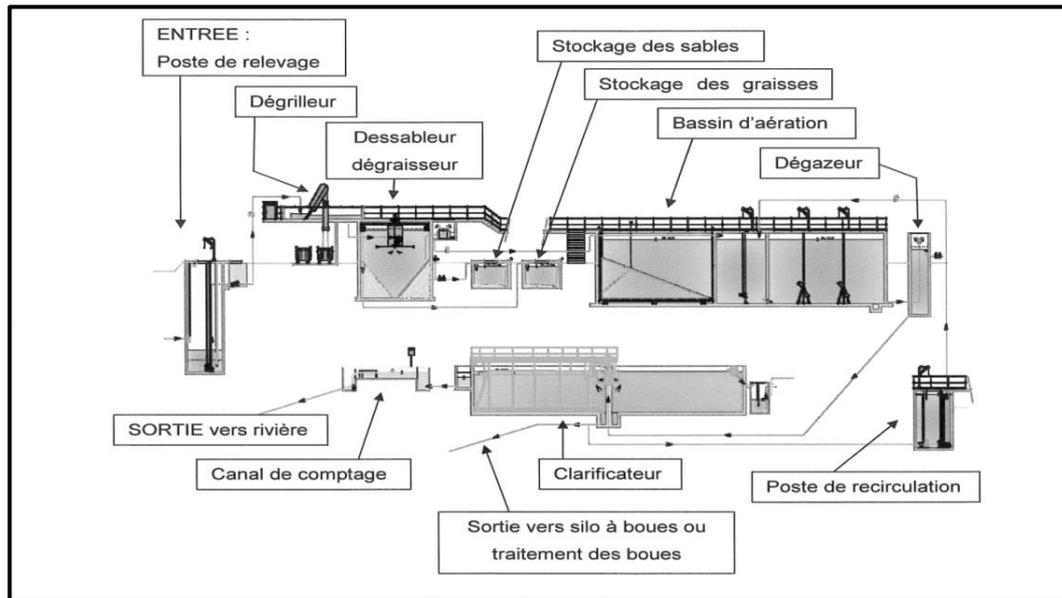


Figure I-4 : Etapes de l'épuration.

I.2.5. Processus d'épuration

Parmi les étapes de la dépollution, trois niveaux principaux sont définis : le prétraitement, le traitement primaire et le traitement secondaire.

1. Le prétraitement

Cette étape consiste à éliminer les éléments les plus grossiers pouvant mettre en péril les équipements de la station ou bien altérer son fonctionnement. Pour éliminer les éléments solides ou particuliers les plus grossiers, l'installation de deux dégrilleurs est nécessaire (dont un manuel) à nettoyage automatique par râpeaux.

Espacement des barreaux : 20mm pour le dégrilleur automatique et 30mm pour la grille fixe

Épaisseur des barreaux : 10mm maximum

La grille sera dimensionnée pour un colmatage maximum de 30 cm

La surface immergée sera égale à 2.49 m^2

L'eau passe au travers d'une grille qui retient les éléments les plus volumineux. Ces déchets sont éliminés avec les ordures ménagères.



Figure I-5 : dégrilleurs.

2. Dessablage – Déshuilage :

Le dessablage débarrasse l'eau usée des sables et graviers par sédimentation.



Figure I-6 : Dessablage – Déshuilage.

- Dessablage : pour but de faire décanter les éléments plus fins ;
- Déshuilage-dégraissage : pour but d'éliminer les huiles et les graisses. S'effectuera dans un ouvrage longitudinal dimensionné pour accepter débit de pointe par temps de pluie de 4.180m^3

L'ouvrage regroupe dans un même ensemble :

-Un dessablage avec une prise automatique des sables par pompage

Ils seront extraits de l'ouvrage de prétraitement, séparés de leur eau par un classificateur, puis stockées dans une benne.

-un déshuilage aéré avec raclage mécanique des graisses et flottant

Les graisses et huiles stockées dans une fosse à graisses avant enlèvement.

Notre cas : Hauteur de l'ouvrage minimum 1.75m

Surface totale minimum : 168m²

Nombre d'ouvrages : 02

Surface d'un bassin : 17.5m

Largeur d'un bassin : 4.80m

L'eau circulant à faible vitesse dans une cuve permet le dépôt du sable dans le fond. La matière est ensuite pompée et évacuée. Enfin, le dégraissage permet l'élimination des graisses par flottation. Une injection d'oxygène en fond de cuve permet au corps gras de remonter vers la surface. Les graisses sont récupérées et stockées avant évacuation.

3. Traitement primaire



Figure I-7 : décanteur primaire. [1]

La décantation primaire classique consiste en une séparation des éléments liquides et des éléments solides sous l'effet de la pesanteur. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" pour former les "boues primaires". Ces dernières

sont récupérées au moyen d'un système de raclage. Ce traitement élimine 30 à 40 % des matières en suspension et réduit d'environ 30 % la DBO et la DCO.

Notre cas : Nombre d'ouvrages : 02

Forme : cylindro-conique

Surface totale minimum : 1.394m²

Surface /Bassin minimum : 697m²

Diamètre d'une bassin minimum : 30.00m

Hauteur d'eau : 3.0m

4. Traitement secondaire

C'est lors de ce traitement que s'élimine l'essentiel des agents polluants dans les eaux usées à savoir l'élimination de la pollution carbonée biodégradable. Il consiste à mettre en contact l'eau usée avec une biomasse épuratrice qui est en fait un écosystème simplifié et sélectionné ne faisant appel qu'à des micro-organismes.

Elle est constituée d'être vivants de petite taille, inférieure au millimètre, microflore de bactéries et microfaune d'animaux, protozoaires.



Figure I-8 : les micro-organismes existants au niveau des 02 bassins biologiques.

Dans le cas des eaux usées urbaines, on favorise le développement de bactéries aérobies, c'est-à-dire, qui utilisent l'oxygène pour se développer.

Il comporte deux étapes principales :

4.1. Un traitement biologique :

Le traitement biologique se déroule au niveau de bassin d'aération et comporte :

4.2. Elimination de carbone

La boue activée est constituée essentiellement de bactéries et de protozoaires, parfois de champignons, de rotifères et de nématodes. Les bactéries y constituent le groupement le plus important, responsable principalement de l'élimination de la pollution d'une part et de la formation des flocons d'autre part. La nature des composés organiques constituant la pollution influe naturellement sur le genre dominant, de même les conditions du milieu : P.H, température, oxygène dissous...

Pour l'élimination du carbone dans les effluents la voie aérobie est utilisée car l'oxygène est associé aux réactions de dégradation et elles s'instaurent spontanément dans les eaux suffisamment aérées. Le carbone organique se retrouve sous forme de CO₂ et de biomasse.

Après la dégradation des matières organique la cellule passe par différentes phases de croissance et décroissance. Mais la croissance bactérienne nécessite la présence d'autres éléments nutritifs en particuliers l'azote et le phosphore contenus dans les effluents et dont l'élimination est également nécessaire.

Bassin d'aération.

Le bassin d'aération se situe en aval du prétraitement et en amont du clarificateur. Son rôle est la dépollution des eaux par l'action des bactéries. La concentration de celles-ci est maintenue grâce à la recirculation des boues.

Les eaux usées sont brassées mécaniquement afin de créer un mélange homogène. L'apport d'oxygène permet aux bactéries de dégrader la matière organique. L'eau est ensuite décantée dans le clarificateur. Il existe plusieurs solutions pour aérer les eaux usées.



Figure I-9 : Bassin d'aération.

Notre cas : Débit journalier des eaux usées : $32.000\text{m}^3/\text{j}$

L'aération s'effectue dans deux bassins longitudinaux fonctionnant en parallèle,

Donc volume total d'aération : 9.33m^3

Volume d'un bassin d'aération dans des ouvrages rectangulaires de rapport $L/l=4$

Surface d'un bassin : 1.037m^2

Longueur d'un bassin : 64.40m

Largeur d'un bassin : 16.10m

Besoins en oxygène

Production d' O_2 : $1.7 \text{ kg O}_2/\text{KWh}$

Les besoins en oxygène sont multiples. Ils sont calculés en fonction :

-De la population carbonée, dont l'élimination est établie sur la durée de pointe diurne (16heures),

-de la respiration endogène des boues étalée sur 24heures.

- Pollution carbonée :

La consommation théorique en oxygène, exprimée en kg/j ,

$5.500 \text{ kgo}_2/\text{j}$, soit $230 \text{ kgO}_2/\text{h}$.

-Besoins en oxygène de point = $367.52\text{kgO}_2/\text{h}$

Ceci donne plusieurs types d'ouvrage : les bassins « fines bulles » et les bassins « à turbines ».

- **Les bassins « fines bulles »**

Pour ce type de bassin l'injection d'oxygène est faite par un système de rampes d'aération située en fond d'ouvrage. D'oxygène délivré remonte à la surface sous forme de fines bulles. Pour un bon rendement. Cette méthode nécessite des hauteurs d'ouvrages importantes. Les hauteurs de liquide avoisinent généralement les 6.00 mètres. De plus, les eaux usées circulent dans un chenal. Ceci implique la construction d'un voile circulaire concentrique au voile extérieur. Généralement. La zone de contact se trouve au centre.

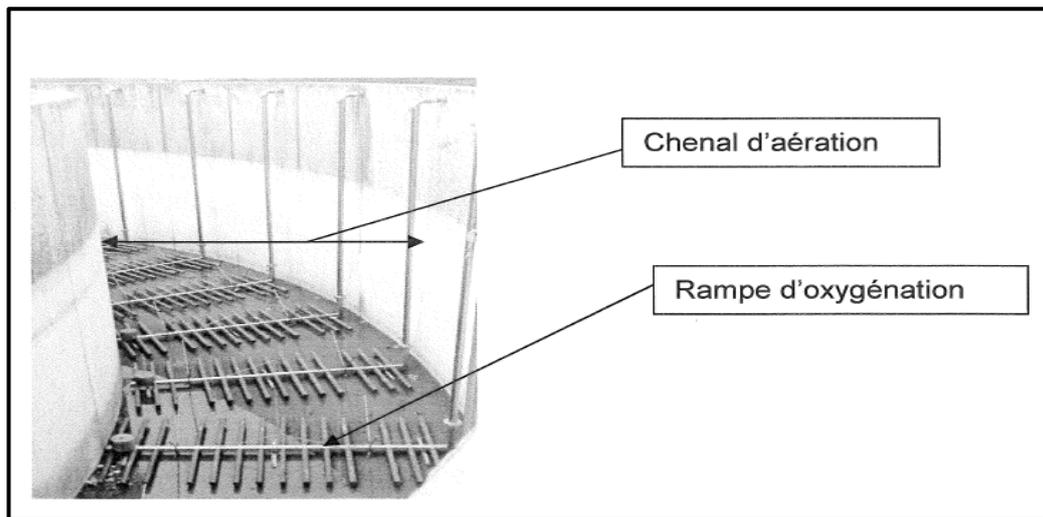


Figure I-10 : bassin d'aérations fines bulles.

En fond d'ouvrage des turbines sont fixées sur le radier afin de faire circuler l'eau. Pour ce type d'ouvrage, les diamètres peuvent varier de 10 à 20 mètres.

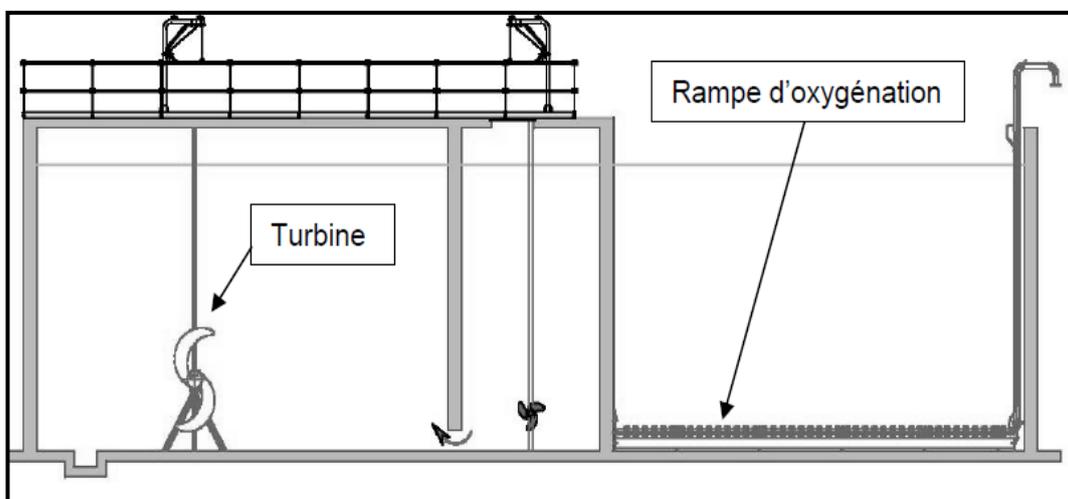


Figure I-11 : Coupe sur bassin d'aération « fines bulles ».

- **Les bassins « à turbines »**

Pour ces ouvrages, l'addition d'oxygène aux eaux usées se fait par un brassage de surface. Cette méthode nécessite donc la construction d'une passerelle qui supporte les turbines.



Figure I-12 : Bassin aéré mécaniquement par des turbines de surfaces.

Pour un bon rendement, il est préférable que la hauteur d'eau ne soit pas très importante. En général, elle est de 3.50m avec une hauteur de marnage de 1.00 à 1.50m.

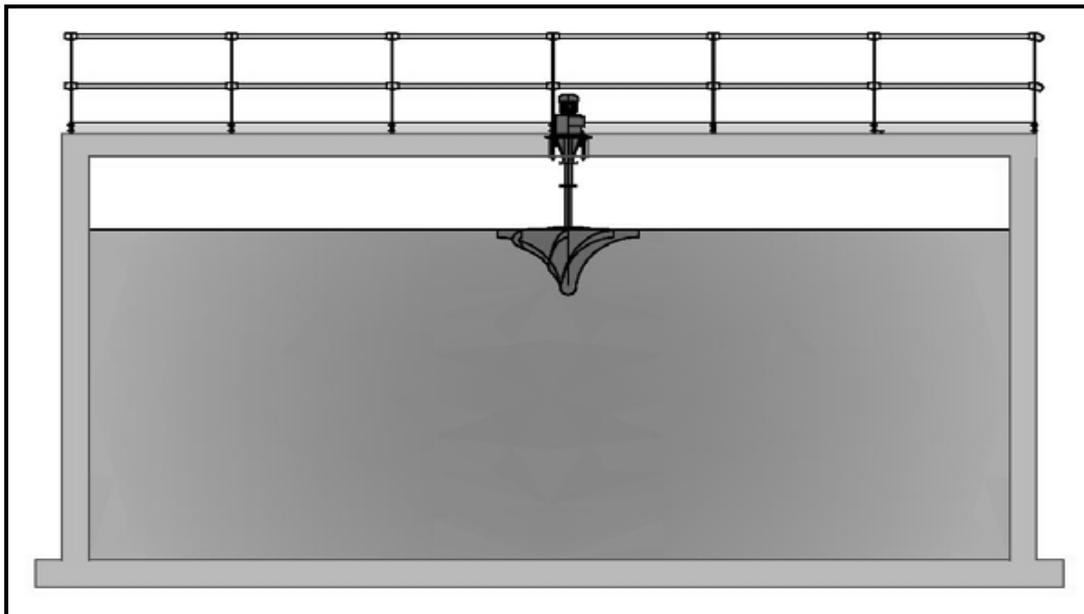


Figure I-13 : Coupe sur bassin d'aération aéré mécaniquement.

5. La clarification

Le traitement biologique est généralement suivi d'une étape de clarification permettant la séparation des eaux usées traitées et des boues d'épuration.

A la sortie des bassins d'aération, la liqueur biologique sera soumise à une clarification de façon à séparer les boues activées de l'eau épurée, et à les recycler vers les bassins d'aération :

Notre cas : La surface de clarification est calculée pour permettre une vitesse ascensionnelle de 0.9m/h (pour d'bit de pointe)

Surface = Débit de pointe / vitesse ascensionnelle. = $418 / 0.95 = 4.402.10\text{m}^2$

Nombre de décanteurs : 02

Surface /bassin = 2.201 m^2

Diamètre : 53.00 m

Flux massique : $17.0\text{kg/m}^2/\text{h}$

Temps de séjour : 2.5 h

-Traitement des boues :

Le traitement des boues est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès afin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance. (Rola, 2005)

On distingue trois grands types de traitement :

- **Stabilisation** : de type biologique, chimique ou thermique. Dont l'objectif est de réduire la fermentescibilité des boues pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs.

- **Traitements de réduction de la teneur en eau des boues** : visant à diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques physiques par :

- **L'épaississement** : vise à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue. Qui peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation)

- **La déshydratation** : qui correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

-Le séchage élimine en grande partie ou en totalité l'eau par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique.



Figure I-14 : Lits de séchage.

-Elimination des germes pathogènes (Désinfection par chloration) : La chloration se fait dans un bassin à l'aide d'hypochlorite de calcium équipée de chicane pour permettre un temps de contact suffisant.



Figure I-15 : Bassin de désinfection.

La désinfection se fera dans un ouvrage longitudinal muni de chicanes.

Notre cas :

- Temps de contact : 20 mn
- volume de désinfection : 726 m²
- longueur : 24.2 m
- largeur : 15 m
- Hauteur des chicanes : 2.00m
- Chloration
- Débit a' traiter : 2.18 m³/h
- Dose de chlore : 05mg/l
- Choix de l'oxydant : NACLO

Dose moyenne	Débit moyen	Débit de chlore	Débit d'hypochlorite de calcium
05ppm	1,333m ³ /h	6,665kg/h	48,30kg/h

Tableau I-2 : Quantité de chlore a Dosé. [1]

1- Le clarificateur

Le clarificateur se trouve en aval du bassin d'aération. Dans ce dernier, les bactéries ont consommé les pollutions. Le rôle du clarificateur est la séparation des boues en suspension et de l'eau traitée.



Figure I-16 : le clarificateur.

La séparation se fait sous l'action de la pesanteur. Il existe deux principaux types de clarificateurs. La différence se situe dans le système de récupération des boues. Pour les ouvrages courants, le diamètre des radiers peut varier de 7.00 à 20.00m pour des hauteurs de voile variant de 3.00 à 4.00m.

- **Le clarificateur raclé**

Dans le cas d'un clarificateur raclé, les boues tombées en fond d'ouvrage sont poussées mécaniquement par des racles de fond rotatives qui concentrent les matières au centre de l'ouvrage.

Les boues sont ensuite pompées vers le silo de stockage ou le centre de traitement. L'eau décantée passe par une surverse en tête de plan d'eau. Elle se dirige alors vers le canal de comptage. Ce type d'ouvrage demande la pose d'un pont racleur. Celui-ci présente un axe au centre de l'ouvrage. Les moteurs entraînant le pont se trouvent sur le voile.

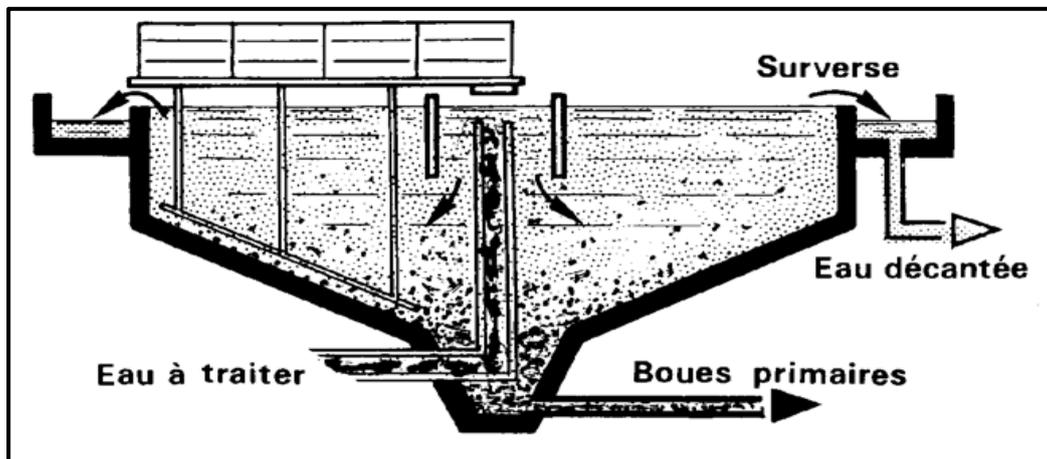


Figure I-17 : Principe de fonctionnement d'un clarificateur raclé.



Figure I-18 : pont racleur.

Ce système nécessite la construction d'ouvrage à fond conique de pente comprise entre 10% et 15%. Pour cela, il existe deux méthodes de réalisation. La première consiste à réaliser le radier à sa forme finale.

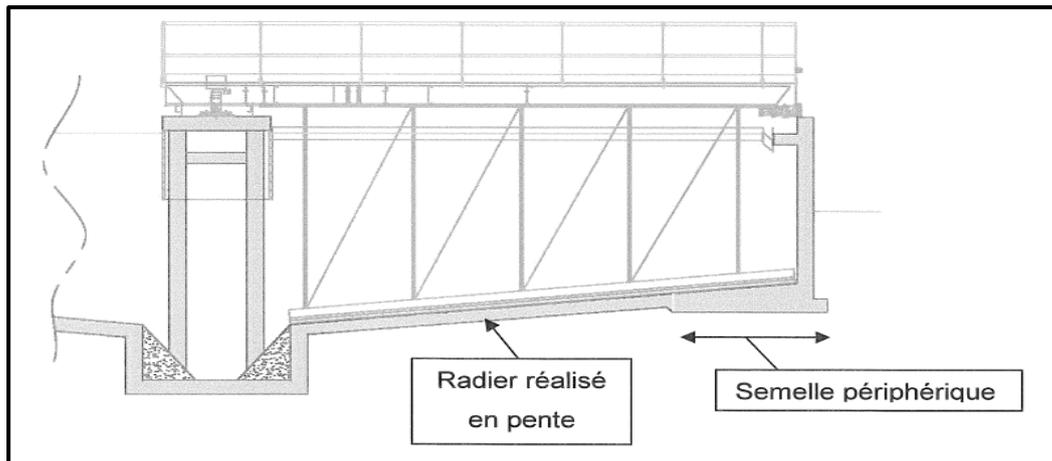


Figure I-19 : réalisation du radier en pente (déconseillée).

Cette méthode nécessite de réaliser un terrassement en forme de cône renversé. Cela demande du matériel spécifique de type godets de pales rotatifs. Par retour d'expérience, je déconseille l'utilisation de cette méthode. En effet, le terrassement est trop délicat à réaliser. Ceci peut conduire à des surconsommations de béton importantes. De plus, la plateforme de travail en pente est dangereuse pour les compagnons.

La deuxième méthode consiste à réaliser la forme de pente en recharge sur un radier à fond plat. Cette méthode est consommatrice de béton mais sa simplicité de réalisation compense très nettement le surcoût de matière.

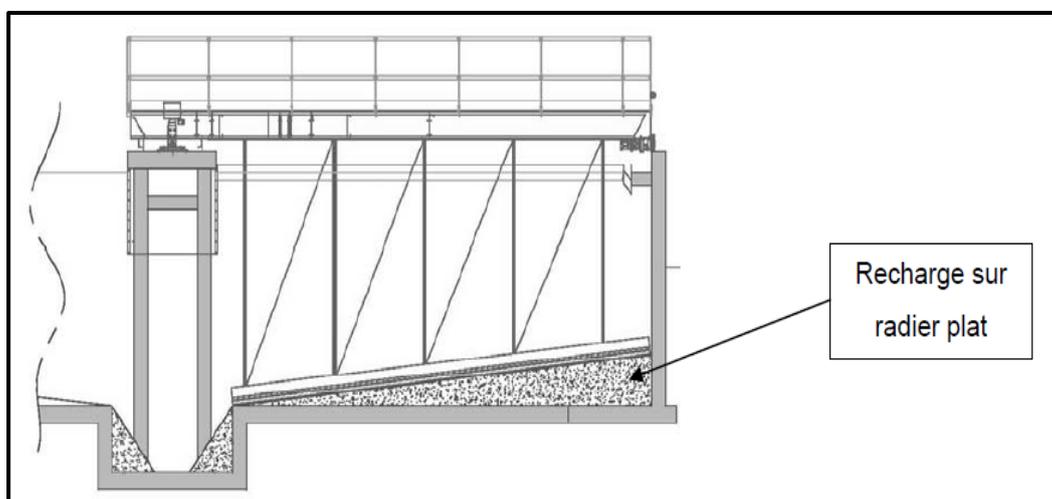


Figure I-20 : Réalisation de la forme de pente par recharge sur radier plat (conseillé).

La principale limite de cette méthode peut être la contrainte admissible du sol de fondation. Les ouvrages réalisés par cette méthode peuvent être particulièrement lourds. De plus, la forme de pente excentre les charges en périphérie de l'ouvrage au droit du voile, créant ainsi des pointes de contraintes au sol.

- **Le clarificateur sucé**

Dans ce cas, lorsque le diamètre de l'ouvrage est supérieur à 20.00m, il est préférable de réaliser un clarificateur sucé. Les boues sont aspirées au fond par siphonage.



Figure I-21 : Clarificateur à pont suceur.

L'inconvénient de cette méthode est le coût plus élevé du pont par rapport à un pont racleur.

1- Le silo à boue

Le silo à boue est un ouvrage de stockage. Il se présente sous la forme d'un réservoir couvert avec un fond conique pour permettre le pompage des boues. Comme pour le clarificateur, je préconise de réaliser un radier plat et d'exécuter les formes de pente en recharge sur celui-ci. Etant donné qu'il s'agit d'un ouvrage quelconque de stockage, ses dimensions peuvent être très variables.

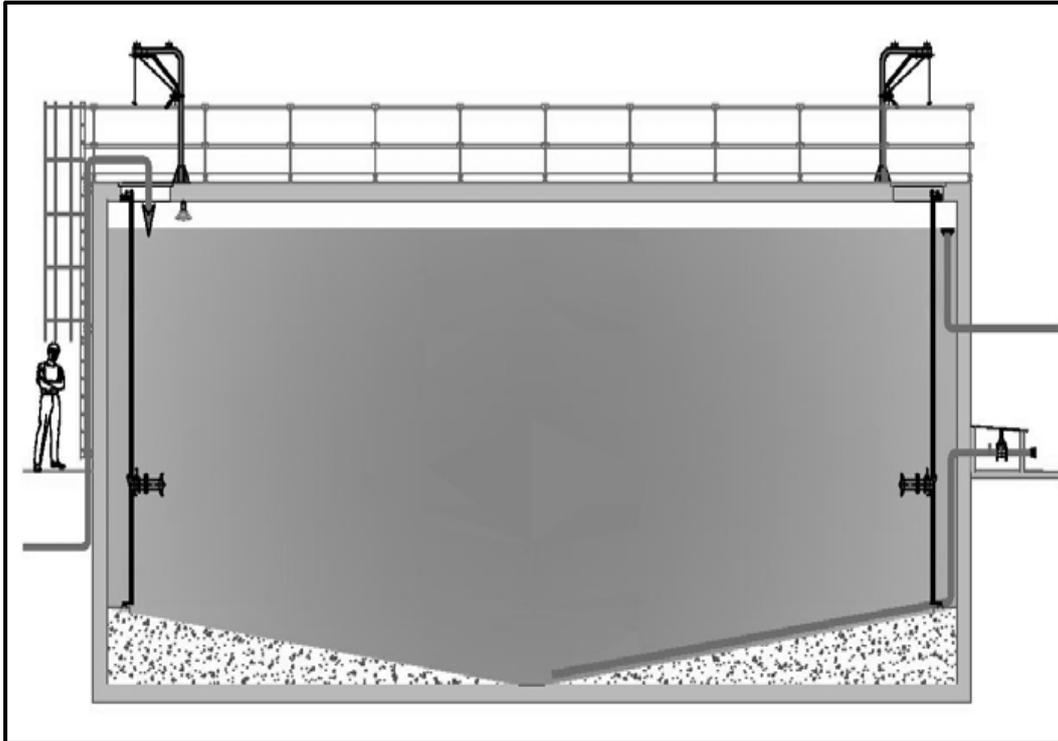


Figure I-22 : Coupe type sur silo à boues.

Il existe d'autre moyen de stockage tell que le lit de séchage



Figure I-23 : Lits de séchage.

I.3.1. Méthode de réalisation

Quel que soit le type de bassin, clarificateur, bassin d'aération ou silos à boues, les méthodes de réalisation sont identiques. En effet, les ouvrages présentent la même ossature constituée d'un radier et d'un voile circulaire.

1. Réalisation du radier

La première étape est la réalisation du radier. Les armatures sont posées sur un béton de propreté. Elles sont généralement préassemblées en usine pour une partie d'entre-elles appelées « semelle périphérique ». Cette cage est constituée des attentes pour les voiles montées sur des armatures de type semelle filante rayonnante. La partie centrale, intérieure à la semelle périphérique, est constituée d'un maillage de barres orthogonales en recouvrement sur la semelle.

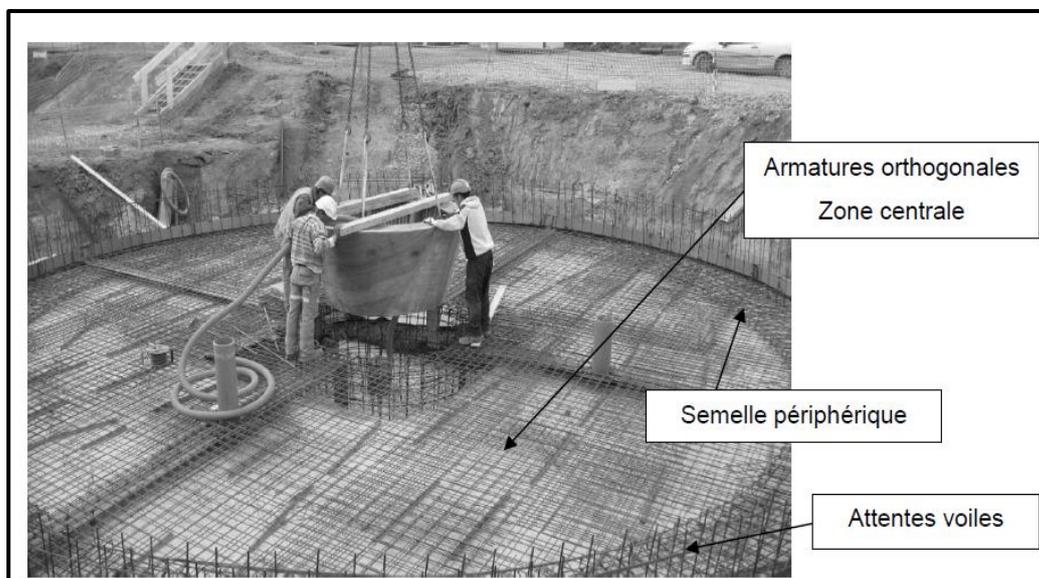


Figure I-24 : Préparation au coulage d'un radier.

La réalisation des radiers des clarificateurs et plus particulièrement la partie des regards centraux nécessite l'utilisation de coffrages spécifiques réalisés sur mesure. Ce type de coffrage étant très onéreux, il est judicieux lors de la conception des ouvrages de prévoir ce regard avec une cote standard. Ceci permet d'acheter un coffrage réutilisable d'un chantier à l'autre.

Afin de limiter au maximum les fissures de retrait, je conseille de réaliser le radier en plusieurs phases de bétonnage. Par retour d'expérience, je préconise de couler des surfaces

inférieures à 100m² et d'alterner le coulage des blocs. Ceci permet aux premières zones de faire une partie de leur retrait avant que les autres viennent les clavier.

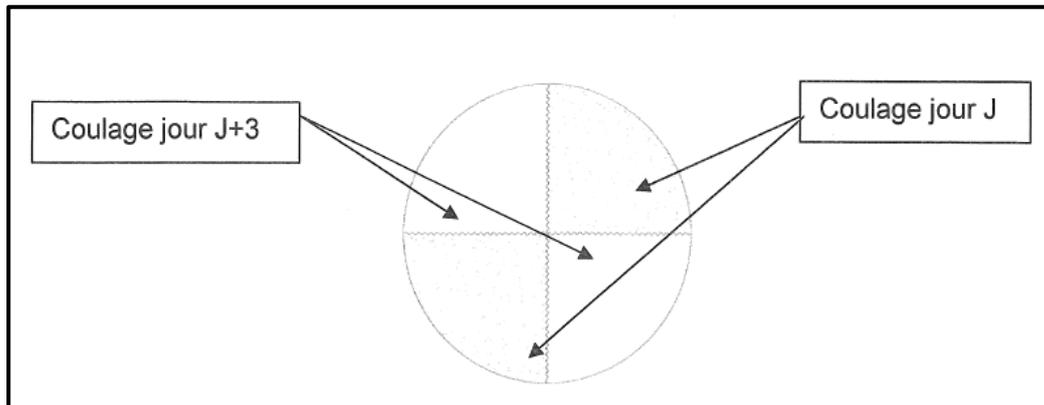


Figure I-25 : Préparation au coulage d'un radier.

2. Réalisation des voiles

Les voiles sont coulés à l'aide de banches cintrables. Dans le but d'avoir une bonne rotation de banches, les armatures peuvent être posées à l'avancement. Elles sont maintenues en place par des systèmes d'étaie ment lestés au sol par des massifs en béton amovibles. Le système d'étaie ment permet le réglage de la verticalité des cages et le positionnement au sol. Au fur et à mesure que les banches avancent, les étaie ments sont déplacés pour permettre la mise en place du coffrage autour de la cage.

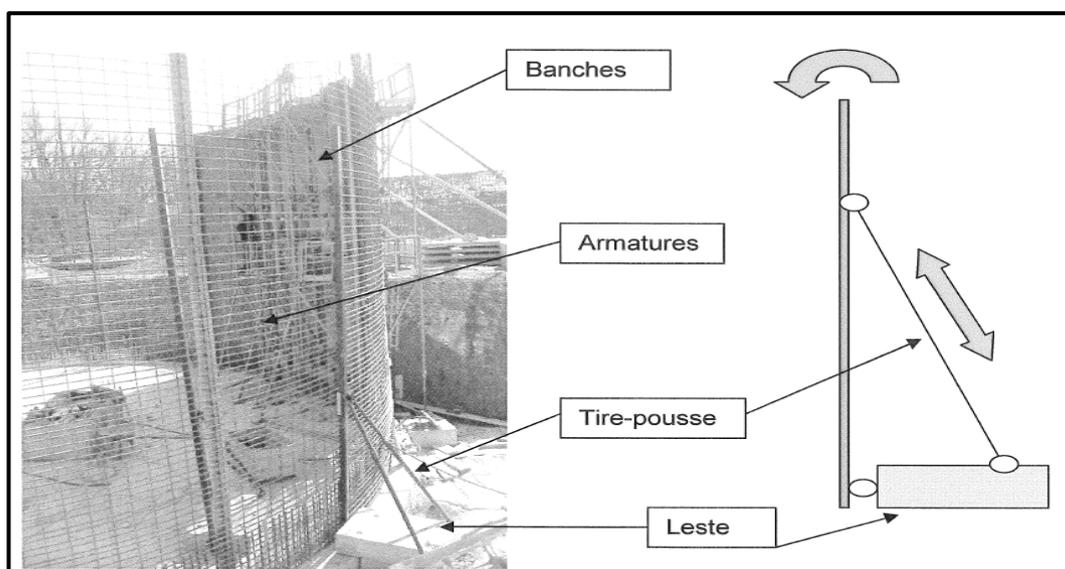


Figure I-26 : Armatures de voile posées à l'avancement maintenues par système réglable.

Les arrêts de bétonnage sont positionnés à l'avance dans les armatures en fonction de la longueur du train de banche. Pour assurer la continuité des armatures, ils doivent permettre le passage des barres. E plus ils doivent avoir un aspect rugueux assurant la bonne accroche de la reprise. Enfin, le plus important, ils doivent assurer une étanchéité parfaite afin que le bassin assure son rôle de contenant.

Il existe plusieurs systèmes dont le plus connu est le joint « waterstop ». Il se présente sous la forme d'une bande de caoutchouc munie de deux bourrelets à ses extrémités. Je déconseille l'utilisation de ce système car il est difficile à mettre en œuvre. En effet, le joint étant souple, il faut prévoir un système de maintien. Les liaisons entre joints demandent des recouvrements et ils sont souvent la cause de problème d'étanchéité.

Je préconise l'utilisation d'un joint type « STERMAFORM » de PLAKABETON. En effet, ce système allie à a fois le joint d'étanchéité sous forme d'une tôle rigide et un métal déployé permettant de réaliser une bonne reprise avec passage des armatures au travers.

Ce système est simple à mettre en place. De plus, il est rigide. Il ne se déforme pas au coulage. Enfin, la tôle d'étanchéité est soudable. Ceci permet un raccordement parfait entre les différentes reprises, et plus particulièrement au nœud voile radier.

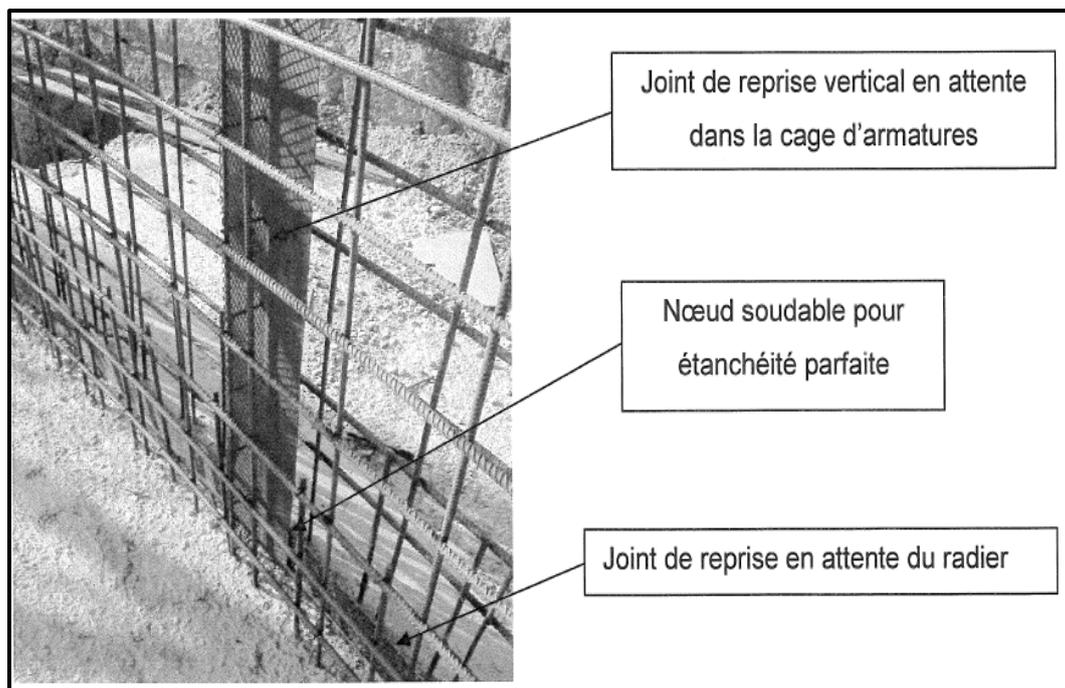


Figure I-27 : joint de reprise en attente dans les cages d'armatures.

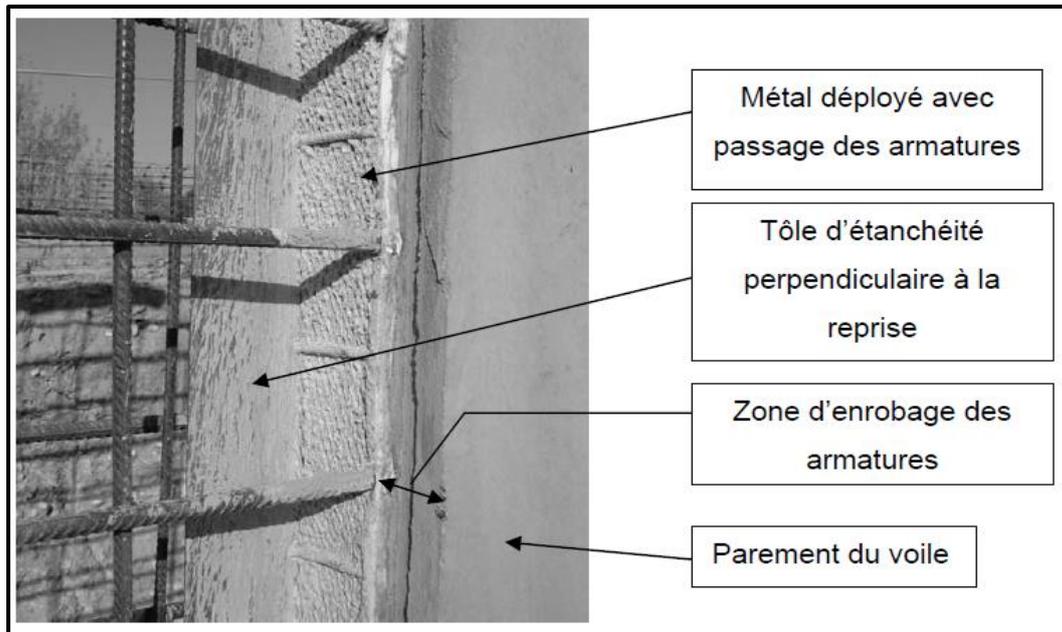


Figure I-28 : Joint de reprise après coulage d'une longueur.

Selon la quantité des armatures à mettre en œuvre dans les voiles, il peut être difficile de bien vibrer le béton en fond de banche. Par conséquent, il peut y avoir de la ségrégation du béton en pieds des voiles. Cela peut remettre en cause l'étanchéité et l'intégrité mécanique du voile. Pour limiter ce phénomène, je conseille de disposer les cerces horizontales du côté parement. Ceci permet un meilleur passage de l'aiguille vibrante.

Conclusion

Il existe différentes filières d'épuration. Le choix d'une de ces filières dépend de différents impératifs technico-économiques et surtout de la quantité d'eau à traiter.

Chapitre II : Pathologie du béton armé

II.1. Introduction

Depuis plus d'un siècle, une grande majorité des ouvrages sont construits en béton armé. Les pathologies observées sur ce matériau composite sont complexes et variées et sont très fréquemment en relation avec l'eau.

L'étude d'ouvrages anciens encore utilisés et confrontés à l'action de l'eau constitue donc un des points essentiels de la problématique de pérennisation des constructions du génie civil.

De manière générale et encore plus particulièrement dans le cadre de la politique de développement durable actuelle, ils doivent donc être pérennisés. Cette démarche ne peut se faire qu'au moyen d'une bonne compréhension des mécanismes de vieillissement qui l'affectent, résultat de la réponse de l'ouvrage aux contraintes auxquelles il est soumis.

C'est dans cette optique que s'inscrit le diagnostic d'un ouvrage. À partir du moment où une pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage, il est important de diagnostiquer d'une part d'où vient le problème, mais à quel degré il affecte l'édifice. Dans un second temps, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage.

Le diagnostic est un moment clé lorsqu'il y a présence de pathologies. En effet, si la source du problème est mal diagnostiquée, les réparations préconisées ne correspondront pas réellement à ce qui est nécessaire et l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques.

Pour effectuer un diagnostic, différents moyens d'investigation sont disponibles. On a d'une part les Méthodes destructives, pour les structures pouvant être localement dégradées et les méthodes non destructives pour les ouvrages nécessitant d'être préservés tels que les bâtiments classés monuments historiques.

L'action de l'eau sur les constructions, tant au niveau de leurs fondations qu'en superstructure, constitue l'une des principales causes d'apparition de désordres, aussi bien du point de vue structurel qu'esthétique. Les problématiques liées à l'eau proviennent à la fois de

- Son action mécanique.
- Ses caractéristiques chimiques et intrinsèques.
- Son action physique.

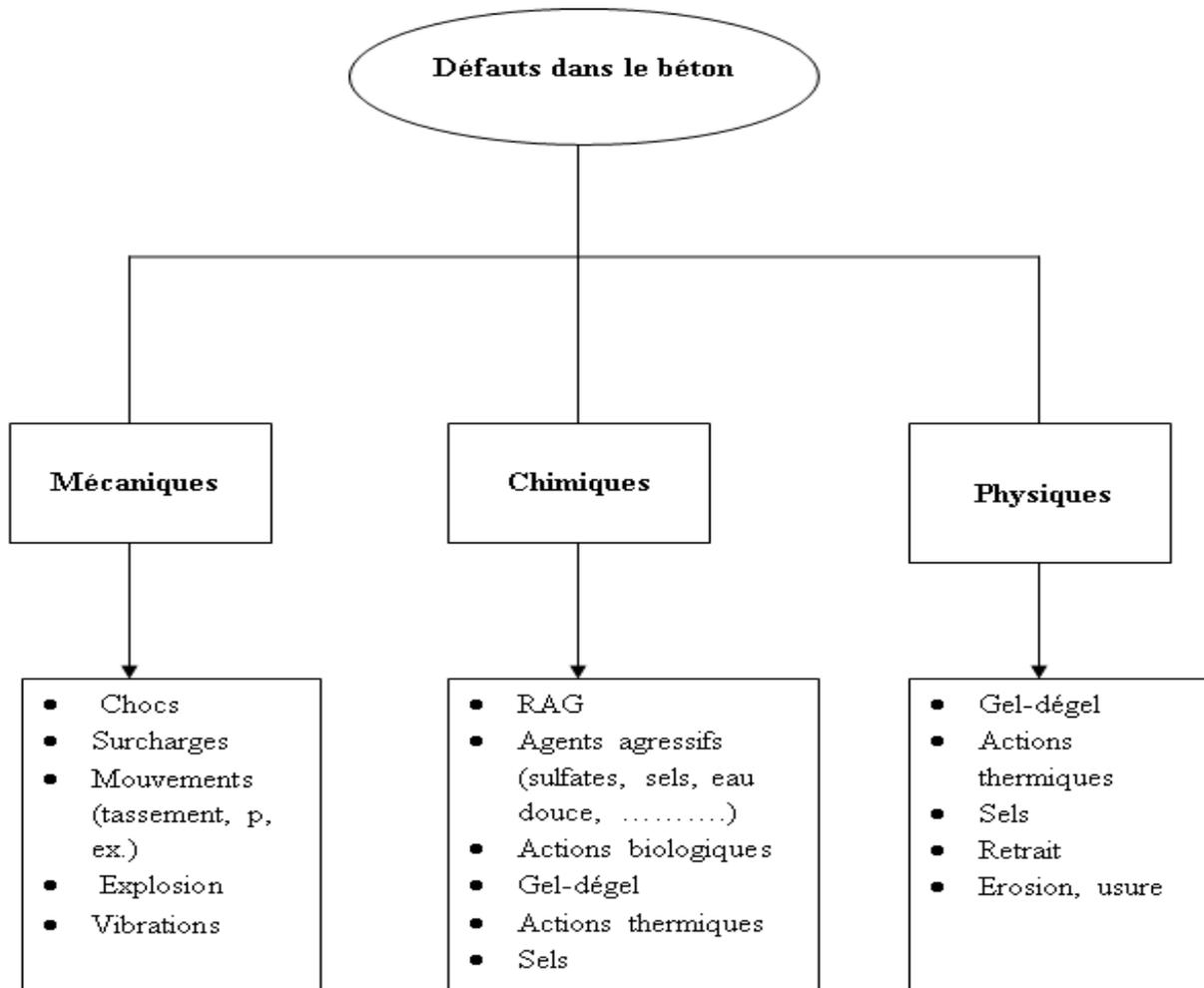


Figure II-1 : dégradations de béton arme.

II.2. Dégradations mécaniques

Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux.

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle. [2]

II.3. Dégradations Chimiques

II.3.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)

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.

La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent à une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies :

- 1- Présence de granulats potentiellement réactifs.

La réaction se produit seulement si la teneur en réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique (pessimum) dont les limites dépendent de la composition minéralogique des constituants.

- 2- Humidification permanente ou régulière de la structure teneur élevée du béton en alcalis.

Dans un béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire.

Dans un béton armé ou précontraint, les armatures empêchent la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'acier, de sorte que le tracé des fissures épouse celui des armatures sous-jacentes.

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. [3]



Figure II-2 : réactions alcalis-granulats.

II.3.2. Attaques Sulfatiques

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante et peut se produire aussi bien durant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) qu'après le durcissement (ettringite secondaire).

Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure. Toutefois, même en l'absence de source extérieure de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est la raison pour laquelle la température maximale est généralement limitée à quelque 65 °C durant la phase de durcissement.

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-S-H), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage. [4]



Figure II-3 : attaques sulfatiques.

II.3.3. Attaques Acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. [5]



Figure II-4 : Attaques acides.

II.3.4. Lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres.

Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs. [5]



Figure II-5 : lixiviation.

II.4. Dégradations Physiques

Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages. [5]

II.4.1 Cycles de gel-dégel

En l'absence de mesures appropriées, le bétonnage en période hivernale peut donner lieu à des dégâts de gel. La formation de glace conduit en effet à la dilatation de l'eau présente dans le béton frais.

Dans un béton encore plastique, ce gonflement s'opère librement ; une fois durci, le béton ne présentera aucun dégât apparent, mais sera de mauvaise qualité. Dans un béton jeune déjà durci, le gonflement est entravé et des tensions internes apparaissent. Si le matériau n'a pas développé de résistance suffisante, les dégâts se manifesteront par un écaillage de la surface (le plus souvent en plusieurs couches). On considère généralement que le béton est apte à résister à ces tensions internes dès que sa résistance en compression

dépasse 5 N/mm². Cette résistance devrait être atteinte si l'on maintient une température ambiante supérieure à 5 °C pendant les 72 premières heures qui suivent la mise en œuvre.

Un béton durci peut, lui aussi, être endommagé par le gel : en se dilatant sous l'action du gel, l'eau présente dans les pores et les fissures crée des tensions susceptibles de provoquer ou d'aggraver des fissures. La sensibilité au gel du béton durci dépend dans une large mesure de sa structure poreuse et des dimensions des fissures. Le risque de dégâts de gel est plus important sur des dalles ou des plans horizontaux que sur des surfaces verticales, les pores étant davantage saturés en eau. [6]

II.4.2. Sels de déverglaçage

Les sels de déverglaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique, c.-à-d. une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels répétés et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau. La nature des sels de déneigement peut également avoir une incidence sur le processus de dégradation observé

Par ailleurs, les ions chlore des sels de déverglaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures. [7]



Figure II-6: dégradation due aux sels de déverglaçage.

Dans ce qui suit nous allons voir les différents types de pathologies que nous avons classé en deux grandes catégories à savoir Les pathologies à risque élevé et à risque moyen :

II.5. Les pathologies à risque élevé

A. La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO₂ émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

Les ingénieurs ont, au cours du XX^e siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO₂ dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition.

Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recapter jusqu'à 50 à 60 % de CO₂ supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulats recyclé issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation.

1) Les mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO₂ Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO₂ atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %.





Figure II-7 : phénomène de la carbonatation.

2) Conséquences de la carbonatation

Notons que les ciments contiennent également des oxydes d'alcalins (Na_2O et K_2O) qui se retrouvent sous forme de bases alcalines dans la solution interstitielle (NaOH et KOH). Ces espèces alcalines permettent de maintenir une basicité au-delà de la valeur imposée par la portlandite (c'est-à-dire au-delà de 12,4 à 20 °C). Néanmoins, leur carbonatation est très rapide puisque les alcalins sont quasiment uniquement présents sous forme aqueuse et sont donc facilement lixiviés (on dit aussi lessivés) en présence de pluie.

Au cours du processus de carbonatation, l'élément principal de transformation est le carbonate de calcium (CaCO_3) dont il existe plusieurs variétés polymorphiques : calcite, vaterite et aragonite. La calcite est la variété la plus stable et correspond à la forme du calcaire qui a servi à obtenir le clinker après cuisson du cru dans le four de la cimenterie.

Du point de vue des structures en béton armé ou précontraint, la carbonatation est un phénomène délétère qui progresse de l'extérieur (parement) vers l'intérieur, à travers la zone d'enrobage des armatures, selon un processus physico-chimique qui associe la diffusion du CO_2 à travers la porosité et les réactions chimiques de fixation du CO_2 dans les hydrates. La neutralisation de l'alcalinité du milieu qui en découle devient problématique lorsqu'elle atteint le premier lit des armatures. En effet, si le pH diminue trop, la couche de passivation des aciers constituée d'oxydes et d'hydroxydes ferreux devient instable. Il s'ensuit une corrosion rapide, dite généralisée, sur toute la surface de l'armature. Les produits de corrosion, qui sont expansifs, endommagent le parement (fissuration,

épaufures, etc.), forment des coulées de rouilles inesthétiques et conduisent à la réduction de la section d'acier des armatures. La valeur de pH seuil en dessous de laquelle la carbonatation peut conduire à une corrosion marquée des armatures fait encore débat dans la littérature. Situé entre 9 et 11, ce seuil dépend de la nature du ciment et surtout de l'état hydrique du béton ; il faut notamment suffisamment d'eau liquide pour faciliter les échanges ioniques au niveau des micro piles qui apparaissent sur la surface de l'acier, sans pour autant bloquer la diffusion de l'oxygène corrosif en phase gazeuse.

Il est possible de réaliser un diagnostic de l'état de carbonatation du béton en prélevant depuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateur colorimétrique de pH (phénolphthaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaît incolore et le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone de virage est voisine de $\text{pH} = 9$).

Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la phénolphthaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée.

C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH.

La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front de carbonatation comme cela est illustré où les armatures apparaissent protégées, car étant situées à l'aval du front détecté par projection de phénol -phtaléine, alors qu'en réalité le niveau de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner en précision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique (réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciage depuis la surface) et la gamma-densimétrie (méthode non destructive). L'utilisation de plusieurs indicateurs colorés présentant des zones de virage de pH différentes pourrait également être une solution à condition que les contrastes de coloration entre les zones saine et carbonatée soient suffisamment marqués.

L'humidité de l'air est un facteur très important puisque la carbonatation est lente, voire absente, dans une atmosphère saturée d'eau (la diffusion du CO_2 en phase gazeuse est alors quasiment impossible si la porosité du béton est saturée) et dans une atmosphère trop sèche (la dissolution du CO_2 en phase aqueuse n'a pas lieu car elle est cinétiquement très limitée). Ce comportement conduit à une carbonatation optimale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.

En revanche, notons que la corrosion sera quant à elle optimale pour une humidité relative avoisinant 90 %-95 %.

Du point de vue normatif, le risque de carbonatation est pris en compte pour formuler un béton (E/C, dosage en ciment et teneur en additions minérales) au travers de la norme NF EN 206-1. Il est intéressant de noter que la classe d'exposition la plus préjudiciable vis-à-vis de la carbonatation (XC4) correspond à un climat avec alternance de phases sèches et humides. Cette situation n'est certes pas la plus favorable du seul point de vue de la carbonatation ; en revanche, eu égard au risque de corrosion, elle maximise la cinétique. Notons également l'existence de normes (Eurocode 2) permettant le dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe de résistance du béton et de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis de l'attaque du CO_2 .

Le schéma de la carbonatation peut être représenté de la manière suivante

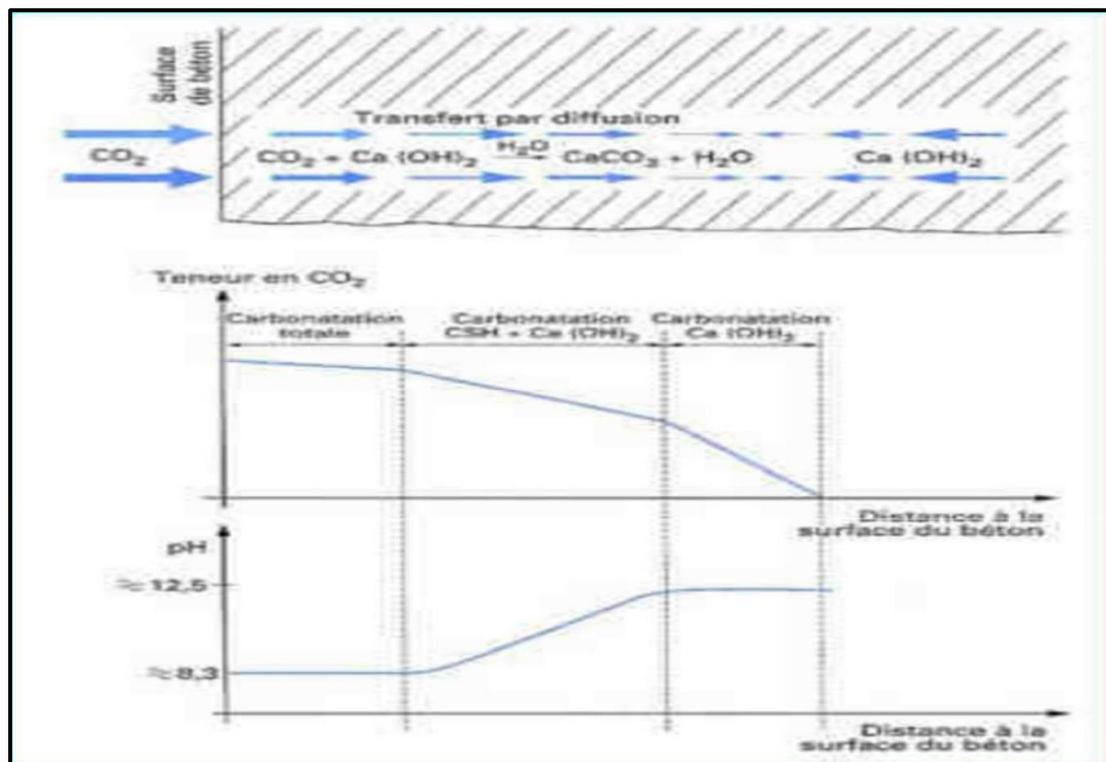


Figure II-8 : schéma de la carbonatation.

3) Les causes de la carbonatation

Le CO_2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment (avec une prédominance de H_2CO_3 , HCO_3^- ou CO_3^{2-} suivant la gamme de pH).

Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est notamment affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes.

Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible.

La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO_2 dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO_2 (0,03 %). La concentration en CO_2 venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration).

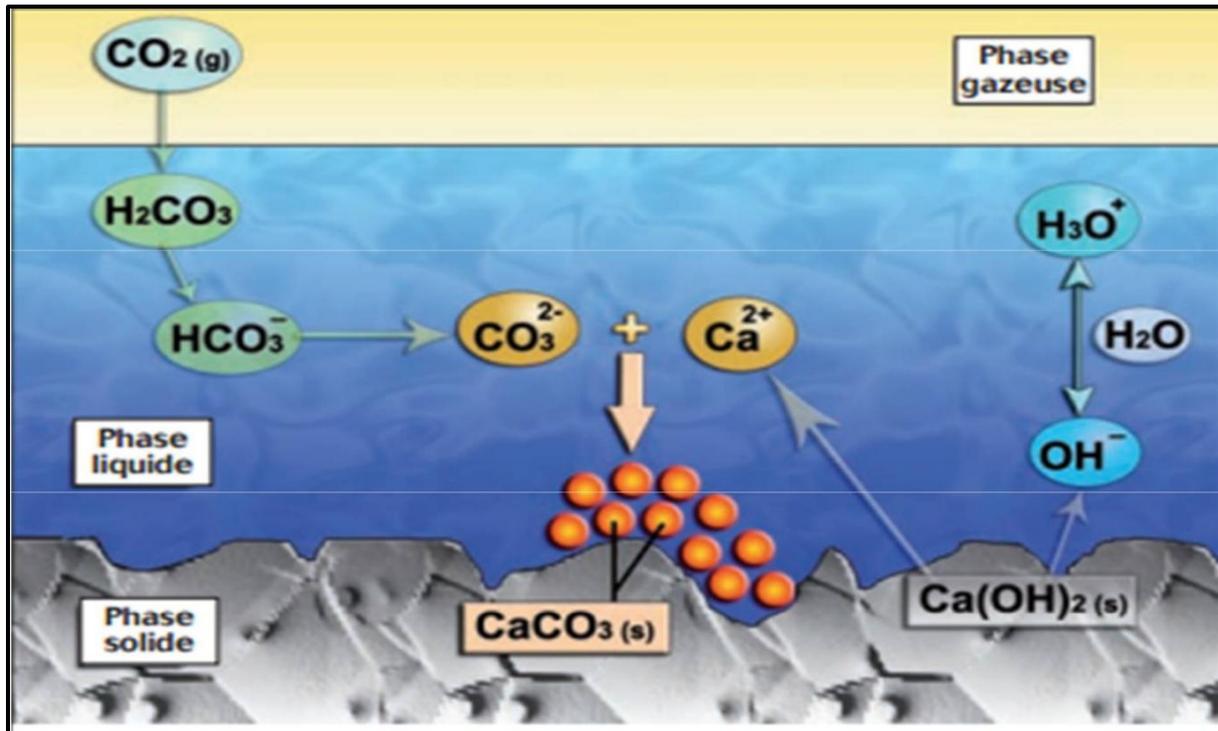


Figure II-9 : Les phases de carbonatation.

4) Paramètres influent sur la cinétique de carbonatation

Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moins directement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front de carbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- la porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à la diffusion du CO_2 ;
- la teneur en hydrates carbonatés : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation ;
- la microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après un an, 10 mm au bout de 4 ans et 25 mm

après 25 ans. Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un surdimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton. Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton.

La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) partiellement carbonatée.

L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du CO_2 peut être à l'origine du développement de micro-organismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques. Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté. [8]

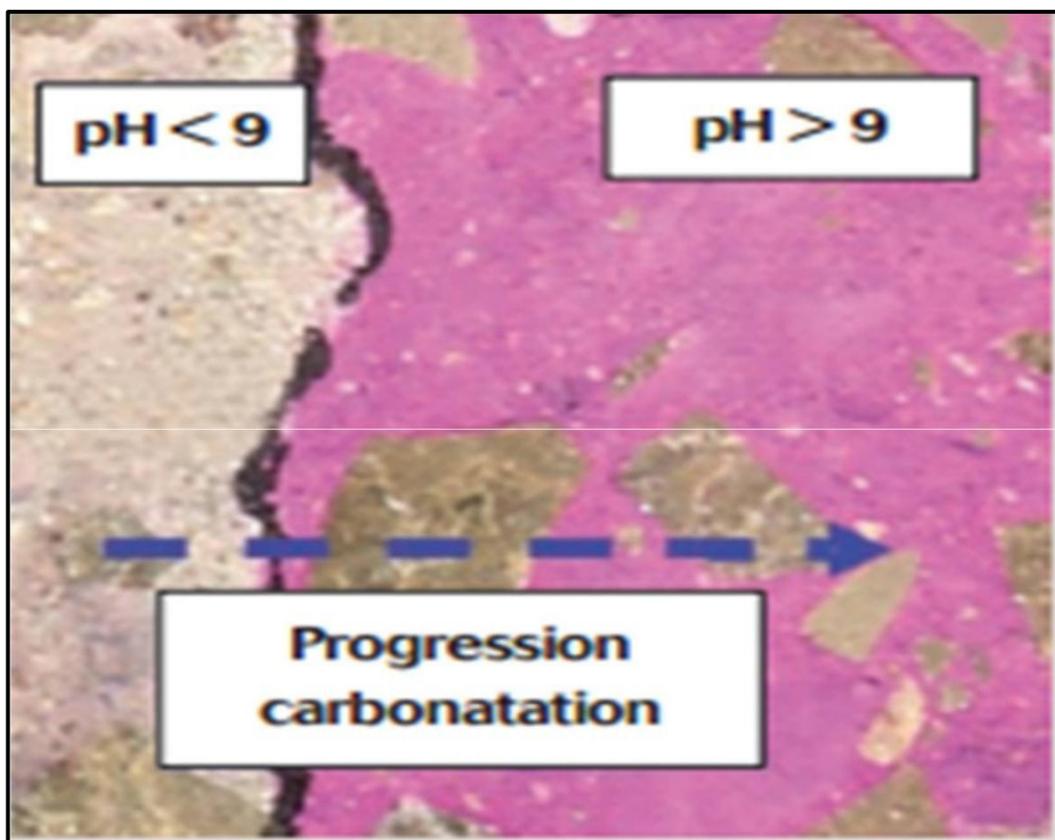


Figure II-10 : Progression du front de carbonatation.

B. La corrosion

1) Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage.

2) Phases de la corrosion

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes (Figure 39) :

- Phase d'initiation (ou d'incubation) : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton ;
- Phase de propagation : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions.

Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement.

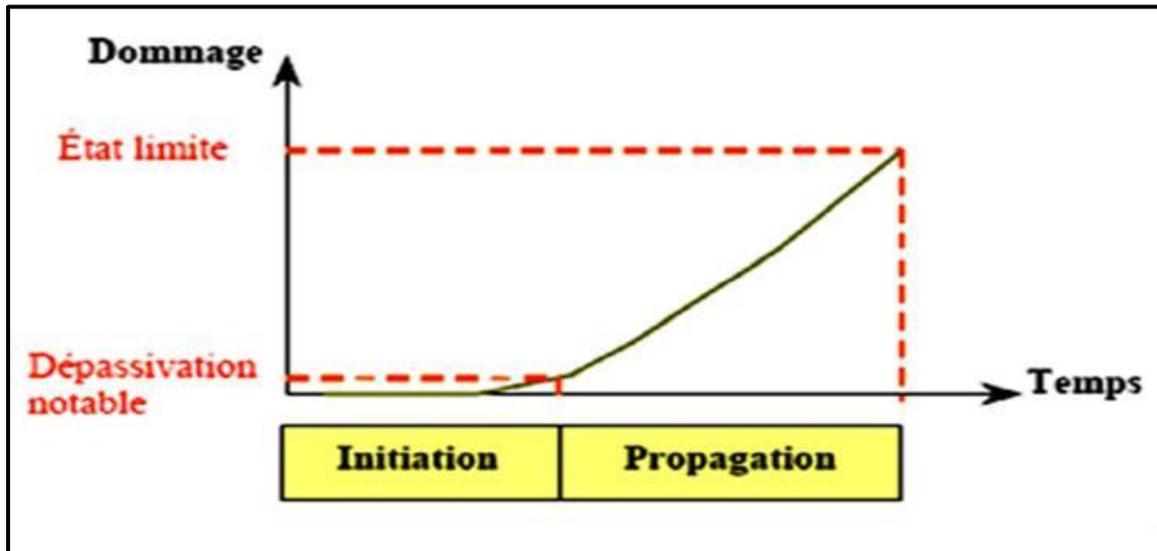


Figure II-11 : corrosion bar les temps.

3) Formes de la corrosion

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types :

- Corrosion généralisée : la corrosion a un aspect à peu près uniforme ; ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées ;
- Corrosion localisée : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes ; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton ;
- Corrosion sous contrainte : celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique. Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la

sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement.

4) Facteurs influençant la corrosion des armatures

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurs contribuant à la corrosion est présentée par [Raharinaivo et al.,1998]. On présente ci-dessous les facteurs prépondérants.

5) Humidité relative

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, à cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturé d'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. Lorsque l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée ; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide.

6) Enrobage

L'enrobage de béton autour des armatures a pour rôle principal d'assurer une transmission des forces par adhérence entre le béton et l'acier. En outre l'enrobage de béton protège les aciers de deux façons : par une protection physique, le béton constituant une barrière vis - à - vis des agents agressifs et par une protection chimique, grâce au pH élevé de la solution interstitielle du béton, lequel maintient stable la couche protectrice formée sur les aciers.

7) Température

Les réactions chimiques sont accélérées avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et des sels dans l'eau.

8) Teneur en chlorure

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorure atteint ou dépasse une valeur critique ou valeur seuil [Glass et al., 1997 ; Brime, 2001 ; Petterson, 1993], on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes.

9) Oxygène

L'oxygène dissous dans un liquide ou dans une phase aqueuse joue un rôle primordial dans la réaction, dite cathodique, de corrosion des aciers ($O_2 + 2H_2O + e^- \rightarrow 4OH^-$). Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de réaction de dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs positives.

10) Agents agressifs autres que les chlorures

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures, au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton.

11) Réactions de corrosion des aciers dans le béton

L'exposition des armatures à l'air permet la formation d'une couche naturelle de rouille. Vu la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre par capillarité à travers ses pores et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent se former ($4 CaO \cdot FeO_3 \cdot 13H_2O$).

L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base

d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [Almusallam, 2001].

Dans la zone de contact du béton et de la couche dérouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première est une couche non influencée par les aciers ; la deuxième, qui est une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du métal, assure une transition entre les propriétés mécaniques et la microstructure.

Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation. Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact.

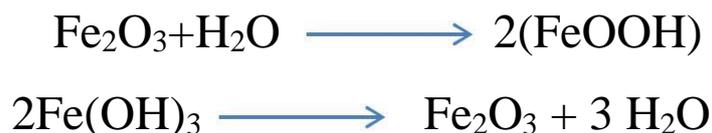
Les ions chlorures en contact avec le béton pénètrent dans l'ouvrage par l'intermédiaire de l'enrobage. La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la surface de la barre d'acier dans la zone dite cathodique. Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxydes. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées :



Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions Hydroxydes de façon à former les hydroxydes :

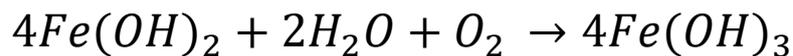
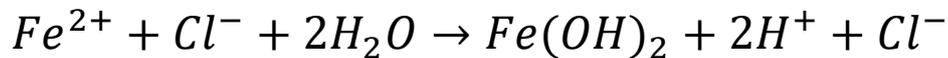


Cet hydroxyde ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe_2O_3) ou de la rouille hydratée ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) et du FeOOH , sachant que [Raharinaivo et al.1998] :



En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation. Une représentation schématique du mécanisme de corrosion induite par les chlorures.

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique, la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode. Si on ne tient pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit :



Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion :

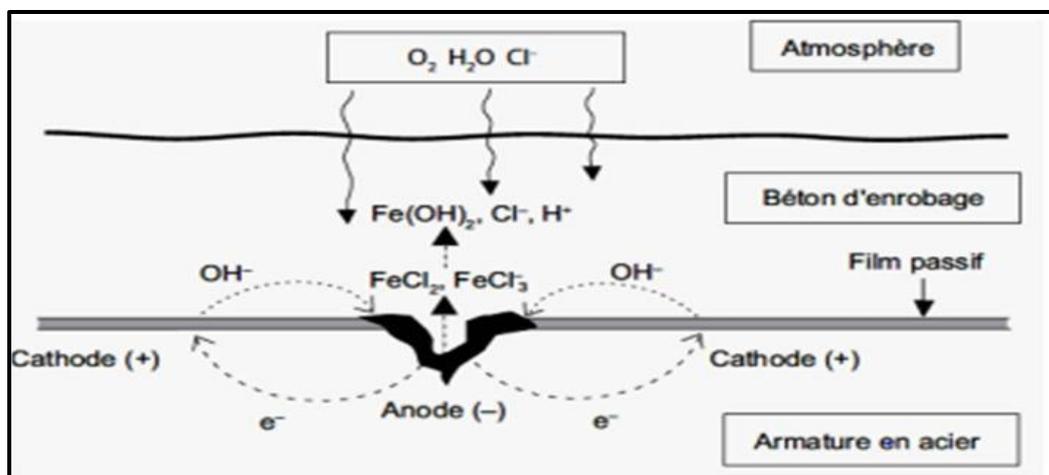


Figure II-12 : les états de corrosion.

Anode= électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution.

Cathode= électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal.

On note aussi que, dans les réactions liées à la corrosion, les ions chlorures ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction. On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une

influence sur la résistivité électrique du béton sont l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle. [9]

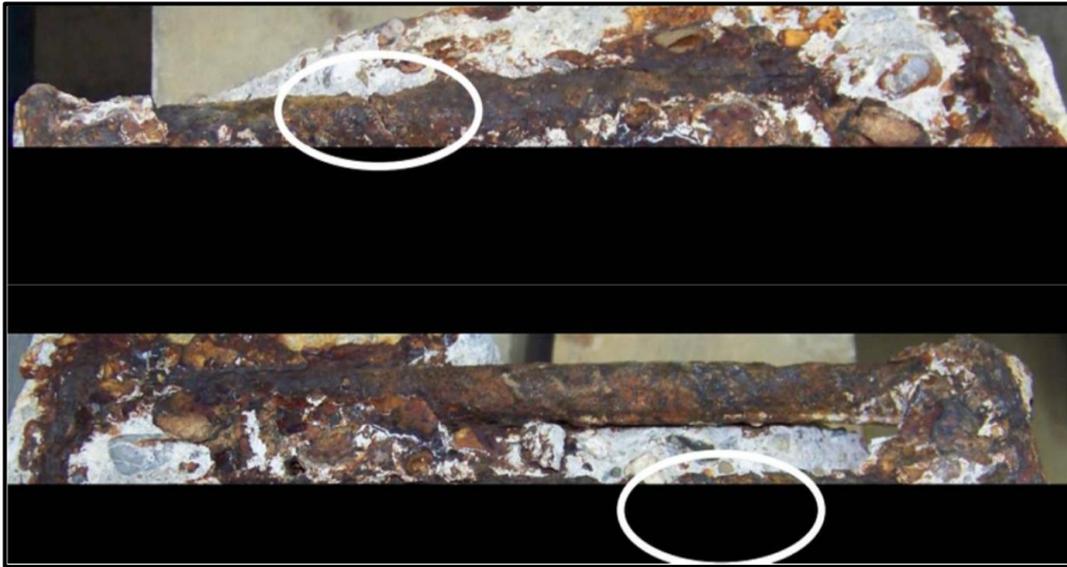


Figure II-13 : corrosion de l'armature.

➤ Les causes de la corrosion

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées.

Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO₂ atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, la dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. le schéma suivant décrit. [10]

Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé

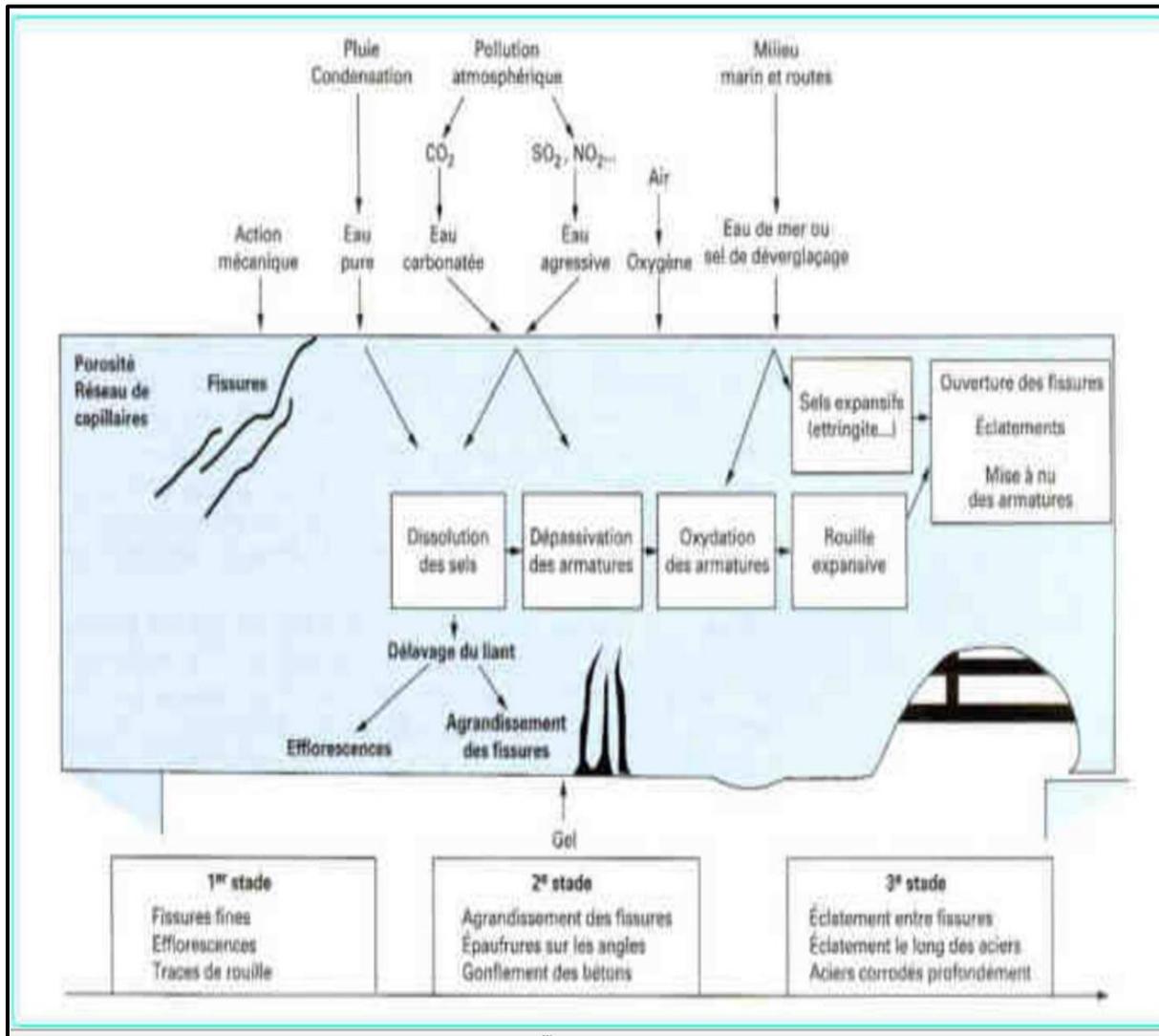


Figure II-14 : Processus de corrosion.

➤ **Les conséquences de la corrosion**

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.

Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace. [10]

Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufrures, des décollements, ...

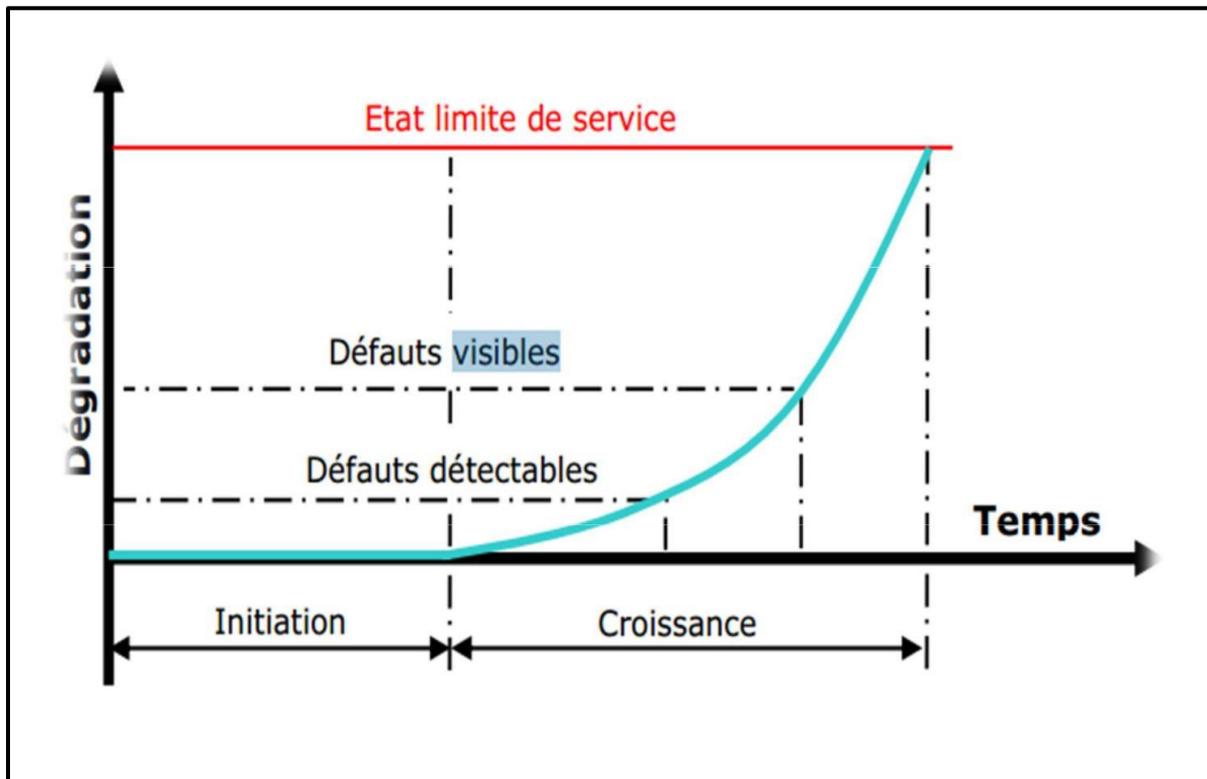


Figure II-15 : Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.

C. Fissure

Fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc.

Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur ; au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil; au-dessus, la fissure est une lézarde.

Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique : fissure de retrait, ou de mouvement différentiel à la jonction de deux matériaux.

Les fissures sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois (fissures Pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé); plus graves encore sont les fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol. Est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau.

Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- 1- Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.
- 2- Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- 3- Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.
- 4- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories :

- A-** Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton.
- B-** Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2mm.
- C-** Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

- ∅ Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentour à la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.
- ∅ Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température. [11]



Figure II-16 : Fissure de béton

D. Lézardes

Les lézardes dans les briques et dans les joints de mortier sont causées par le tassement du sol sous une construction. Le sol peut être un “terrain rempli” où les vides ont été obturés sans qu’on laisse le remblayage se fouler convenablement. La glaise sous la fondation a pu sécher et rétrécir ou, peut-être, s’est déplacée sous l’effet d’une inondation.

Le drainage ou l’imperméabilisation font peut-être défaut, ou la fondation a été érigée au-dessus de la ligne de gel. Le sol sous les maisons construites sur une colline se déplace quelquefois vers le bas de la pente. Le pourrissement et le séchage du bois peuvent occasionner des déplacements de terrain et les racines de gros arbres déplacer ou éventrer une fondation. Peu importe la cause, les lézardes causées par affaissement et qui ne sont pas réparées à temps se détériorent rapidement.

Des lézardes continues sur les murs extérieurs indiquent des problèmes d’affaissement : elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d’abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans une maison neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d’un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l’époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre. [12]



Figure II-17 : lézardes.

E. Retrait

Contraction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire (bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraites ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture :

Façonnage des enduits, microfissuration du béton.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique (légère contraction par évaporation, dès la mise en place) ; puis intervient le retrait hydraulique, élimination d'eau de gâchage excédentaire, qui se poursuit de façon décroissante pendant longtemps.

De façon générale, un béton ou un mortier a d'autant plus de retrait que sa concentration en ciment est importante.

La mesure du retrait s'effectue sur des éprouvettes (4x4x16cm), d'une part sur la pâte pure, d'autre part sur le mélange constitué.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles

avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation.

a - Le retrait de plastiquées : en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que

des armatures. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

b - Le retrait de dessiccation : est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en Ouvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

c - Le retrait thermiques : est lie au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques déshydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre, Jusqu'à quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente).

d - Le retrait d'auto-dessiccation : est lie à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en Fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction. Le Chatelier (le volume des hydrates formes est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction

capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires. [13]

II.6. Pathologies à risque moyen

1. Faièncage

Le phénomène de faièncage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence. Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm. Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faièncage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faièncage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton. [14]



Figure II-18 : phénomène de faièncage.

2. Epaufrure

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction. [15]



Figure II-19 : Epaufrure dans construction.

3. Lichen

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme.

Lichen est plus fréquente dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif. [16]



Figure II-20 : Lichen sur la structure.

4. Le ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Le ressuage est, avec la ségrégation, l'une des deux manifestations de la dégradation de l'homogénéité d'un béton frais. Dans le cas de la ségrégation, les grains présentent au cours du temps un mouvement relatif entre eux. Certains (les plus denses ou les plus volumineux) tombent alors que les autres (les fins ou ceux ayant une masse volumique réduite) remontent vers la surface

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée. Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale.

4.1. Type de ressuage :

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

- Ressuage visible dû à la restitution d'eau à la surface de l'élément de construction après le compactage de mortiers ou de bétons.
- Ressuage interne dû à la restitution d'eau sous l'armature ou sous les gros granulats après le compactage de mortiers ou de bétons.

Le ressuage ne doit pas forcément être négatif : la perte d'eau diminue le rapport e/c et le béton devient plus dense du moins dans les parties inférieures. Sur les surfaces de béton inclinées ou verticales, l'élimination de l'eau de ressuage au moyen de lés de coffrage dissipant l'eau fait partie des méthodes ayant fait leurs preuves pour améliorer la qualité du béton superficiel.



Figure II-21 : ressuage de béton.

4.2. Les raisons du ressuage des bétons

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place resse. Les bétons avec une teneur en eau élevée (rapport e/c) sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapport e/c est bas. Et plus le pourcentage de fines dans le béton est élevé, plus la tendance au ressuage diminue.

Le ressuage provient de ce que le béton est composé de matériaux dont la densité diffère fortement :

- Granulats avec du domaine de 2,6 à 2,7 kg/dm^3
- Ciment 3,0–3,2 kg/dm^3
- Eau 1,0 kg/dm^3

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce que ces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage.

4.3. Dispositif de mesure du ressuage

Le ressuage est mesuré de façon classique par l'observation directe d'un échantillon. En effet, on peut voir apparaître une ligne de séparation entre l'eau et la pâte dans le haut d'un contenant transparent. Le ressuage normal est caractérisé par une vitesse de déplacement constante de la surface du solide. Suivi d'une diminution graduelle de la vitesse jusqu'à l'arrêt complet du ressuage. [17]

Conclusion

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard.

Chapitre III : Diagnostic

V.1. Introduction

Depuis plus d'un siècle, une grande majorité des ouvrages sont construits en béton armé. Les pathologies observées sur ce matériau composite sont complexes et variées et sont très fréquemment en relation avec l'eau.

L'étude d'ouvrages anciens encore utilisés et confrontés à l'action de l'eau constitue donc un des points essentiels de la problématique de pérennisation des constructions du génie civil.

De manière générale et encore plus particulièrement dans le cadre de la politique de développement durable actuelle, ils doivent donc être pérennisés. Cette démarche ne peut se faire qu'au moyen d'une bonne compréhension des mécanismes de vieillissement qui l'affectent, résultat de la réponse de l'ouvrage aux contraintes auxquelles il est soumis.

L'action de l'eau sur les constructions, tant au niveau de leurs fondations qu'en superstructure, constitue l'une des principales causes d'apparition de désordres, aussi bien du point de vue structurel qu'esthétique. Les problématiques liées à l'eau proviennent à la fois de

➤ Son action mécanique :

- Erosion des matériaux constitutifs de l'ouvrage en raison d'un courant.
- Charge statique apportée par l'accumulation d'eau.

➤ Ses caractéristiques chimiques et intrinsèques.

- Transport d'ions ou de composés chimiques « agressifs » pour les matériaux.
- Variation de volume lors des changements d'état.
- Pouvoir corrosif vis-à-vis des aciers.

Ce patrimoine national est donc vieillissant ce qui nécessite un entretien et un suivi régulier. Cependant, la maintenance des ouvrages de ce patrimoine bâti est très onéreuse. Une démarche scientifique rigoureuse est donc nécessaire pour réduire ce budget par la mise en place d'outils visant à optimiser et fiabiliser le diagnostic structural des ouvrages. Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour une évaluation à grand rendement. En effet, le CND permet de donner des informations quantitatives sur la totalité de la surface auscultée et de limiter ainsi le nombre de prélèvements.

V.2. Evaluation de l'état d'un ouvrage en contact avec l'eau

V.2.1. Pourquoi un diagnostic ?

Le diagnostic d'un ouvrage au sens large du terme permet d'évaluer dans quelles mesures il remplit ses fonctions structurelles et de service, c'est-à-dire vérifier qu'il satisfait aux conditions de sécurité et d'utilisation qui sont définies par la réglementation et par les besoins de son propriétaire ou usager.

Le vieillissement d'un ouvrage est marqué par l'apparition de désordres spécifiques. Dans le cadre d'un diagnostic, deux types de missions peuvent être réalisées :

- Une analyse approfondie des désordres en vue de leur traitement (réparations, confortement).
- Un suivi de l'évolution des désordres pour observer leur aggravation à court, moyen et long terme. Si ce suivi met en évidence une aggravation importante, des travaux de réparation seront alors préconisés.

Dans l'optique d'une réparation ou d'un confortement, le diagnostic a pour but de bien définir les travaux à réaliser. Le traitement des désordres demeurera en effet pérenne puisque ciblé sur leurs origines et leurs conséquences. Cette optimisation des travaux de pérennisation, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, est naturellement source d'importantes économies pour le maître d'ouvrage.

V.2.2. Comment répondre à la demande du client ?

Pour répondre à la demande du client, il est nécessaire de comprendre le plus précisément possible ses besoins et les caractéristiques de l'ouvrage à diagnostiquer. Pour cela, on effectue une visite sur site ou, à défaut de pouvoir s'y rendre, l'analyse de photos et de plans agrémentés de toutes les observations du client.

Cette phase est primordiale pour préparer au mieux le futur diagnostic. Il s'agit de :

- Connaître le type d'ouvrage sur lequel on va réaliser le diagnostic et l'environnement dans lequel il se trouve ;
- Relever les principales dimensions de l'ouvrage et ses matériaux constitutifs ;
- Noter les principaux types de désordres et estimer leur quantité. Lorsque l'ensemble de ces données sont recueillies, un document contractuel permettant de matérialiser l'offre de l'entreprise au client est rédigé : le devis.

V.2.3. Réalisation d'un diagnostic

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client a découvert quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de Désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces

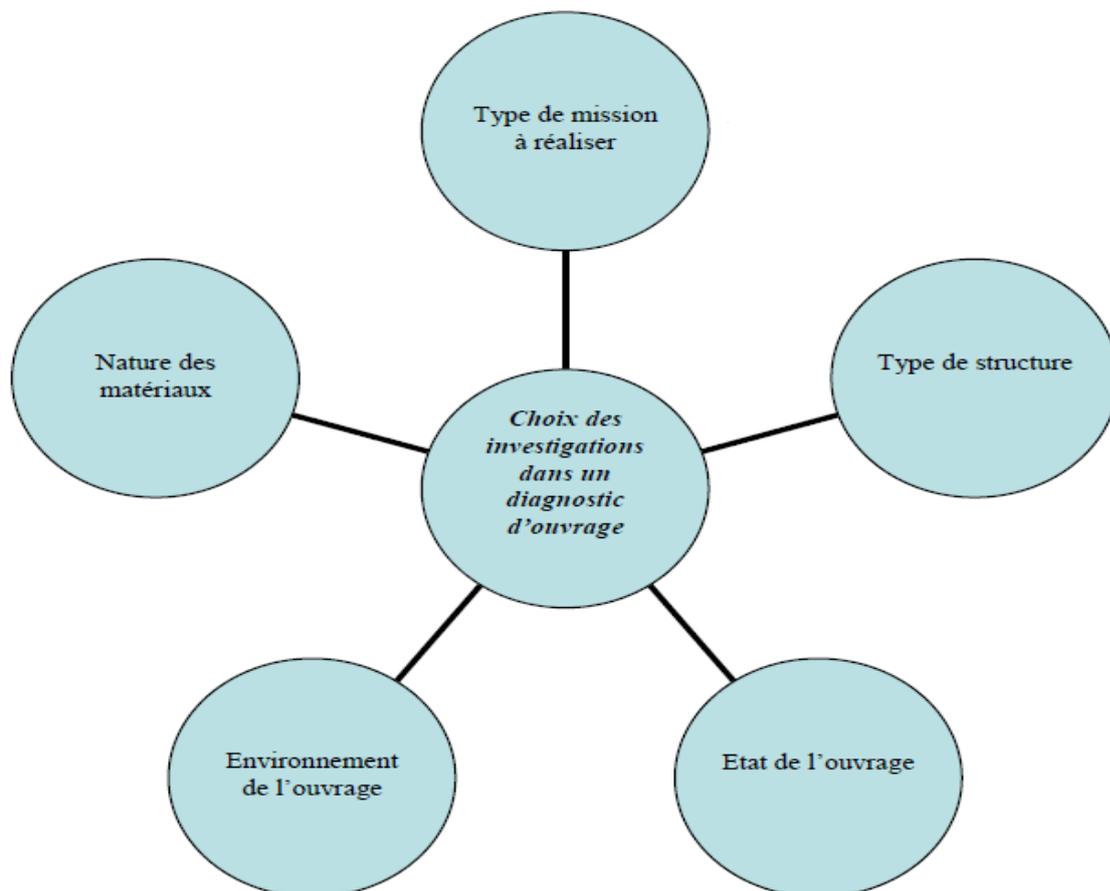


Figure III-1 : Choix des investigations.

Troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations. L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

Le choix des investigations dépend de :

- Type de mission à réaliser :

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes.

- Nature des matériaux :

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre.

- Type de structure : géométrie et taille de l'ouvrage
- Etat de l'ouvrage :

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton.

- Environnement de l'ouvrage :

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être un frein à la réalisation d'investigations et nécessiter l'utilisation de moyens spécifiques (nacelle, échafaudages, etc.).

V.2.4. Types d'investigation

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite.

4.1. Investigations non destructives

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ou une partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des bâtiments de France qu'il soit utile d'effectuer des prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser. Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie. Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus.

Il existe différentes méthodes non destructives :

A. Relevé visuel

Le relevé visuel est une étape clé lors de la réalisation d'un diagnostic. C'est un outil indispensable à la compréhension des mécanismes ayant conduit à la formation des désordres. Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaître les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs. Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaître les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure. Dans un second temps, il est nécessaire de répertorier les différentes pathologies présentes sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides.
- Les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds.
- Les aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

B. scléromètre

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour une sonde en contact avec l'ouvrage inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.

Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérométrique I_s d'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée, de l'élément considéré.

Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats, tels que l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton. Il peut être intéressant de

coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée.



Figure III-2 : Scléromètre.

C. L'auscultation sonique

- **Introduction**

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

- **Le principe de la méthode**

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R et FACAOARU (1969).

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tels que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représentent un inconvénient majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle, quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

À l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO et CARATIN (1984).

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

- **Mode Opérateur**

a) Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,

- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

b) Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

- Distances minimales entre points de mesures

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

- Étalonnage de l'appareil

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

- Manières de mesure

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

A - Mesure en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

B - Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

C – Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières.

D. Le radar

Le radar a une large gamme d'applications potentielles dans plusieurs domaines, des activités militaires et aériennes en premier temps au CND du béton. La description en détail des techniques radars a été réalisée par Daniels (Daniels 2004). Le principe de cette technique en génie civil est basé sur la réflexion et l'atténuation d'ondes électromagnétiques dans le milieu du matériau. La propagation d'ondes électromagnétiques dépend de la permittivité diélectrique, de la conductivité et de la perméabilité du matériau ausculté.

Elle peut être caractérisée par les quatre équations de Maxwell. Le système radar permet d'émettre une impulsion électromagnétique haute fréquence entre 100 et 3000 MHz à la surface du matériau qui se propage, se réfléchit en partie à chaque interface entre deux milieux électromagnétiques différents. Les échos successifs sont enregistrés dans un signal temporel.

La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps.

Dans une structure en béton armé, il existe différentes interfaces de types air/béton, béton/acier, béton/sol pour l'élément posé sur le sol, et béton/air pour l'élément en élévation. Ces interfaces sont susceptibles de présenter des contrastes de propriétés électromagnétiques suffisamment forts pour être détectés par le radar. C'est pourquoi, la technique radar permet de localiser rapidement des cavités dans les chaussées (Steinway 1982), détecter des armatures, des câbles précontraints, des défauts (vides, fissures, délaminages) dans le béton.

Elle permet d'estimer l'épaisseur du béton d'enrobage, la dimension d'éléments (plancher, voile, mur, etc.). Cependant, le positionnement en profondeur dépend forcément de la connaissance de la vitesse d'ondes électromagnétiques dans le matériau étudié. Les études académiques récentes se sont développées afin d'évaluer des propriétés physiques et chimiques du matériau telles que les teneurs en eau et en chlorure, notamment pour le béton d'enrobage (Laurens 2001, Klysz 2004, Sbartai 2005, Ihamouten 2011).

Plusieurs synthèses ont été effectuées pour préciser les avantages ainsi que les limitations de la technique radar (Bungey 2004, Clemeña 2004, Hugenschmidt 2012). Un avantage principal est l'auscultation totalement non destructive et rapide à grande échelle et en profondeur (dépendant de la permittivité du milieu). L'équipement portable permet une utilisation facile et une présentation immédiatement des résultats sous forme d'image radar (coupe-temps). Par contre, le traitement des données nécessite une personne qualifiée. Les caractéristiques des ondes électromagnétiques sont souvent exploitées, soit en vitesse, soit en

amplitude de l'onde directe ainsi que les différents échos. Il est important de noter que la vitesse et l'amplitude dépendent de la permittivité diélectrique du matériau qui est dépendant des teneurs en eau et en chlorures des bétons. Les valeurs relatives de la partie réelle de la permittivité diélectrique (Tableau 1.1) sont définies par rapport à celle de l'air conformément à la norme ASTM D4748. Cette valeur est souvent appelée « constante diélectrique » ...

La technique radar est souvent utilisée sur des ouvrages réels, plus particulièrement pour inspecter le revêtement des tunnels, ou détecter le délaminage sur des ponts en béton armé à l'aide de système mobile et moderne, par exemple le système HERMES (HighSpeed électromagnétique Roadway Mapping and Evaluation System) (IAEA 2002). Ces applications sont présentées dans les normes ASTM D4748, ASTM D6087, ASTM D6429-99, ASTM D6432-99. Les nouvelles applications concernent l'évaluation de la variabilité spatiale des bétons in situ pour détecter des zones de probabilité de dégradation (SENSO 2009, EvaDéOS2012). Cette technique peut être également utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres mesures CND plus locales (résistivité électrique, ultrason) pour améliorer l'évaluation des propriétés des bétons (ex. saturation, porosité, résistance mécanique). [25]

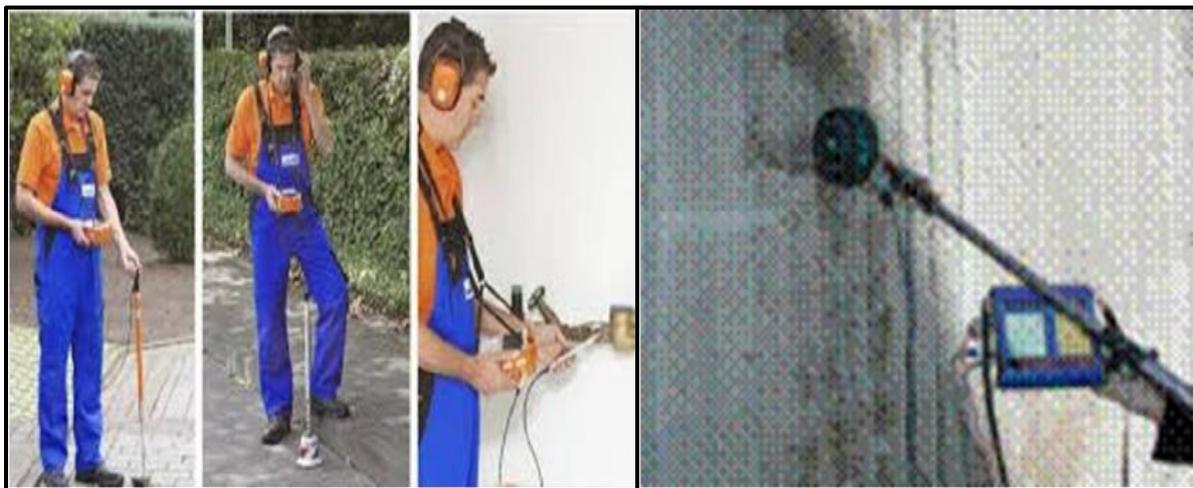


Figure III-3 : Le radar.

4.2. Investigations destructives

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaître ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir

accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaître leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies. [26]

A. Carottage d'éléments en béton armé

Le recours au carottage du béton armé peut avoir plusieurs objectifs.

- Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur le sol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage.
- Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi des analyses chimiques et microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C.
- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,)

La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour « l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton ». La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton.

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferrailage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.



Figure III-4 : Carottage.

B. Prélèvements d'aciers

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcul d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature. Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit.



Figure III-5 : Prélèvement d'aciers.

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploitée afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.

C. Test à la carbonatation

Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine.

La phénolphthaléine est un composé organique de formule $C_{20}H_{14}O_4$. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonnée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique).

La couleur que prend la phénolphthaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphthaléine, si la phénolphthaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphthaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées.

Il peut s'avérer intéressant de coupler les mesures de profondeur de carbonatation avec les mesures d'enrobages données par exemple avec un pachomètre de type Ferro scan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type :

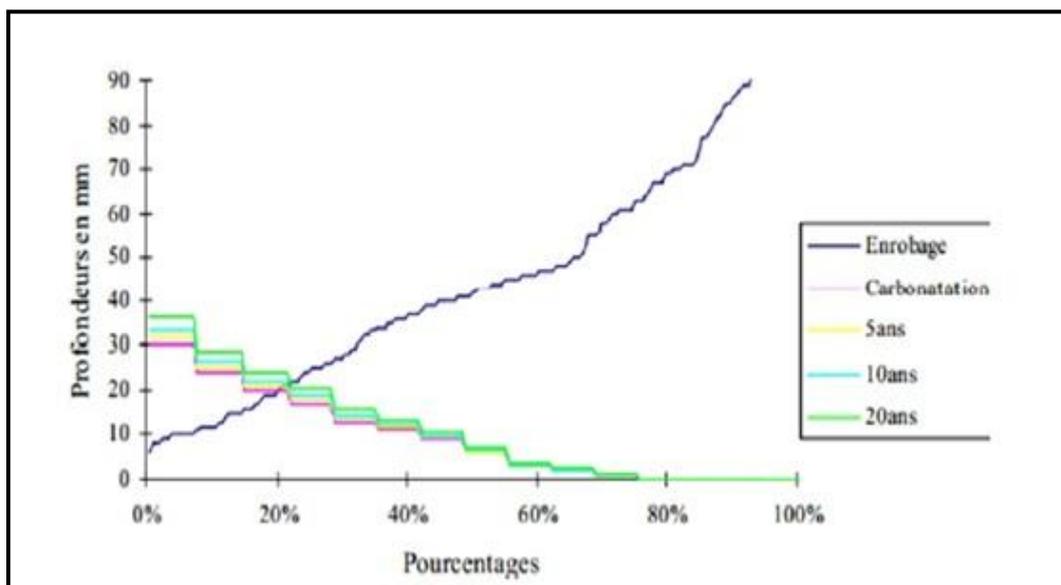


Figure III-6 : Graphique enrobage-carbonatation.

L'intersection de la courbe d'enrobage (courbe bleu foncé) avec celle de carbonatation (courbe rose) donne le pourcentage des armatures qui ne sont plus protégées.



Figure III-7 : Carbonatation sur carotte.

Conclusion

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Chapitre IV : Les méthodes de réhabilitation

IV.1. Introduction

Une fois les causes ainsi que les pathologies diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir des travaux de réhabilitation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques et mécaniques initiales. Afin de retarder ou de limiter de nouvelles pathologies similaires, il est possible de protéger la structure. Il existe un grand nombre de protections, elles sont à choisir selon les différentes pathologies, mais aussi sur la durée de pérennisation espérée.

Elles vont du simple revêtement s'appliqué sur le parement, aux traitements électrochimiques. Il est aussi possible de ne pas prévoir des travaux, mais seulement s'intéresser à l'évolution des pathologies. C'est le cas par exemple pour des fissures, il peut être utile de vérifier si son ouverture est continue dans le temps, dans ce cas il sera nécessaire de prévoir des travaux de confortement. Ou bien si l'ouverture de la fissure dépend de l'évolution de la température, auquel cas il est possible de laisser l'ouvrage en l'état sans craindre une dégradation de l'ouvrage.

IV.2. Réparation des ouvrages en béton armé

Suite à un propre diagnostic, les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

IV.2.1. Réparation des surfaces

1. Dégagement des armatures

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion.

S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage).

Pour être sûr d'une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant selon AFNOR

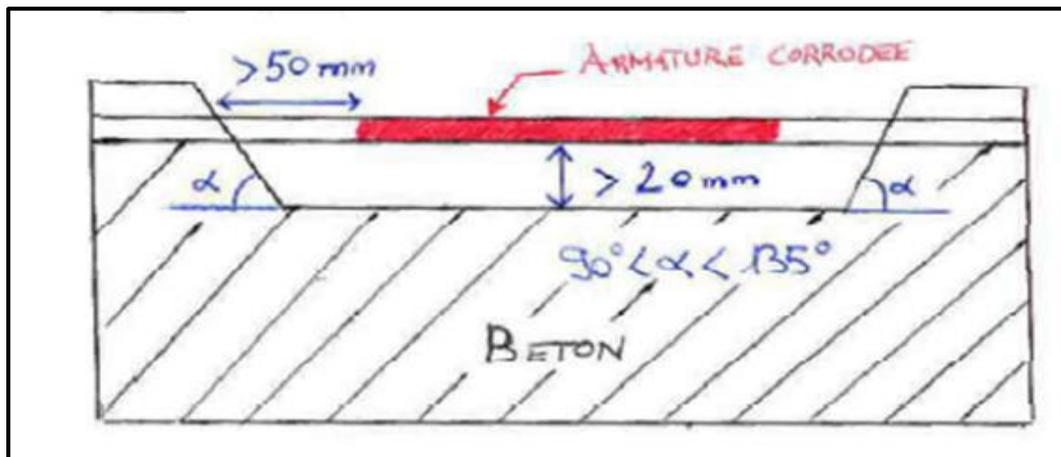


Figure IV-1 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101.

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure.

Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

Pour limiter les risques d'apparition de la corrosion, une protection immédiate des armatures, par un produit convenablement choisi, est nécessaire surtout si l'enrobage final ne pourra pas être de la même valeur prévue dans les règlements.

Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation.

2. Le ragréage

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier.

A. Mode opératoire

Selon « Weber » (une entreprise de solutions pour la construction et la rénovation)

1. Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant

2. Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer.
3. L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produit choisit entre 2 et 100 mm (indiqués par le fournisseur)
4. Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge



Figure IV-2 : Gauche à droite ; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche.

B. Caractéristiques des matériaux

Le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Tenue verticale sans coffrage
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support
- Adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support
- Imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs
- Coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support
- Bonne protection des aciers

Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque « NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique ».

3. Le béton projeté

Lorsque les surfaces de béton à réparer sont importantes, la méthode du béton projeté est une option souvent utilisée. Puisque ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.

A. Technique de projection

Projeté avec une force assez importante, le béton se place et se compacte au même instant, ce qui le différencie du béton conventionnellement coulé et ensuite vibré. Ce procédé permet de produire un béton plus dense, homogène et imperméable, ayant une surépaisseur moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques.

La résistance en compression du béton projeté a, selon la norme NBN EN 14487-1, un minimum de 40 Mpa. Un mélange soigneusement réalisé, permet l'application de ce béton sur toutes les surfaces même les surfaces verticales et en surplomb.

Il existe principalement deux techniques de projection du béton suivant le moment d'introduction de l'eau de gâchage dans la chaîne. En projetant par voie humide, le béton gâché est pompé jusqu'à la lance, alors que par voie sèche le mélange de ciment et de granulats, sans l'eau, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau s'ajoute en bout de lance.

Différentes méthodes vont présenter de différents résultats. Par voie sèche, le rapport E/C est évidemment plus faible, on obtiendra alors une résistance plus élevée que par voie humide.

Mais on aura un dégagement de poussière plus important et un risque de détérioration d'un support fragile.

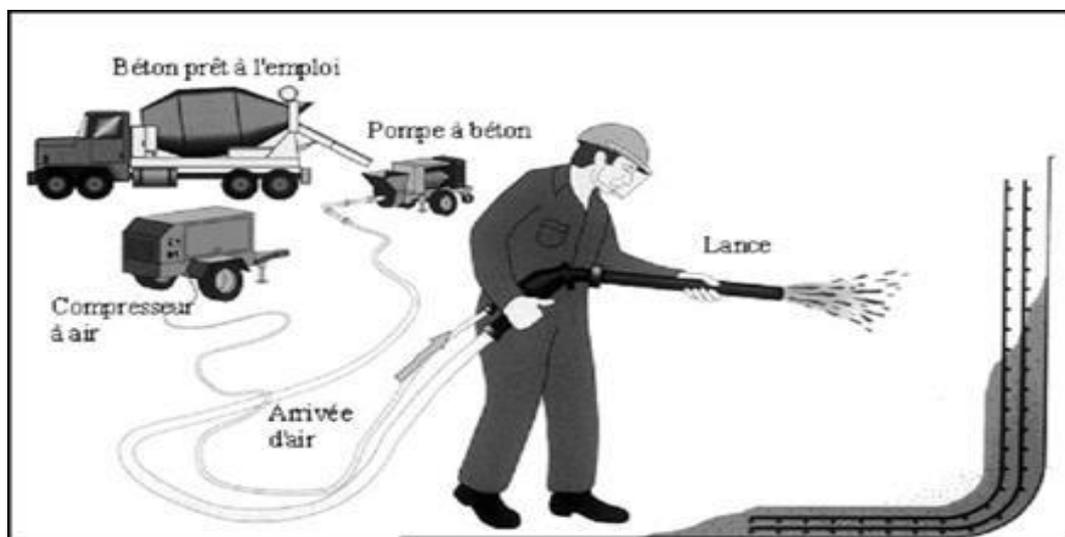


Figure IV-3 : projection par voie humide.

- Avantage : Ici Le contrôle de la qualité est simple, puisque l'on utilise un béton conventionnel (le dosage des constituants du mélange est connu)
- Désavantage : Ici le procédé ne peut être arrêté, car le mélange eau-ciment est préalable.

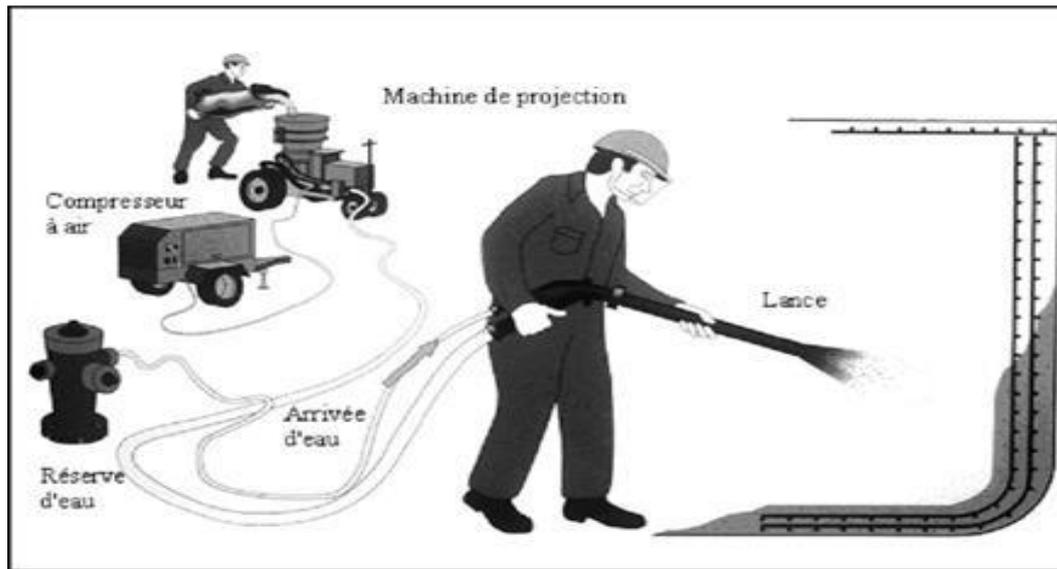


Figure IV-4 : projection par voie sèche.

- Avantages : Ce procédé peut être arrêté et continué à tout moment durant les travaux. En effet, le contact ciment-eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible par avant si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées sont facilement obtenues puisqu'il permet d'avoir de faibles rapports eau-liant.
- Désavantage : Le dosage de l'eau dans le mélange se fait directement à la lance, par le lancier, ce qui complique le contrôle de la qualité.

B. Mode opératoire

Le mode opératoire doit être conforme aux normes (NF P 95 102, NF EN 934-2) et aux recommandations du Fascicule n°3 du STRRES et de l'ASQUAPRO.

La mise en œuvre se fait à l'aide d'une machine à projeter qui est transporté à travers un boyau et projeté pneumatiquement à très grande vitesse sur une surface. L'air expulsé et le béton compacté, par la puissance de projection et l'impact sur la surface, permettent au matériau de se supporter sans affaissement, même sur une surface en surplomb. Tout comme pour la méthode de réparation par ragréage, il est nécessaire de dégager les armatures en suivant les descriptions de la partie 1 de ce chapitre.

Il est possible d'appliquer un passivant (par brossage, par application au pinceau, etc.) sur les armatures réparées pour diminuer les risques de réapparition de la corrosion. Cette

application peut se faire dans le cas du béton projeté par voie humide, mais n'est pas possible lors de la projection par voie sèche, parce que la protection serait abimée.

C. Matériaux utilisés

Dans ce sens, les caractéristiques des matériaux de cette technique sont similaires à ceux du mortier du ragréage. Les produits doivent être conformes à la norme NFP 18-840 ou être admis à la marque « NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique ».

D. Etude comparative (Ragréage avec passivant v/s Béton projeté)

	Remplacement du béton par ragréage avec passivant	Remplacement du béton par béton projeté
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Petites destructions localisées de béton, pas de risque de déstabilisation de la structure. Adapté aux petites surfaces. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place du mortier de réparation plus rapide. - Béton moins poreux, donc moins sensible aux chlorures. Adapté aux grandes surfaces.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup de main d'œuvre nécessaire. - Délais plus long. - Nécessite un revêtement imperméabilisant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de déstabilisation suite à une enlevée importante du béton. - Surcharges possibles => recalcul de la structure. - Pas adapté aux petites surfaces.
Contraintes phase travaux	<ul style="list-style-type: none"> - Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée.
Durée de vie estimée	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. - Limité par rapport à la présence de chlorures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. - Limité par rapport à la présence de chlorures.

	- Améliorée si protection complémentaire.	- Améliorée si protection complémentaire.
--	---	---

Tableau IV-1 : Tableau comparatif (Ragréage v/s Béton projeté).

4. Tissus de fibres de carbone

Les matériaux composites constitués de fibres dans une résine polymère, également connu sous le nom de polymères renforcés de fibres (PRF), ont apparue comme une alternative aux matériaux et techniques traditionnelles.

A. Matériaux

Le renforcement par des PRF-carbones peut être appliqué sur différents types de structures tels que le béton armé, le bois, les structures métalliques.

Propriétés	Unité	Fibre de Carbone		Aciers	
		Torayca H.R. T 300/T 300J/T 700SC	Composites carbone	E 235	HR
Densité	-	1.75 à 1.80	1.53	7.85	7.85
Propriétés mécaniques (sens longitudinal)					
<u>Traction</u>					
Contrainte de rupture	Mpa	3530 à 4900	1760 à >2500	315	1860
Module	Gpa	230	125 à 165	210	210
Limite d'élasticité	Mpa	3530 à 4900	1760 à >2500	235	1600
Allongement à la rupture	%	1.5 à 2.1	1.1 à 1.9	23	3 à 7
<u>Compression</u>					
Contrainte de rupture	Mpa	-	1370 à 1570	315	1860
Module	Gpa	-	125 à 165	210	210
Propriétés mécaniques (sens transversal)					
<u>Traction</u>					
Contrainte de rupture	Mpa	-	80	315	-
Module	Gpa	-	7.8 à 8.8	210	-
Limite d'élasticité	Mpa	-	65 à 80	235	-
Allongement à la rupture	%	-	0.9 à 1.1	23	-

Tableau IV-2 : Comparatif de la fibre de carbone avec l'acier.

Le tableau suivant montre les différentes propriétés mécaniques et physiques des fibres de carbone et des aciers usuelles.

Les PRF sont légers, non corrosif, et présentent une résistance élevée à la traction. L'intérêt de leur utilisation se trouve dans :

- Leur faible densité.
- Leurs propriétés mécaniques longitudinales.
- L'absence de corrosion.
- Leur bonne tenue à la fatigue.
- Leur facilité de manipulation, en outre, ces matériaux sont facilement disponibles sous plusieurs formes.

Les principaux inconvénients des PRF sont les suivants :

- Une anisotropie marquée.
- Un comportement fragile à la rupture.
- Un prix élevé comparé à l'acier.

B. Mode opératoire

Cette technique est intéressante dans le cas de perte de section d'acier importante, et quand la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter.

Cette méthode consiste à coller des bandes de toile de fibres de carbone aux surfaces déficientes.

Les étapes d'applications suivantes, selon « ASLAN FRP i », sont nécessaires :

1. Une préparation de la surface par jet de sable ou de l'eau doit être effectuée pour exposer les surfaces des agrégats fins. Il existe des normes et de recommandations pour la préparation de la surface tel que : ACI 546R et ICRI 0370.
2. Effectuer des tests d'arrachements (un procédé, à proximité de la surface, dans lequel un disque circulaire en acier est collé à la surface du béton avec une résine époxy ou polyester. La force nécessaire pour tirer de ce disque à partir de la surface, avec une couche de béton fixé, est mesurée).
3. Mesurer la régularité ou la planéité de la surface préparée. Une surface inégale se traduira par pelage prématuré du stratifié. Ceci est mesuré en plaçant une règle droite contre la surface préparée. Les zones irrégulières doivent être portées avec un mortier de nivellement ou un mastic.
4. Avant d'appliquer l'adhésif structurel au tissu CFRP, le côté sablé ou rendue rugueuse du stratifié est essuyé avec de l'acétone ou un autre solvant jusqu'à ce que tout résidu en excès est retiré de la plaque de carbone.
5. Un adhésif structurel est appliqué à la fois au carbone et à la surface du béton.

6. Le tissu est soigneusement positionné et pressé en place en utilisant un rouleau en caoutchouc dur pour obtenir une épaisseur de ligne de liaison entre 2mm à 3mm. L'adhésif en excès est ensuite essuyé sur les côtés avant qu'il puisse durcir.

7. Pour faciliter l'inspection de contrôle de qualité, des plaques de test adjacentes à la zone en cours de renforcement doivent être préparés simultanément à chacune des opérations ci-dessus. Un test d'arrachement peut alors être effectué pour valider une installation correcte.



Figure IV-5 : Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone.

IV.2.2. Conclusion

On a vu les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé, mais n'importe qu'elle méthode est utilisées, le but est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de satisfaire cette condition par l'ajout d'un autre matériau.

On cherche à ce que la structure puisse reprendre les charges qui lui sont appliquées et même un supplément de charge si c'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires.

IV.3. Protection des ouvrages en béton armé

Une fois diagnostiqué puis réparé, il est utile de prévoir une protection de l'ouvrage afin de rendre durables les réparations pour éviter une réapparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Le schéma suivant recense les principales catégories de méthodes existantes :

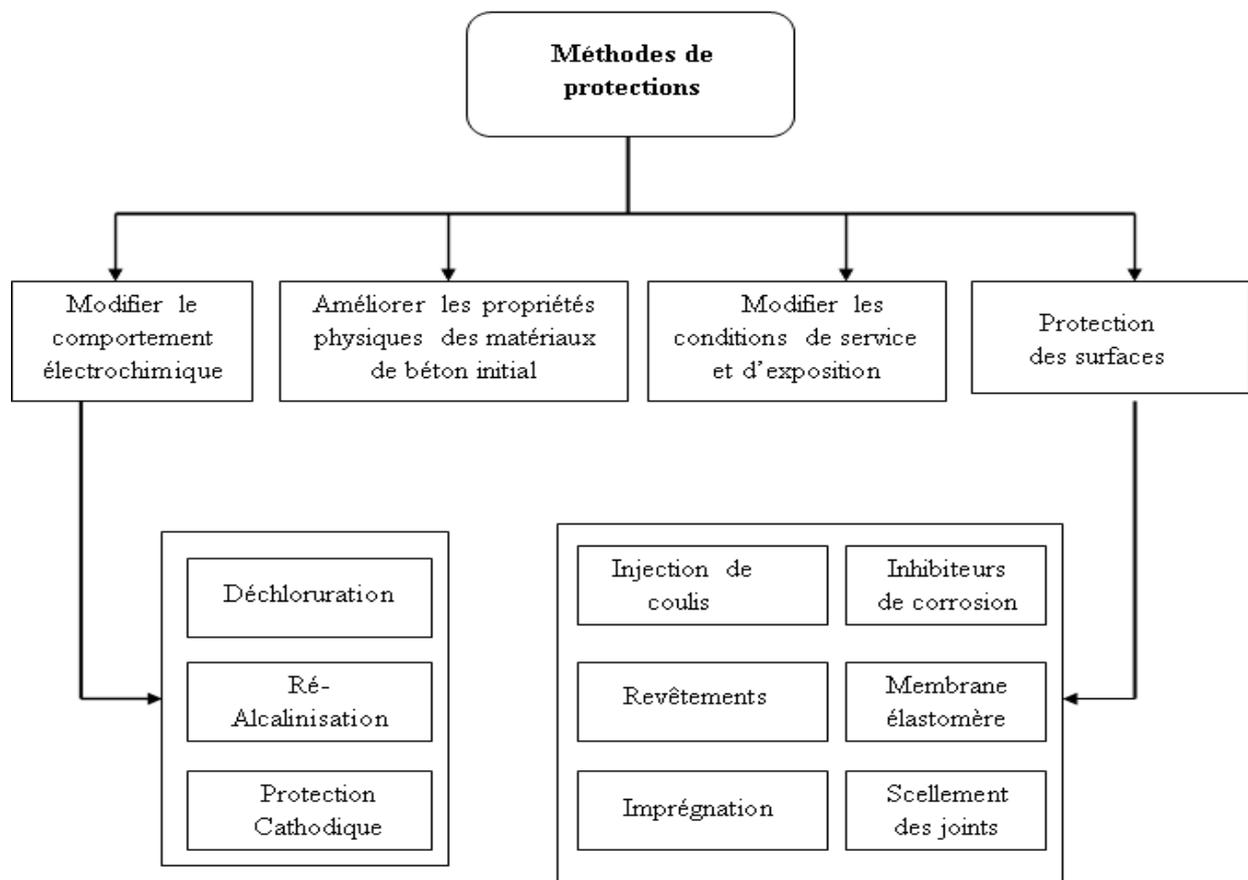


Figure IV-6 : Résumé des méthodes de protections.

Ces méthodes permettent soit de ramener au béton ces caractéristiques mécaniques et chimiques initiales, soit de le protéger contre les attaques structure. Dans le but de rallonger sa durée de vie ainsi qu'augmenter ses capacités à absorber ces attaques et la vieillesse.

Dans un premier temps, le procédé de protection le plus logique sera d'éviter ces problèmes en supprimant les sources de ceux-ci, et en renforçant le matériau faible ; modifier les conditions de service et d'exposition, Améliorer les propriétés physiques des matériaux de réparation ou du béton initial (figure 11, les deux premières méthodes).

Puisqu'on est en face des ouvrages déjà construits puis réparés, on ne s'intéressera pas dans cette partie à ces méthodes de protection nécessitant une analyse en stade de pré-construction

; mais on se dirigera vers des procédés de protection des surfaces et à la modification du comportement électrochimique des matériaux ; en stade de post-construction et souvent de post-réparation.

IV.3.1. Protection des surfaces

Un grand nombre de méthodes de protection en usage utilisent une barrière qui isole ou modifie l'état de service agressif. L'isolation et modification de l'état de service permet au béton protégé de durer plus longtemps et/ou d'améliorer sa performance. Les barrières appliquées sont une vaste catégorie de revêtements, produits d'étanchéité, membranes, scellement des joints et des techniques d'injection de coulis.

1. Imprégnation

C'est le traitement d'une surface de béton avec un matériau qui pénètre ultérieurement dans les pores de la structure. Il y a trois types de base : hydrophobe, de remplissage partiel et de remplissage complet. Chaque type modifie le comportement de la surface y compris la transmission de vapeur d'humidité et l'absorption du liquide.

L'imprégnation des surfaces en béton est une technique courante qui est généralement utilisée pour contrôler le flux de l'humidité entrant et sortant de béton. Les techniques d'imprégnation nécessitent une surface propre capable d'absorber des solutions avec des pores et capillaires ouverts, qui peuvent être obtenus par décapage abrasif, hydro décapage ou grenailage des surfaces en béton.

L'imperméabilité des surfaces en béton peut être réalisée en revêtant les surfaces des pores avec un composé hydrophobe. Les silanes et siloxanes³ sont les plus communs. Lorsque ces composés sont absorbés dans la structure des pores (mais ne les remplit pas), une réaction chimique se produit entre les scellants et le silicate de la structure en béton. Ils produisent une barrière efficace contre l'infiltration de l'eau et des agents agressifs, tout en permettant à la vapeur d'eau de passer.

Un autre procédé d'imprégnation de la surface de béton comporte des composés qui sont absorbés dans la structure de pores et remplit, ou partiellement remplit, les passages dans le béton. Il existe deux types de matériaux utilisés : d'une part, ceux qui réagissent avec les constituants de la matrice de ciment (tels que le silicate de sodium), et d'autre part, ceux qui réagissent et durcissent seuls (comme l'époxy, méthacrylate et polyester).

Les avantages offerts par ces enduits protecteurs sont les suivants :

- Résistance au gel-dégel augmenté.
- Réduction de l'infiltration de l'eau et des produits chimiques agressifs, tels que les chlorures.

2. Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques permettant de réduire l'exposition à la corrosion, même tout le processus de corrosion entièrement.⁴

En général, le mécanisme de l'inhibiteur est un ou plusieurs des trois qui sont citées ci-dessous :

- L'inhibiteur est chimiquement adsorbé sur la surface du métal et forme un film mince de protection à effet inhibiteur ou par combinaison entre les ions d'inhibiteur et de la surface métallique.
- L'inhibiteur entraîne une formation d'un film de protection d'oxyde de métal.
- L'inhibiteur réagit avec un composant corrosif potentiel présent dans les milieux aqueux et le produit est un complexe.^{5,6}

Il existe différentes catégories d'inhibiteurs de corrosion. Il est possible de les classer selon leur mode d'action, à savoir :

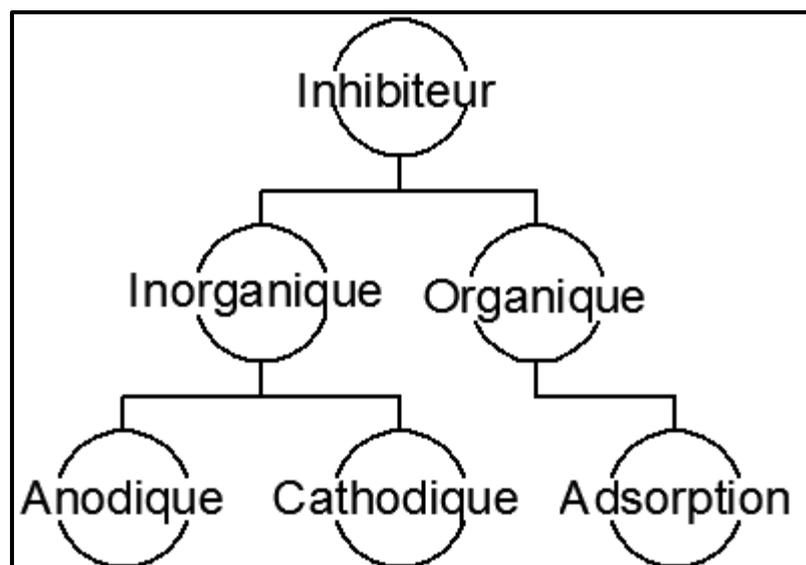


Figure IV-7 : Catégories des inhibiteurs de corrosion.

Les inhibiteurs anodiques réagissent avec les cations métalliques produits sur l'anode, formant généralement, des hydroxydes insolubles qui se déposent sur la surface métallique en tant que film insoluble et imperméable à l'ion métallique. De l'hydrolyse des inhibiteurs se

traduit par des ions OH⁻. Les chromates, nitrates, tungstates, molybdates sont des exemples d'inhibiteurs anodiques.⁶

Les inhibiteurs cathodiques agissent soit en ralentissant la réaction cathodique elle-même ou en formant une barrière de précipités insolubles sur le métal. Ainsi, limitent le contact métallique avec l'environnement, ce qui empêche l'apparition de la réaction de corrosion. Pour cette raison, l'inhibiteur cathodique est indépendant de la concentration, par conséquent, ils sont beaucoup plus sûrs que l'inhibiteur anodique. ^{7,8}

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs, agissent comme cathodiques, anodiques ou comme inhibiteurs cathodiques et anodiques en même temps. Néanmoins, d'une manière générale, agissent par l'intermédiaire d'un processus d'adsorption de surface, désignée comme une filmogène. Ces inhibiteurs accumulent un film protecteur hydrophobe par adsorption des molécules sur la surface métallique, ce qui fournit une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte. Ils doivent être solubles ou dispersibles dans le milieu environnant le métal.

3. Les Revêtements

Les revêtements protecteurs de béton comprennent une grande variété de produits chimiques. Des formulations sont disponibles pour répondre à diverses conditions d'exposition et de services. Pour développer une spécification de la méthode et du matériel, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Déterminer les objectifs de protection
- Déterminer les conditions de service et d'exposition
- Déterminer l'environnement d'installation
- Sélectionner les matériaux / systèmes qui répondent le mieux aux conditions de service, d'exposition, et d'installation
- Déterminer la préparation de surface nécessaire pour recevoir les matériaux de réparation sélectionnés
- Déterminer la gamme de conditions exigées par les matériaux choisis
- Déterminer (en fonction des conditions de surface prévue) le nombre de couches ou taux d'application nécessaires pour atteindre le niveau de continuité.

- Déterminer les exigences d'un prétraitement. Une mise à niveau peut être nécessaire pour fournir à une surface rugueuse une apparence lisse après qu'un revêtement est installé.
- Déterminer tout traitement de fissure requise
- Déterminer les méthodes d'assurance qualité pour la préparation de surface, adhérence, épaisseur et qualité des matériaux

Il est important que ces matériaux aient une élasticité suffisante pour résister aux fissures.

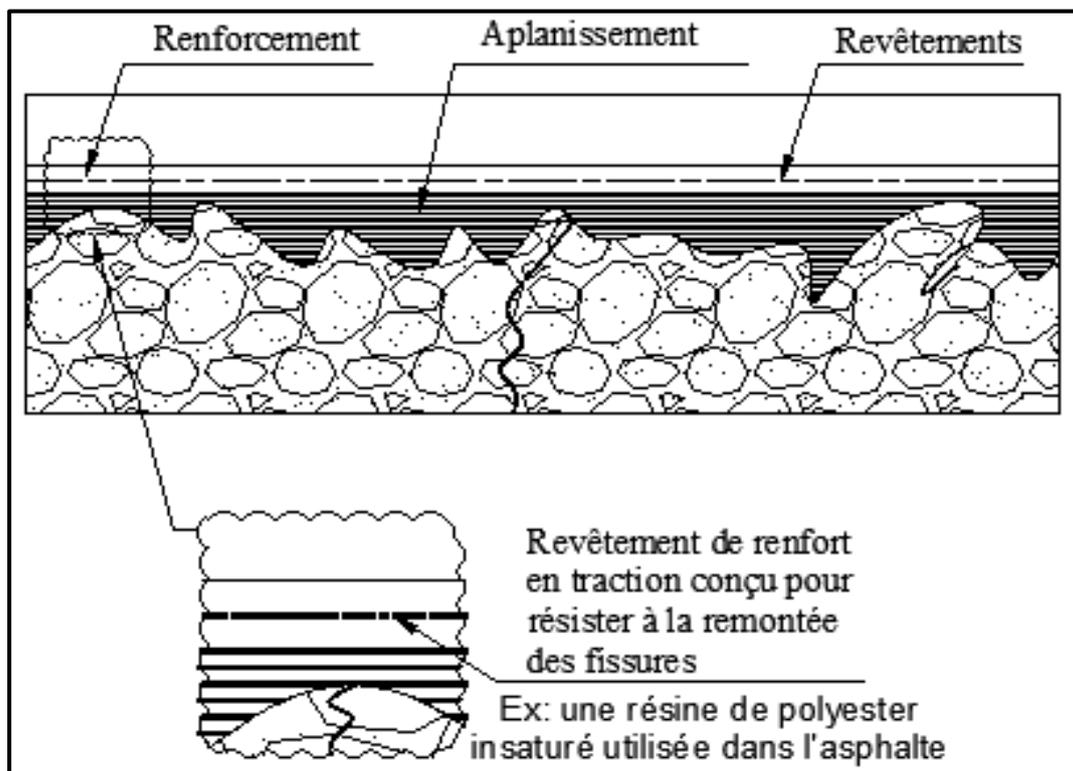


Figure IV-8 : exemple de revêtement des surfaces.

Les méthodes d'application de ces revêtements sont définies par le DTU 42.1. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique).

4. Membrane élastomères

Les membranes élastomères sont des liquides thermodurcissables, liquides de polymère durci ou de matériaux effectués. Leur fonction principale est de minimiser l'absorption de liquide par le béton. Les membranes élastomères diffèrent des revêtements en raison de la

capacité de la membrane à se déplacer et de fléchir sans rupture. Leurs applications typiques comprennent : les ponts de circulation, toitures terrasses, et étanchéité sous-sol.

Les membranes élastomères sont conçues pour protéger le béton contre l'intrusion de liquide dans ou à travers les fissures de béton, et, dans certains cas, les joints. Les membranes typiques utilisées sont des matériaux en feuille ou liquides.

Ces produits en feuilles comprennent : l'asphalte caoutchouté lié à du polyéthylène, PVC, néoprène, Hypalon, et butyle. Les membranes liquides appliquées in situ consistent à introduire des matières qui sont soit thermodurcissables, soit durcissables par humidité ou par réaction chimique. Après traitement, ces matériaux restent élastomère et forment une surface transparente. Des systèmes spécifiques comprennent : de l'asphalte appliquée à chaud, du néoprène et du polyuréthane.

La capacité d'un matériau ou d'un système particulier à s'allonger dans les conditions de service et d'exposition prévue est une fonction de :

- Capacité d'allongement.
- Épaisseur de la membrane.

Certaines membranes élastomères sont conçues pour accepter des piétons et des véhicules. Quelques systèmes comprennent un revêtement de circulation, qui est placé sur la membrane élastomère.

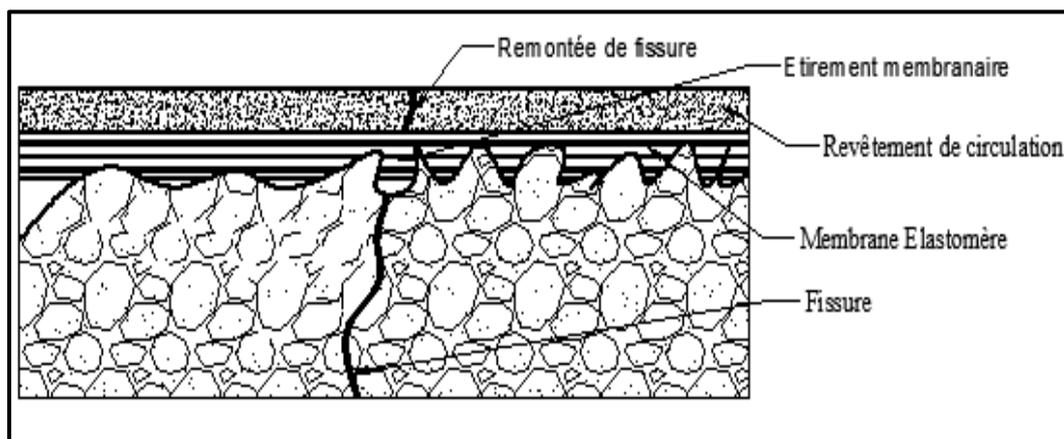


Figure IV-9 : application de membrane élastomère.

IV.3.2. Protection par méthodes électrochimiques

Cette partie présente les principales techniques électrochimiques utilisées pour réduire la corrosion dans les structures de béton armé : Protection cathodique(PC), Déchloration(DC), Ré-alkalinisation(RA).

Toutes les méthodes de maintenance électrochimiques ont en générale le même principe et méthode d'application pratique. Les principales différences sont la quantité de courant circulant à travers le béton et la durée du traitement.

Par l'intermédiaire d'un conducteur externe, dite anode ; un courant continu est dirigé à travers le béton de l'armature qui est ainsi amenée à agir en tant que cathode dans une cellule électrochimique. Le résultat final de la circulation du courant est d'arrêter la corrosion par repassivation des armatures par polarisation de l'armature à un potentiel plus négatif (PC), ou en enlevant les ions agressifs (DC), ou en rétablissant l'alcalinité de la solution interstitielle(RA).

1. Protection Cathodique

La protection cathodique est basée sur le changement du potentiel de l'acier à des valeurs plus négatives, pour que le métal agit comme cathode et ainsi de réduire le courant de corrosion à des valeurs négligeables.

Avantages :

Dans l'application de la protection cathodique, deux méthodes principales sont utilisées, à savoir :

1. anodes sacrificielles : un métal très actif (anode) est relié à la barre d'armature et placé dans le même électrolyte. L'anode polarise le métal vers des valeurs cathodiques.

2. courant imposé : une anode inerte est raccordée à l'armature et un courant continu est appliqué pour décaler le potentiel vers des valeurs cathodiques

Les procédés cathodiques produisent une alcalinité sur la surface des armatures. A l'intérieur du béton, le courant est transporté par les ions proportionnellement à leur concentration. Les ions positifs se déplacent dans la même direction que le courant (de l'anode à la cathode), et les ions négatifs dans la direction opposée. Ainsi dans un béton contaminé par des chlorures, la circulation du courant présente une réduction de la teneur en chlorure à la surface des armatures ou une réduction de la pénétration de chlorure dans le béton.

Ces effets sont avantageux dans le sens où ils favorisent une augmentation du rapport $\text{OH}^- / \text{Cl}^-$ et favorisent ainsi les phénomènes de passivation.

C'est pourquoi cette méthode est particulièrement adaptée lorsque la corrosion est causée par la contamination de chlorure.

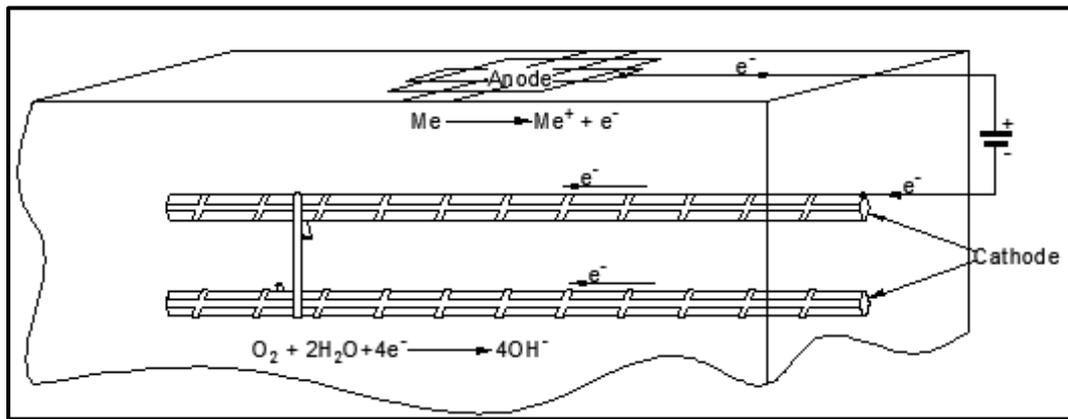


Figure IV-10 : La protection cathodique au moyen d'anodes sacrificielles ou à courant imposé.

Désavantages :

- La perte d'adhérence entre le béton et renforts⁹ :

À des potentiels très négatifs, lorsque des densités de courant élevées sont appliquées, une perte d'adhérence entre les barres d'armature et le béton peut se produire. De nombreuses incertitudes demeurent quant à ce phénomène. Pour une polarisation à long terme, un potentiel limite inférieure est indiquée (-1,1 V par rapport à l'électrode au calomel saturée¹⁰).

- Fragilisation par l'hydrogène¹¹

L'effet potentiellement néfaste le plus important est la fragilisation de l'acier par l'hydrogène atomique généré en réaction cathodique. Certains types d'aciers à haute résistance utilisés dans la construction précontrainte peuvent être soumis à la fragilisation par l'hydrogène si leur potentiel a des valeurs à laquelle le dégagement d'hydrogène peut avoir lieu. Dans les milieux alcalins ($\text{pH} > 12$), avec renforcement protection cathodique, le dégagement d'hydrogène ne peut se produire à potentiel plus négatif que -950 mV environ (par rapport à ECS). Par conséquent, pour éviter le risque de fragilisation par l'hydrogène de l'acier sensibles qu'il convient de fixer un potentiel de limite inférieure de -900 mV (par rapport à ECS).

2. Déchloration

La déchloration est un procédé simple de sorte que les ions chlorure sont éliminés du béton contaminé par migration. Une anode noyée dans un support d'électrolyte, solution aqueuse, est fixé à la surface du béton. L'anode est de préférence un maillage de fil de titane ou une maille d'acier d'armature. L'anode et l'acier d'armature dans le béton (cathode) sont connectés aux deux bornes d'un courant continu tel que l'anode est chargée positivement et l'armature est négative.

Avantages :

Les ions chlorure étant ions négatifs migrent vers l'électrode positive, l'anode. Comme c'est externe au béton, les ions chlorure quittent le béton et se concentrent autour de l'anode. Ainsi, la teneur en chlorures du béton est réduite, en particulier sur et autour de l'acier d'armature chargé négativement où le béton à toutes fins pratiques devient libre de chlorures.

En même temps, la production électrolytique d'ions hydroxyle au niveau de la surface des armatures résulte en un pH élevé généré autour de l'acier. Par conséquent, lorsque le processus est terminé et l'installation est retiré, l'acier d'armature sera libre des chlorures et le béton sera fortement alcalin. Il en résulte une repassivation de l'acier d'armature.

La déchloruration peut être adapté pour les structures ayant une valeur architecturale telles que les monuments, puisque la surface du béton reste inchangée après le traitement.

Désavantages :

Lors de l'extraction de chlorure, des ions hydroxyle sont formés autour de l'acier d'armature, en augmentant localement le pH et les ions de sodium et de potassium s'enrichissent dans l'acier. Ces changements pourraient stimuler une alcali-réaction. Pour l'application pratique de la déchloruration sur les structures avec des granulats potentiellement sensibles, il est recommandé d'évaluer la réactivité potentielle de l'agrégat en considérant sa source géologique et d'étudier chimiquement le béton. Si une expansion nuisible se trouve dans les tests représentatifs, la déchloruration ne doit pas être recommandée.

3. Ré-Alcalinisation

La ré-alcalinisation est une méthode pour arrêter la corrosion des armatures induite par carbonatation. Le pH du béton autour de l'acier augmente, et la passivation de la solution interstitielle du béton est restaurée.

La technique consiste à faire passer un courant à travers le béton à l'armature par un treillis appliqué à l'extérieur de l'anode qui est attaché à la surface du béton et noyé dans un électrolyte. Dans l'application classique, une pâte de cellulose pulvérisée avec une solution molaire de carbonate de sodium est utilisée comme électrolyte.

L'électrode extérieure (anode) et l'armature agissant comme cathode à l'intérieur sont connectées à une source de courant continu. Pendant le traitement, l'électrolyte est transporté dans le béton carbonaté. Le mécanisme de transport dominant peut varier, mais l'électro-

osmose¹²ⁱⁱ et la migration des ions sont les deux principaux contributeurs. Simultanément, l'électrolyse à la surface de l'acier produit un environnement très alcalin.

Avantages :

La ré-alcalinisation du béton est un traitement électrochimique non permanent, donc, le traitement se termine après 1-2 semaines appliquant un courant de l'ordre de 0,8 à 2 A/m². Après le traitement, l'anode doit être enlevée, et la surface du béton ne se modifie pas. C'est pourquoi la ré-alcalinisation est particulièrement adapté pour les structures avec des valeurs architecturales telles que les monuments.

Désavantages :

- Alkali-réaction

La teneur accrue en ions alcalins et la production d'ions hydroxyles puissent théoriquement causer une Alkali-réaction accélérée pour un béton avec granulats réactifs. D'autre part il a été conclu par les experts que le béton alcalinisé s'étend comme le béton de référence, puisque le traitement n'a pas augmenté la concentration d'hydroxyle jusqu'au seuil d'expansion.

- La perte d'adhérence entre le béton et renforts :

Le courant circulant pendant la ré-alcalinisation augmente les concentrations des ions alcalins et hydroxyles dans l'eau des pores à la l'interface béton/armatures. Cela pourrait théoriquement modifier la structure des pores et la force d'adhérence. En revanche, la charge totale circulante est beaucoup plus faible que celle de la déchloruration (de l'ordre de 100 à 200 Ah/m²) ce qui est beaucoup plus faible que celles rapportées pour provoquer une perte d'adhérence.¹³

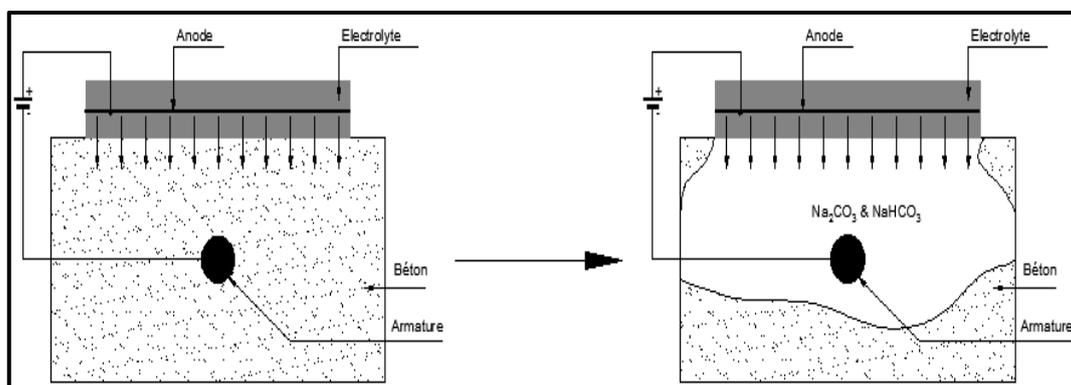


Figure IV-11 : Avant & Après.

IV.4. En Résumé

Méthode	Durée	Densité du courant
Protection cathodique	Permanente	10 mA/m ²
Déchloration	Ordre de quelques jours à semaines	1 mA/m ²
Ré-alcalinisation	Ordre de quelques semaines à mois	1 mA/m ²

Tableau IV-3 : Différences principales entre méthodes d'entretien électrochimiques.

Une étude comparative entre les méthodes de protections les plus utilisés¹⁴ :

	Revêtement imperméabilisant	Ré-alcalinisation	Inhibiteur de corrosion	Protection cathodique
avantages	Faible cout	Passive à nouveau les aciers de manière durable.	Possibilité d'application seule sur béton afin de protéger les aciers.	Empêche l'activité de corrosion.
Inconvénients	Nécessite un Revêtement résistant à la fissuration	<ul style="list-style-type: none"> - N'est efficace que pour la partie située entre l'anode et la cathode. - Nécessite une purge du support et réparation des épaufrures. - Les armatures doivent former un réseau électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité contestée. - Difficulté de contrôle de mise en œuvre - Nécessite une purge du support et réparation des épaufrures. - Les armatures doivent former un réseau électrique si forçage. 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessite une purge du support et réparation des épaufrures. -Les armatures doivent former un réseau électrique.
Contraintes phase travaux	Intempéries.	<ul style="list-style-type: none"> - Installation conséquente. - Réaliser des pontages entre toutes les armatures 	<ul style="list-style-type: none"> - Installation importante si forçage. - Renforcement des contrôles de mise en place. - Réaliser des pontages entre toutes les armatures si forçage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Installation conséquente. - Réaliser des pontages entre toutes les armatures.
Durée de vie estimée	10 ans	10 ans	10 ans	30 ans

Tableau IV-4 : Etude comparatives des méthodes de protection.

Conclusion

Le béton armé est un des matériaux de construction les plus couramment utilisés. Toutefois, en raison de changements dans les spécifications de conception, le vieillissement, les conditions environnantes, etc. - il y a un besoin de procédures pour la réparation des superstructures et des infrastructures en béton (armé ou précontraint). Ainsi, l'objectif global de ce rapport de recherche était d'introduire les méthodes les plus communes, rentables, et novatrices de réparation et de protection.

Plusieurs algorithmes peuvent être suivies, en ce qui concerne les méthodes de diagnostiques, les procédés de réparation et les techniques de protection. Après tout, on cherche toujours à redonner à la structure sa géométrie et sa puissance à reprendre les efforts qui lui sont appliqués.

Les différents algorithmes possibles pour la réhabilitation d'ouvrages en béton armé ne sont pas tous encore codifiées.

CHAPITRE V : DURABILITE DES STEP

V.1. Introduction

Le comportement chimique du béton exposé aux environnements agressifs, dépend de plusieurs facteurs à savoir : les propriétés des constituants du béton (eau, ciment, sable, gravier), la technique de mise en œuvre, les conditions climatiques et la nature des agents agressifs minérale soit-elle ou biologique.

La durée de vie des structures en génie civil situées aux environnements agressifs est variable, elle dépend du degré d'agressivité du milieu extérieure et de la vitesse d'altération du béton, cette dernière est liée à :

- ✓ L'altération des structures en béton par les eaux agressives.
- ✓ L'altération des structures en béton armée ou en acier par la corrosion des aciers.

Dans ce chapitre, on va relater quelques dégradations du béton destiné aux STEP dans la région de Guelma, et les causes principales des altérations du béton armé.

V.2. Notion de durabilité

La durabilité du béton des ouvrages en génie civil est définie comme étant la capacité du béton de rester en bonne forme et de bonne résistance mécanique à longue durée de vie sous l'effet des agents extérieurs soient des charges d'exploitations, dynamiques et autres ; ou sous l'effet des milieux plus ou moins agressifs, tels que les eaux agressives (eaux usées, eaux de mer, eaux de la nappe...etc.).

On peut admettre que le béton est d'autant plus durable par la difficulté de pénétration des agents agressifs dans les réseaux poreux du béton, sa durabilité dépend de deux grandeurs physiques à savoir : la perméabilité et la diffusivité.

La perméabilité décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression, mais la diffusion c'est un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration, donc la perméabilité dans les matériaux poreux dépend de la taille des pores, alors que la diffusivité, elle ne dépend que de l'interconnexion des réseaux poreux. [18]

V.3. Morphologie de la microstructure du béton

V.3.1. Hydratation du ciment

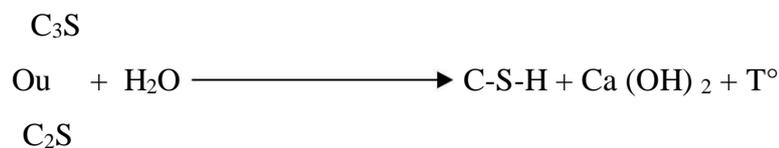
Le ciment n'est que le résultat du broyage du clinker après refroidissement et de l'ajout d'une quantité de gypse d'environ 5% comme régulateur de prise. Le produit de départ est le mélange des carbonates de calcium ou le calcaire (80%) et l'argile (20%), il cuit au four rotatif et sous l'effet de haute température (jusqu'à 1450 °C) où le clinker est obtenu. Les constituants principaux du clinker, qui représente à lui seul plus de 90% du ciment portland, sont les suivants :

- ✓ Silicate tricalcique C_3S ou $(3CaO \cdot SiO_2)$, dont le pourcentage entre (60% à 65%).
- ✓ Silicate bi calcique C_2S ou $(2CaO \cdot SiO_2)$, dont le pourcentage entre (10% à 20%).
- ✓ Aluminate tricalcique C_3A ou $(3CaO \cdot Al_2O_3)$, dont le pourcentage entre (8% à 12%).
- ✓ Alumino-ferrite tetracalcique C_4AF ou $(4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3)$, dont le pourcentage entre (8% à 10%).
- ✓ Autres (sulfates, alcalis, filler calcaire, impuretés, ...).

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment, c'est un processus complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former des nouveaux composés insolubles, et ils durcissent avec le temps suivant la figure (68). [19, 21]

La cinétique d'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente que celle du C_3S , les C_3S sont hydratés totalement pour augmenter la résistance mécanique du béton à court terme, l'hydratation plus lente du C_2S après 28 jours, conduit à l'amélioration de résistance à long terme. [20]

L'hydratation du C_3S et du C_2S se fait selon l'équation chimique suivante :



L'hydratation des aluminates tricalcique (C_3A) est très rapide, et les produits finaux de cette réaction sont des sulfoaluminate dont la forme la plus connue est l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$), la prise est très courte que le ciment est riche en C_3A .

La réaction de l'Alumino-ferrite tetracalcique C_4AF dégage peu de chaleur, et participe peu au développement de la résistance. [22]

Les produits finaux d'hydratation sont :

- Les silicates de calcium hydraté (C-S-H) qui jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide, ils représentent de 25% à 40% du volume du béton.
- La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et les sufloaluminates ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$).
- Des grains de ciment non-hydratés.
- Des espaces capillaires.

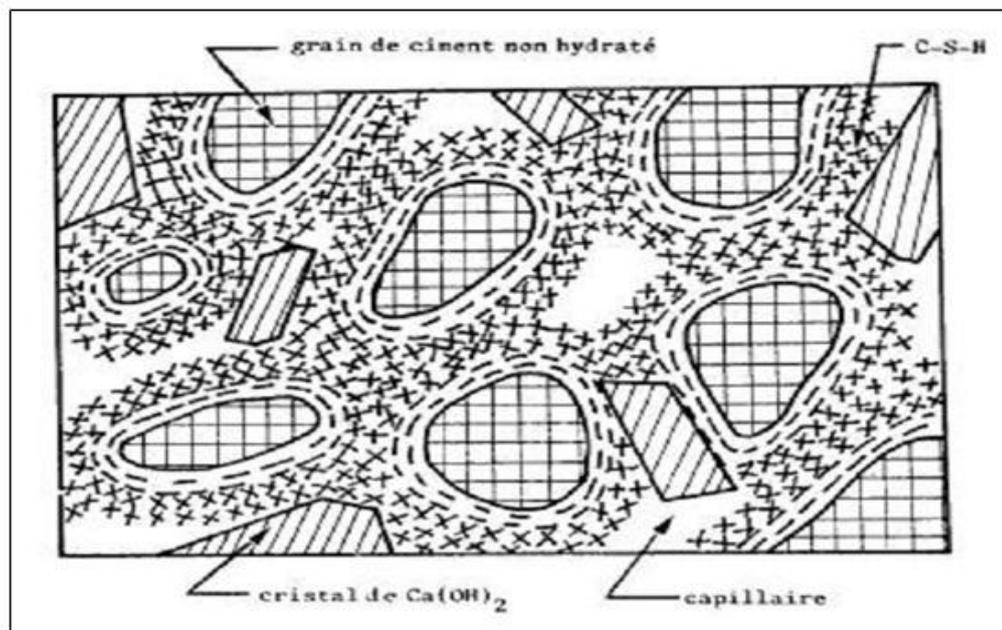


Figure V-1 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydratée. [22]

V.3.2. Nature de l'eau dans le béton

L'eau existante dans le béton n'est pas une seule phase homogène, mais elle se présente sous plusieurs états dans la matrice cimentaire hydratée, la méthode de classification de Sierra (1982), à titre d'exemple, consiste à diviser l'eau en deux parties : l'eau évaporable et l'eau non évaporable (Harmathy, 1965) comme montré sur la figure (69).

L'eau non évaporable comprend :

- **L'eau adsorbée la plus liée** : qui correspond à l'eau fixée entre les feuillets des particules de gel C-S-H.

- **L'eau chimiquement liée** : il est consommé au cours des réactions d'hydratation du ciment, et aussi elle est combinée avec d'autres composantes à l'intérieure des hydrates.
Alors que l'eau évaporable elle comprend donc :
- **L'eau adsorbée la moins liée** : qui correspond à l'eau adsorbée sur la surface externe des particules.
- **L'eau capillaire** : elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques.
- **L'eau libre** : qui correspond à l'eau formée de la phase condensée qui n'est plus dans le champ d'influence des forces superficielles. [22]

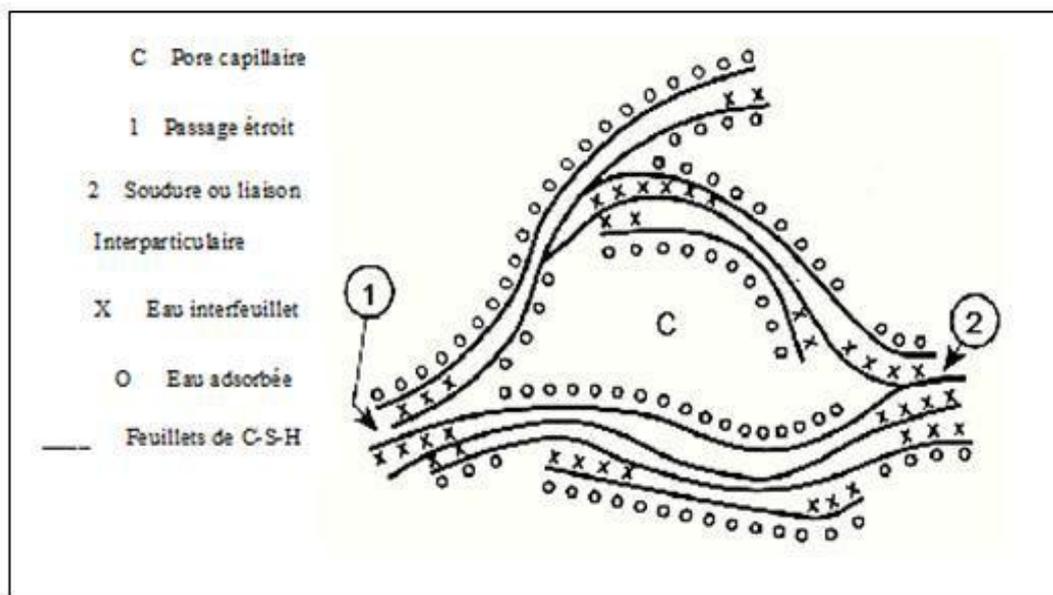


Figure V-2 : Modèle de Feldman et Sereda, revue par Sierra 1982. [22]

V.3.3. Structure poreuse

La structure du béton est caractérisée par l'existence de trois groupes des pores, on peut distinguer d'après la figure (70) que :

- **Les pores isolés** : se trouvent à l'intérieure, et ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.
- **Les pores interconnectés** : sont formés de l'espace continue dans le milieu poreux, et dont le rôle est de transporter des matières à travers le matériau, soit par la diffusion ou par la perméabilité.

- **Les pores aveugles ou bras mort** : qui sont interconnectés d'un seul cotés, ils peuvent être accessibles des fluides extérieurs, mais ils ne participent pas au transport des matières à travers le matériau.

Généralement, La porosité d'un béton courant est supérieure à 10%. [23]

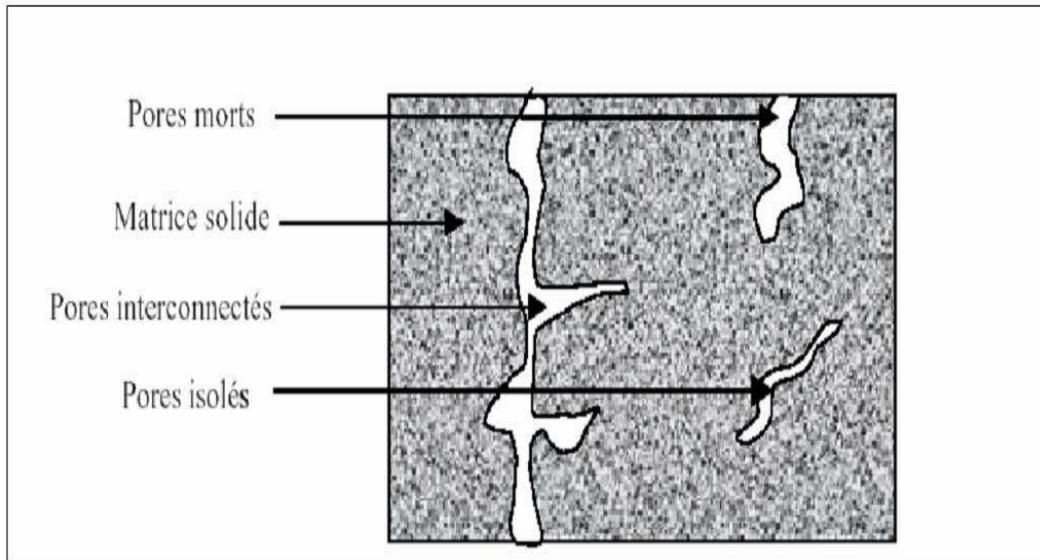


Figure V-3 : Représentation schématique d'un solide poreux. [23]

V.4. Mécanisme de dégradation du béton

V.4.1. Divers agents agressifs

La plus parts des altérations observées sur le béton sont d'ordre chimique ou physique, on peut classer les agents chimiques agressifs en quatre catégories :

- ✓ **Les gaz** : sont d'origine naturelle, ou par production de pollutions atmosphériques et de fermentation, soient : des dioxydes de carbone, de soufre, d'azote, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs chlorées ou l'ammoniac.
- ✓ **Les liquides organiques ou inorganiques** : sont influés par leurs effets purement physiques, qui agissent par leurs caractères acides ou basiques, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.
- ✓ **Les solides** : qui sont des sols agressifs ou de déchets d'origines diverses.
- ✓ **Les milieux biologiques** : sont des attaques chimiques sous l'effet des bactéries aérobies ou anaérobies. [24]

V.4.2. Modes d'action des agents agressifs

- ✓ **Mode d'action des gaz** : Le transfert de gaz dans le béton se fait par diffusion, il dépend du pourcentage de l'humidité relative à l'intérieure des pores du béton. Pour cela la quantité de gaz transférée dans le béton saturé, est plus petite ou négligeable, au contraire, elle devient assez importante avec la réduction d'humidité.

Les gaz ne sont pas agressifs mais du fait de leurs solubilités, ils peuvent former avec l'eau des solutions agressives.

- ✓ **Mode d'action des liquides** : ils peuvent se transférer dans le béton soient par un mouvement sous gradient hydraulique ou par capillarité, soit par diffusion ionique ou moléculaire.
- ✓ **Mode d'action des solides** : généralement les solides ne se transfèrent pas directement vers le béton, mais par leurs dissolutions dans l'eau.
- ✓ **Mode d'action des agents biologiques** : Les réactions biologiques peuvent conduire à la production des acides ou des gaz surtout l'hydrogène sulfuré (H_2S), ils entrent dans le béton par diffusion.

Les agressions chimiques entraînent presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pate de ciment. Alors que l'attaque des silicates et des aluminates de chaux hydratés, produits de réaction soient solubles ou insolubles, ne sont pas négligeables. Si les produits sont solubles, il en résulte l'augmentation de la porosité ou la perméabilité dans la matrice cimentaire hydraté. Mais dans le cas des produits insolubles, les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, les pores du béton seront comblés soit la diminution de la perméabilité du béton, dans le cas où les nouveaux produits sont expansifs, ils induits des dégradations sur la résistance mécanique. [35]

V.5. Critères généraux de la durabilité du béton

La durabilité des ouvrages en béton est reliée par la porosité du béton et la capacité de transfert des agents agressifs, la porosité dépend de plusieurs critères :

V.5.1. Rapport eau/ciment (E/C)

Le rapport E/C est un critère très important de la durabilité du béton, plus le rapport E/C est faible, plus la porosité diminue et plus la résistance à la compression est plus élevée.

La réduction de rapport E/C permet aussi de réduire le diamètre des pores, ainsi que la production d'un réseau de pores plus fin et discontinu. [1]

La figure (71) montre la relation entre le rapport E/C et la perméabilité de la pâte du ciment durci.

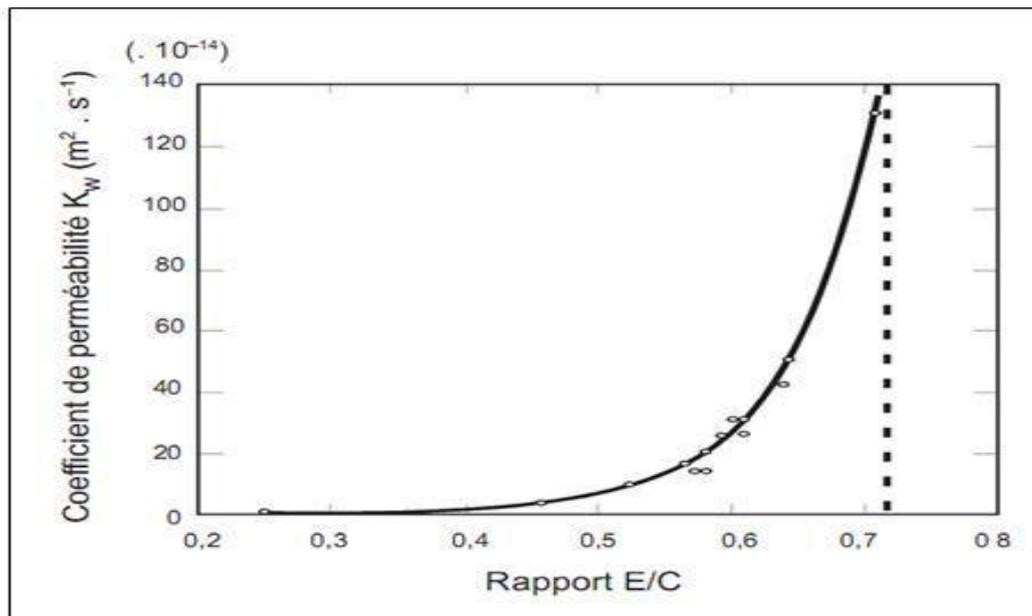


Figure V-4 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C. [1]

V.5.2. Nature et dosage de ciment

Généralement l'agressivité du milieu extérieur nous indique le choix du type de ciment ainsi que le dosage, pour obtenir une meilleure performance en présence d'agents agressifs, comme d'utiliser un ciment de faible teneur en C_3A dans un milieu sulfatique ou marin, d'utiliser un ciment ne libérant pas ou peu de portlandite dans un milieu acide.

Le dosage en ciment est plus élevé, entraîne sous l'action d'hydratation continue de la pâte de ciment, une porosité plus faible et une résistance à la compression plus élevée. [36]

V.5.3. Les ajouts minéraux

Pour améliorer la durabilité du béton dans les milieux agressifs, on peut modifier la composition du ciment pendant l'hydratation par des additions minérales (laitier, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, fumée de silice...), ayant pour objet d'augmenter la résistance mécanique et minimiser la perméabilité du béton.

La figure (72) montre la relation entre la résistance à la compression et la perméabilité du béton confectionné avec des ciments composés aux cendres volantes et aux laitiers. Nous constatons que le béton avec ajouts de laitier est de perméabilité plus faible et de meilleure résistance à la compression. [23]

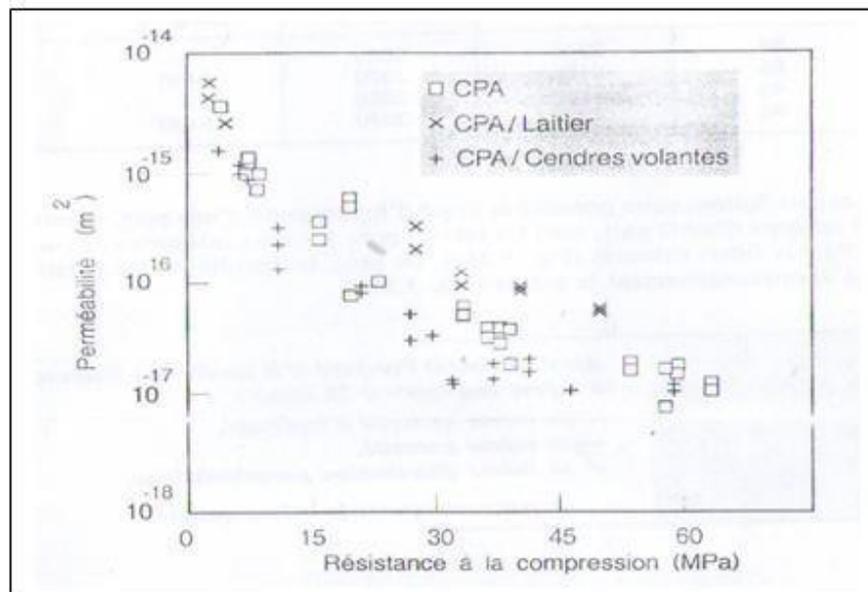


Figure V-5 : Corrélation approximative entre la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment et leur résistance mécanique. [23]

V.5.4. Zone d'interface de la pâte de ciment et granulats

Généralement, la zone d'interface pâte-granat présente une plus grande densité de microfissures, et l'existence de pores de grand diamètre, qui deviennent un réseau de cheminement privilégié pour le transport des gaz et des liquides. L'épaisseur de cette zone augmente avec le diamètre des granulats et avec le rapport E/C, mais elle ne dépasse pas de 50 micromètre. D'après la figure (73) et pour un même rapport d'E/C, la perméabilité du béton est plus élevée que celle du mortier. [23]

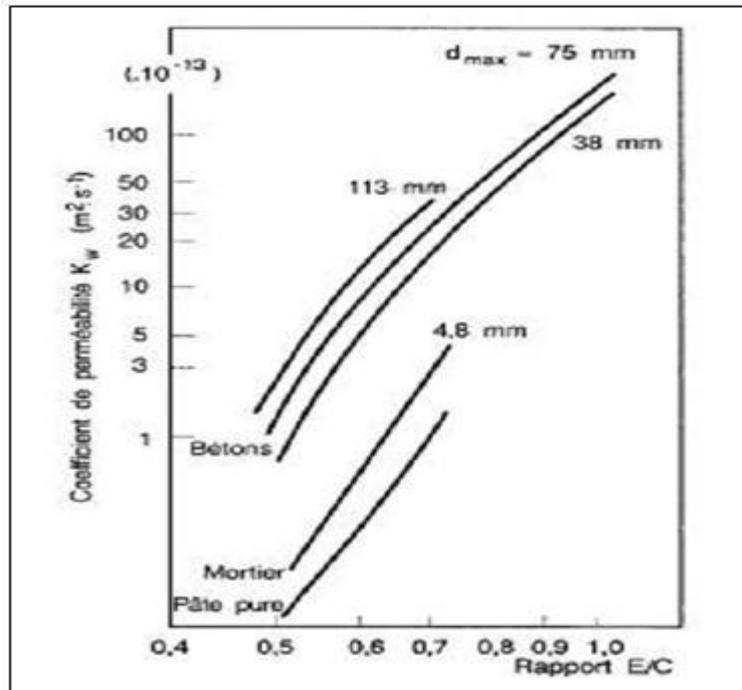


Figure V-6 : Influence d'E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons. [23]

V.5.5. Durée de mûrissement

La durée de cure humide est très importante sur la perméabilité du béton, on peut dire que l'augmentation de la durée de cure minimise la perméabilité du béton d'après la figure (74).

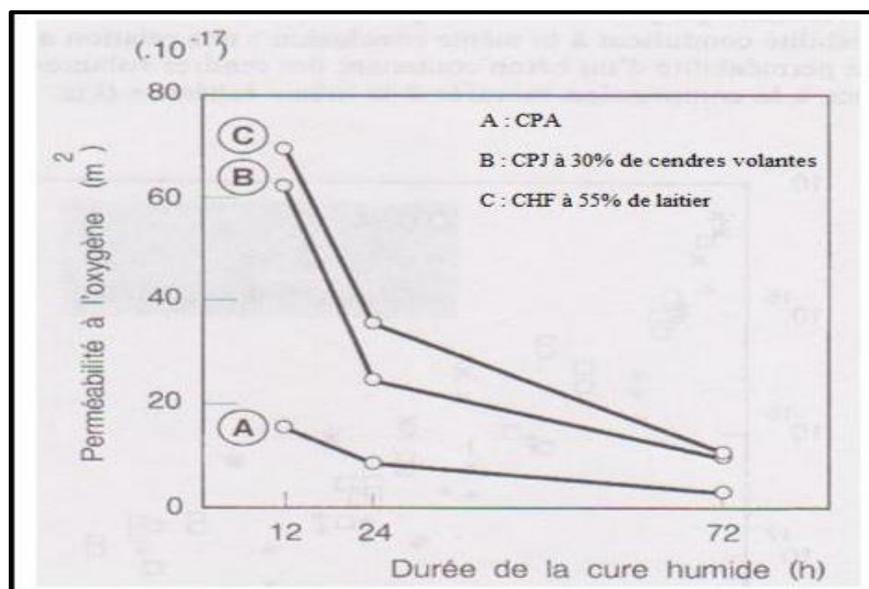


Figure V-7 : Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment. [23]

V.5.6. Effet de la température sur le béton

Le bétonnage au temps chaud sous l'effet de température extérieure qui dépasse 35°C, accélère la prise du ciment et diminue rapidement la plasticité du béton, accroît la porosité intérieure et favorise la fissuration du béton sous l'effet de l'évaporation d'une quantité d'eau de gâchage après la mise en œuvre. De même, la température élevée augmente la vitesse d'hydratation du ciment et crée des écarts de températures entre le cœur des pièces coulées et leur surface, ce qui augmente la fissuration ou le retrait lors du refroidissement. [26]

La vitesse du vent accélère l'évaporation de l'eau, plus la vitesse du vent est élevée, plus l'évaporation de l'eau de gâchage est importante. [26]

Généralement, la température élevée induit une réduction de résistance à la compression enregistrée à 28 jours, pour un jour de cure à 38°C du béton conduit à une réduction d'environ 10%, alors qu'à 3 jours de cure à 38°C, on enregistre une réduction de 22%. De même, les deux chercheurs Goto et Roy, ont trouvé que le murissement du béton à 60°C entraîne la formation d'un volume de pores dépassant 150 mm de diamètre beaucoup plus élevé que lors d'un murissement à 27 °C.

Conclusion

Pour obtenir une meilleure durabilité du béton exposé aux milieux agressifs, il doit au moins respecter quelques critères à savoir : le dosage et le type de ciment utilisé, le rapport E/C, le taux des additions minérales, la cure du béton après le coulage pour éviter l'évaporation d'eau, et éviter le coulage aux temps chaud.

Conclusion Générale

Les études menées dans le cadre du sujet de ce mémoire ont montré que la pérennisation d'un ouvrage du génie civil dans des problématiques liées à l'eau est une tâche complexe. Le nombre de désordres pouvant affecter un tel ouvrage est en effet très important et leurs origines très diverses

Les stations en béton armés dans un milieu agressif souffrent de graves problèmes de dégradation affectant considérablement leur durabilité. Pour améliorer la performance et la durabilité des structures en génie civil il est indispensable de connaître les paramètres influant

La durée de vie de ces structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physique et chimique de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques, on doit faire en sorte que la période d'amorçage soit la plus longue possible.

Dans notre recherche, nous avons adopté un modèle simple de diffusion pure, dans lequel les caractéristiques des matériaux et l'agressivité de l'environnement sont pris en compte. Ce qui nous a permis de mettre en évidence la nécessité de la prise en compte des critères environnementaux lors de la conception des ouvrages en environnement agressif. On peut allonger l'étape d'initiation à la corrosion, en prévoyant une épaisseur d'enrobage suffisante et en diminuant la perméabilité du béton.

A l'issue de ce travail, il est recommandé d'intégrer les critères environnementaux dans les codes de conception comme sources d'agression dans la définition des classes d'exposition des ouvrages, afin de concevoir des bétons plus durables dans les environnements agressifs.

Liste des abréviations

AGHTM : Association Générales des Hygiénistes et Technicien Municipaux

AN : Annexes Nationale

BAEL : Béton Armé aux Etats Limites

BE : Bureau d'Etudes

CCTG : Cahier des Clauses Techniques Générales

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

EB : Niveau Bas de la nappe

EC2 : Eurocode 2

EH : Niveau Haut de la nappe

EH : Equivalent Habitant

ELS : Etats Limites de Service

ELU : Etats Limites Ultimes

ERU : Eau Résiduaire Urbaine

FNDAE : Fond National pour le Développement de l'Adduction d'Eau

GB : Gros Béton

GC : Génie Civil

HA : Haute Adhérence

PACA : Provence Alpes côte d'Azur

PH : Pression Hydraulique

PHEE : Plus Hautes Eaux Exceptionnelles

PHE : Plus Hautes Eaux

PP : Poids Propre

RCVT : Recouvrement

RDM : Résistance Des Matériaux

STEP : Station d'Epuration

Bibliographie et référence

- [1] -Fiche technique de station de Guelma
- [2] -(Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 7
- [3] -(réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 7
- [4] -(réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 8
- [5] -Durabilité des ouvrages en béton <https://www.scribd.com/doc/295169554/CT-G12-8-31-pdf>
- [6] - (réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 8
- [7] - (réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 8
- [8]<http://doc.lerm.fr/wpcontent/uploads/2013/08/carbonatationcarde.pdf> (La carbonatation) [Solutions béton - Hors-série]
- [9]https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwjM56ihguXMAhUL1RQKHQy8DkkQFggsMAI&url=http%3A%2F%2Flibrary.univ-boumerdes.dz%3A8080%2Fbitstream%2F123456789%2F1332%2F1%2FOualit%2520Mehe%20na.pdf&usq=AFQjCNENq_OH-1LupdbHtGiaB_yk_A4eFA&sig2=yEivgghQ_sJaLDyTOoEvLA&cad=rja
- [10] -La corrosion – C. CARDE – Béton[s] magazine
- [11] Réhabilitation des ouvrages en béton armé
http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme1.html
- [12] -Par micha4125 dans Maçonnerie et carrelage le 20 Février 2012 à 12:38
<http://bien-bricoler.maison.com/maconnerie-bien-reparer-les-lezardes-d-un-mur-qui-s-affaisse-a121371746>

Bibliographie et référence

- [13] -MATIERE (Le retrait des bétons) [Christophe Carde, directeur technique du LERM] Septembre/Octobre 2006
<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/retrait-carde.pdf>
- [14] -TECHNOBÉTON3 LE FAÏENÇAGE (2014)
[https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiS6uHj1OLMAhVE0RQKHxbjD2YQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.betonabq.org%2Fimages%2Ffichiers_documents%2Fbnumero3_2014_v0\(1\).pdf&usg=AFQjCNEmlidiwHS4JCG7wJwDFGezL-z6Kw&sig2=-E9aQF2WtLpD0TuBnBuS3g&bvm=bv.122129774,d.d24&cad=rja](https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiS6uHj1OLMAhVE0RQKHxbjD2YQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.betonabq.org%2Fimages%2Ffichiers_documents%2Fbnumero3_2014_v0(1).pdf&usg=AFQjCNEmlidiwHS4JCG7wJwDFGezL-z6Kw&sig2=-E9aQF2WtLpD0TuBnBuS3g&bvm=bv.122129774,d.d24&cad=rja)
- [15] -Epaufrure
[http://www.le-coin-des-bricoleurs.com/le-wiki-du-bricoleur/Epaufrure, %C3%A9caillage, d%C3%A9faut de surf
ace](http://www.le-coin-des-bricoleurs.com/le-wiki-du-bricoleur/Epaufrure,%C3%A9caillage,d%C3%A9faut%20de%20surfactance)
- [16] -Comment nettoyer Lichen sur béton
<http://www.aac-mo.com/comment-nettoyer-lichen-sur-beton.html>
- [17] -[HAL] Ressuage des bétons hydrauliques (Laurent Josserand. Ressuage des bétons hydrauliques. Mechanics. Ecole des Ponts paristech,2002. French.)
https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjx-IK33eLMAhXEchQKHZOvCXMqFggaMAA&url=https%3A%2F%2Ftel.archives-ouvertes.fr%2Ftel-00005679%2Fdocument&usg=AFQjCNG1QjP3kLyH_6FXLYa2itSI5PvFWA&sig2=wJP9KW_gg7HsAKBeGixjig&bvm=bv.122129774,d.d24&cad=rja
- [18] - BOUALLEG.S, « Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires », Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de M'sila, Septembre 2004.
- [19] - C.VERNET, «Petit mémento de chimie des ciments», La durabilité des bétons, PP100 106, J.BARON et J.P.OLLIVIER, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- [20] - AMRIOU.A, « Détection par rayon x de la dégradation du béton sous l'effet des agressions chimiques (sulfates) », Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de M'sila, Mars 2009.

Bibliographie et référence

[21] - DREUX.G, «Guide pratique du béton», Ingénieur en chef au Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics, Edition de la société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, Janvier 1970.

[22] - GAGNE.R, « Durabilité et réparations du béton », Cours en ligne de la durabilité de béton, GCI-714, site internet (www.civil.Usherbooke.ca/cours/gci174), Université de Sherbrooke, 29 Aout 2012.

[23] - M.BUIL, J.P.OLLIVIER, «Conception des bétons : la structure poreuse», La durabilité des bétons, PP57-99, J.BARON et J.P.OLLIVIER, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.

[24] - R.DUVAL, H.HORNAIN, «La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives», La durabilité des bétons, PP351-391, J.BARON et J.P.OLLIVIER, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.

[25] - SEBSADJI.S, « Les dégradations dans les ouvrages en béton armé : causes et prévention», Colloque CREDIMAT, Département de Génie Civil, Université des sciences et de la technologie, Mohammed BOUDIAF, Oran, Décembre 2005.

[26] - HAOUARA.S, GUETTALA.A, « Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armée dans la région de Biskra », Courrier du savoir – N°06, PP.109 -116, Département de génie civil, Université de Biskra, Juin 2005.

- ACI 440.2R-08-Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

- ACI 318M-11.

- Arduini, M., and Nanni, A. (1997), Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets, Journal of Composites for Construction, Vol. 1, No. 2.

- Barbero, E. J. (1999), Introduction to Composite Materials Design, Taylor & Francis, Philadelphia.

- Composites for Construction - Structural Design with FRP Materials (Malestrom) by Laurence C. Bank.

- Flexural Capacity of FRP Strengthened Unbonded-Prestressed Concrete Members: Proposed Design Guidelines by F. M. El Meski & M. H. Harajli.

- FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A guide to fundamentals and design for repair and retrofit, By Perumalsamy Balaguru, Antonio Nanni, James Giancaspro

Bibliographie et référence

- RENFORCEMENT EN FLEXION DE POUTRES EN BÉTON ARMÉ A L'AIDE DE PLAQUES EN MATÉRIAU COMPOSITE RÉALISÉES IN-SITU- Mémoire présenté a la faculté des études supérieures de l'Université Laval par Philippe DUQHETTE.