

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 et Hydraulique

Spécialité : Structures

**Thème : Etude bibliographique sur la durabilité des
bétons dans les stations d'épurations**

Présenté par : **GRAINE Ikram Nour El Houda.**

SOUCHA Nesrine.

Sous la direction de : **Mr. BOUDJEHEM. Hocine.**

Octobre 2020

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier DIEU le tout puissant pour
Nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce
Travail.*

*Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude au
directeur de cette thèse le Dr BOUDJEHEM HOCINE, qui a bien
voulu nous encadrer pour l'élaboration de ce présent travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur
de juger ce travail.*

*Nous réservons une pensée spéciale à tous les enseignants qui ont
contribué à notre formation.*

*En fins nous remercions toute nos famille pour le soutien et
l'encouragement qu'ils ont nous apporté durant toute nos études.*

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos chers pères et mères pour leurs éducations, leurs
patiences, leurs énormes sacrifices à nous offrir une vie pleine de joie
et d'amour, leurs soutiens et encouragements que Dieu les gardents.

Ainsi à Nos chers sœurs et frères

A Toute nos familles

A tous nos amis

A Toute notre promotion «2020»

Résumé :

Les besoins des ouvrages évoluent eux avec le temps. En fonction de l'évolution prévue des besoins, est donc définie pour chaque ouvrage une durée de vie ou « durabilité » souhaitée (50 ou 100 ans par exemple), en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales surtout dans les réseaux d'assainissement.

Cette recherche est a L'objectif de l'étude de « la durabilité des bétons dans les stations d'épurations », où La durabilité ici dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et les diverses conditions d'usage, d'exploitation et maintenance contre les dégradations et les agressions chimiques , physiques et mécaniques qu'on a montré dans notre mémoire qui menace l'ouvrabilité de ces réseaux.

Aussi on a pris la station de Guelma comme un cas d'étude et on a vue que la station fait un bon rendement et une bonne élimination de la matière organique qui mène a une bonne qualité d'épuration pendant les années étudiées.

Enfin Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence pour un bon rendement durable qui mène a une bonne qualité pendant toutes la durée de travail.

Mots clés : Station d'épuration, indicateur, durabilité, des eaux usée, Dégradation, béton,

Summary :

The needs of the structures change over time. Depending on the expected development of needs, a desired service life or "durability" (50 or 100 years for example) is therefore defined for each structure, depending on the mechanical and environmental stresses, especially in the sanitation networks.

This research is a The objective of studying the durability of concrete in sewage treatment plants Where durability here depends on many parameters including the quality of its design, the quality of the materials used, the quality of the construction arrangements, the construction of the work and the various conditions of use, operation and maintenance against

degradation and chemical, physical and mechanical attacks that we have shown in our brief that threaten the workability of these networks.

Also we took the guelma station as a case study and we saw that the station does a good yield and a good elimination of the organic matter which leads to a good quality of purification during the years studied.

Finally, the level of risk must therefore be controlled and the materials designed accordingly for a good lasting performance which leads to good quality throughout the working time.

Keywords: Wastewater treatment plant, indicator, durability, wastewater, Degradation, concrete.

ملخص :

تتغير احتياجات الهياكل بمرور الوقت. بناءً على التطور المتوقع للاحتياجات ، يتم تحديد عمر الخدمة المرغوب أو "المتانة" (50 أو 100 سنة على سبيل المثال) لكل هيكل ، اعتمادًا على الضغوط الميكانيكية والبيئية ، خاصة في شبكات الصرف الصحي.

هذا البحث هو الهدف من دراسة متانة الخرسانة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي حيث تعتمد المتانة هنا على العديد من العوامل بما في ذلك جودة التصميم وجودة المواد المستخدمة وجودة ترتيبات البناء ، بناء العمل وظروف الاستخدام والتشغيل والصيانة المختلفة ضد التدهور والهجمات الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية التي أظهرناها في موجزنا والتي تهدد قابلية تشغيل هذه الشبكات.

كما أننا أخذنا محطة قادمة كدراسة حالة ورأينا أن المحطة تحقق مردودًا جيدًا وتخلصًا جيدًا من المادة العضوية مما يؤدي إلى جودة تنقية جيدة خلال السنوات المدروسة. أخيرًا ، يجب بالتالي التحكم في مستوى المخاطر وتصميم المواد وفقًا لذلك لأداء جيد دائم يؤدي إلى جودة جيدة طوال وقت العمل.

الكلمات المفتاحية : محطة معالجة مياه الصرف الصحي ، المؤشر ، المتانة ، مياه الصرف الصحي ، التدهور ، الخرسانة.

Tables des matières

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

Chapitre I : Béton et développement durable

I.1 Introduction :	4
I.2 La première dimension du développement durable :	4
I.3 La deuxième dimension du développement durable :	11
I.4 La troisième dimension du développement durable :	13
Conclusion :	14

Chapitre II : Durabilité des bétons

II.1 Introduction :	15
II.2 Généralité sur les de béton :	16
II.2.1 Définition du béton :	16
II.2.2 Les Constituants Du Béton :	16
II.2.2.1 Le ciment:	16
II.2.2.2 Les granulats :	20
II.2.2.3 Le sable :	21
II.2.2.4 L'eau de gâchage :	22
II.2.2.5 Adjuvants chimiques :	23
II.2.3 Différents types de bétons :	23
II.2.3.1 Béton auto plaçant (BAP) :	23
II.2.3.2 Béton de haute performance (BHP) :	23
II.2.3.3 Béton de fibre :	24
II.2.3.4 Béton a durcissement rapide :	24
II.2.3.5 Béton léger :	24
II.2.3.6 Béton lourd :	24
II.2.3.7 Béton ordinaire :	24
II.2.4 Caractéristiques du béton :	24

II.2.4.1	Résistance à la compression	:.....	25
II.2.4.2	Résistances à la traction par flexion	:.....	25
II.2.5	Propriétés des bétons	:.....	25
II.2.5.1	Le béton a l'état frais	:.....	25
II.2.5.2	Le béton a l'état durci	:.....	27
II.2.6	Rôle des différents éléments constituant le béton	:.....	29
II.3	Principaux avantages et inconvénients de bétons	:.....	30
II.3.1	Avantages du béton	:.....	30
II.3.2	Inconvénients du béton	:.....	30
II.4	Définition de la durabilité des bétons	:.....	30
II.5	L'approche performantielle	:.....	31
II.5.1	Etapes de la démarche performantielle	:.....	33
II.6	Indicateurs et les paramètres et les facteurs de durabilité	:.....	33
II.6.1	Définition des indicateurs de durabilité	:.....	33
II.6.1.1	Indicateurs de durabilité généraux sélectionnés	:.....	34
II.6.1.2	Indicateurs de durabilité spécifiques, sélection et justification	:.....	34
II.6.1.3	Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton)	:.....	35
II.6.1.4	Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci)	:.....	35
II.6.1.5	Indicateurs de substitution, fonctions et sélection	:.....	35
II.6.2	Paramètres de la durabilité	:.....	36
II.6.2.1	Paramètres liés au matériau	:.....	36
II.6.2.2	Paramètres liés à l'environnement	:.....	36
II.6.2.3	Paramètres liés à la structure	:.....	37
II.6.2.4	Paramètres économiques	:.....	37
II.6.3	Les facteurs influant sur la durabilité des bétons	:.....	37
II.7	Condition de la durabilité des bétons	:.....	38
II.8	La clé d'une bonne conception (durabilité)	:.....	39
	Conclusion	:.....	41

Chapitre III : Les dégradations des bétons

III.1 Introduction:	42
III.2 Les différentes dégradations pouvant affecter les bétons :	43
III.2.2 Dégradations mécaniques :.....	43
III.2.1.1 Fissure :	43
III.2.1.2 Retrait :.....	44
III.2.2 Dégradations Physiques :.....	45
III.2.3 Dégradations Chimiques :	46
III.2.3.1 Réactions Alcalis-Granulats (RAG) :	46
III.2.3.2 La réaction sulfatique interne :	48
III.2.3.3 Attaque sulfatique externe :.....	49
III.2.3.4 Attaque due aux acides :	50
III.2.3.5 Lixiviation :	51
III.2.3.6 Action de l'H ₂ S sur les bétons :.....	52
III.2.3.7 Attaques due au H ₂ SO ₄ :.....	53
III.2.3.8 La carbonatation :	54
III.2.3.9 Attaques des aciers par les Chlorures :	56
III.2.4 Causes de dégradation dues à l'âge du béton :	61
III.2.5 D'autres causes de dégradation :	62
III.3 Les procédés de réparation :	62
III.3.1 Méthodologies de réparation :	62
III.3.2 Le traitement des fissures :.....	63
III.3.3 Modes de protection des armatures :	63
III.3.4 Bonnes pratiques et conseils de prévention :.....	63
Conclusion :.....	65

Chapitre IV : Les stations d'épurations

IV.1 Introduction :.....	66
IV.2 Généralité sur les eaux usées :	67
IV.2.1 Origine des eaux usées :	67
IV.2.2 Différents types des eaux usées :	68

IV.2.2.1 Origine pluviales :	68
IV.2.2.2 Origine industrielle :	68
IV.2.2.3 Origine agricole :	69
IV.2.2.4 Origine domestique :	69
IV.2.3 la pollution des eaux usées :	69
IV.2.3.1 Pollution minérale :	70
IV.2.3.2 pollution microbiologiques :	70
IV.2.3.3 Pollution chimique :	70
IV.2.3.4 pollution physique :	70
IV.2.3.5 Pollution par le phosphore :	70
IV.2.3.6 Pollution par l'azote :	71
IV.2.3.7 Les pollutions diverses:	71
IV.2.4 les Paramètres de pollution :	71
IV.2.4.1 Paramètres organoleptiques :	71
IV.2.4.2 Les paramètres physiques :	71
IV.2.4.3 Paramètres chimiques :	73
IV.2.4.4 Les paramètres bactériologiques :	74
IV.3 Les stations d'épuration :	74
IV.3.1 Définition de l'épuration :	74
IV.3.2 Définition des stations d'épuration :	75
IV.3.3 Rôle des stations d'épuration :	76
IV.3.4 Implantation de la station :	76
IV.4 Procédés d'épuration des eaux usées :	77
IV.4.1 Prétraitements :	77
IV.4.1.1 dégrillage :	78
IV.4.1.2 Tamisage :	79
IV.4.1.3 Le dessablage :	79
IV.4.1.4 Déshuilage-Dégraissage :	80
IV.4.2 Le traitement primaire :	81
IV.4.2.1 La décantation physique :	81
IV.4.2.2 La décantation physico-chimique :	81
IV.4.3 Traitement secondaires :	82
IV.4.3.1 Procédés biologiques extensifs :	82

IV.4.3.2 Procédés biologiques intensifs :	84
IV.4.4 Décantation secondaire :	87
IV.4.5 Traitement tertiaire :	87
IV.4.5.1 L'élimination de l'azote :	87
IV.4.5.2 La nitrification :	88
IV.4.5.3 La dénitrification :	88
IV.4.5.4 L'élimination du phosphore :	88
IV.4.5.5 Elimination et traitement des odeurs :	88
IV.4.5.6 La désinfection :	89
IV.4.5.7 Le chlore :	89
IV.4.5.8 L'ozone (O ₃) :	89
IV.4.5.9 Les rayons ultraviolets :	90
IV.4.5.10 La filtration :	90
IV.4.6 Le traitement des boues :	90
IV.5 Les risque du métier :	92
IV.5.1 Risques inhérents aux lieux de travail :	92
IV.5.1.1 Risque de bruit :	92
IV.5.1.2 Risque électrique :	92
IV.5.1.3 Risque d'inhalation du à la qualité de l'air :	92
IV.5.1.4 Risque de chutes, de glissades voire de noyade :	92
IV.5.2 Principaux risques liés aux tâches :	93
IV.5.2.1 Risques de chutes, de glissades, et de noyades :	93
IV.5.2.2 Risques dus à la manutention manuelle :	93
IV.5.2.3 Risque électrique :	93
IV.5.3 Principaux risques liés aux produits :	93
IV.5.3.1 Risque chimique :	93
IV.5.3.2 Risques biologiques :	94
IV.5.4 Principaux risques liés aux équipements de travail :	94
IV.5.4.1 Risques mécaniques :	94
IV.5.4.2 Incendie :	94
IV.5.4.3 Explosion :	94
Conclusion :	95

Chapitre V : Présentation de la station d'épuration de la wilaya de Guelma

V.1. Présentation de la zone étude (Guelma) :	96
V.1.1. Situation géographique :	96
V.1.2 Présentation de la STEP de Guelma :	97
V.1.3 Emplacement et accès :	98
V.1.4 Caractéristique et Nature des effluents :	98
V.2. Nature du réseau :	98
V.2.1 Nature du traitement des eaux Usées avant l'emplacement de la Station :....	99
V.2.2 Charges Hydrauliques et Polluantes :	99
V.3. Les éléments de traitement au niveau de STEP Guelma :	99
V.3.1 Dégrillage :	99
V.3.2 Dessablage / déshuilage :	100
V.3.3 Décanteur primaire :	100
V.3.4 Bassin de traitement biologique :	101
V.3.5 Clarificateur :	102
V.3.6 Lit de séchage :	103
V.3.7 Bassin de désinfection :	103
V.4 Evaluation du rendement de la station d'épuration de Guelma :	104
V.4.1 Introduction :	104
V.4.2 Evolution spatial du rendement dans la station d'épuration de Guelma :... 	104
Conclusion :	107
 Conclusion générale.....	 108

Liste des figures.

Chapitre I : Béton et développement durable

Figure I.1 : Four de cimenterie.....	06
Figure I.2: Tuyaux préfabriqués en béton.....	08
Figure I.3 : Chambre des métiers de Loire-Atlantique, Sainte-Luce.....	10
Figure I.4 : Le lycée Jean-Jaurès près de Montpellier.....	11
Figure I.5 : Logements sociaux à Fontenay-aux-Roses « Toit et Joie».....	12
Figure I.6 : Pont TGV Perpignan-Figueras.....	13

Chapitre II : Durabilité des bétons

Figure .II.1 : Béton a l'état frais.....	19
Figure .II.2 : Teste de cône d'Abrams.....	20
Figure .II.3 : Béton a l'état durci.....	21
Figure .II.4 : Le ciment.....	23
Figure .II.5 : Etapes de fabrication du ciment.....	25
Figure .II.6 : Les granulats.....	26
Figure .II.7 : Le sable.....	27
Figure .II.8 : L'eau de gâchage.....	28

Chapitre III: Les dégradations des bétons

Figure III.1 : Dégradation due aux sels de déverglaçage.....	46
Figure III.2 : Réactions alcalis-granulats.....	47
Figure III.3 : Attaques sulfatiques.....	49
Figure.III.4 : Schéma illustratif de l'attaque sulfatiques externe.....	50
Figure.III.5 : Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton.....	51
Figure III.6 : Lixiviation.....	51

Figure III.7 : Evolutions de dégradation des éprouvettes en mortier de ciment dans des milieux acides à différentes concentration.....	54
Figure III.8 : Phénomène de la carbonatation.....	55
Figure.III.9 : Schéma illustratif de dégradation des armatures due aux chlorures.....	57
Figure III.10 : Réunion des facteurs de la corrosion.....	58
Figure.III.11 : Schéma de principe de la corrosion des armatures.....	58
Figure III.12 : Processus électrochimique de la corrosion des armatures.....	59

Chapitre IV : Les Stations d'épurations

Figure IV.1 : Synoptique classique d'une station d'épuration.....	76
Figure IV.2 : Schéma d'un dé grilleur.....	78
Figure IV.3 : Schéma d'un tamisage.....	79
Figure IV.4 : Schéma d'un dessabler.....	80
Figure IV.5 : Schéma d'un déshuileur-dégraisseur.....	81
Figure. IV.6 : Bassin de traitement biologique	83
Figure IV.7 : Lagunage naturel.....	84
Figure IV.8 : Le principe d'un lagunage aéré.....	84
Figure IV.9 : Schéma de principe d'une filière type de disques biologiques.....	85
Figure IV.10 : Schéma de principe d'une filière type de boues.....	86
Figure IV.11 : Processus des boues activées.....	86
Figure. IV.12 : Décanteur secondaire «clarificateur».....	87
Figure IV.13 : Lits de séchage.....	91

Etude de cas : La Station D'épuration de Guelma

Figure.V.1. Carte de la situation géographique de la zone d'étude (Guelma)	96
Figure.V.2. Plan architectural de la STEP Guelma.....	97
Figure.V.3. Photo aérienne de la station d'épuration (Guelma).....	98
Figure.V.4. Dégrillage (STEP Guelma)	99
Figure.V.5. Dessablage – Déshuilage (STEP Guelma)	100
Figure.V.6. Décanteur primaire (STEP Guelma)	100

Figure.V.7. Bassin de traitement biologique (STEP Guelma)	102
Figure.V.8. Clarificateur (STEP Guelma)	102
Figure.V.9. Lits de séchage (STEP Guelma)	103
Figure.V.10. Bassin de désinfection (STEP Guelma)	103
Figure.V.11 : Evolution spatial du rendement de MES de la station de Guelma.....	105
Figure.V.12 : Evolution spatial du rendement de DCO de la station de Guelma.....	105
Figure.V.13 : Evolution spatial du rendement de DBO5 de la station de Guelma.....	106

Liste des tableaux

Chapitre II : Durabilité des bétons

Tableau.II.1 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams..... 19

Chapitre V: Présentation de la station d'épuration de la wilaya de Guelma

Tableau .1 : Charge polluante..... 99

Tableau .2 : Quantité de chlore a Dosé..... 104

Liste Des Abréviations

BAP : Béton auto plaçant.

BHP : Béton de haute performance.

BTHP : Béton à très haute performance.

D : est la masse volumique du béton.

M1 : est la masse du récipient (kg).

M2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³).

f_{cj} : résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés).

f_{tj} : La Résistance caractéristique a la traction du béton a j jours.

ELS : état limite service.

F : charge maximale, exprimée en Newtons.

A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

(S) : Laitier granulé de Haut fourneau.

(Z) : Pouzzolanes naturelles.

(V ou W) : Cendres volantes.

(L):Calcaires.

(T):Schistes calcinés.

(D) : Fumées de silice.

(F): Fillers.

ICPE : installations classées pour la pollution et l'environnement.

MES : Matières en suspension.

ERU : Eaux résiduaires urbaines.

DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène (mg/l).

DCO : Demande Chimique en Oxygène (mg/l).

MMC: Matières minérales sèches

MVS : Matière volatile en suspension (mg/l).

OMS : L'organisation mondiale de la santé.

OD : Oxygène dissous.

NH₄⁺: L'azote ammoniacal (mg/l).

NH₃: Ammoniac (mg/l)

NO₂: Nitrites (mg/l).

NO₃: Nitrates (mg/l).

ONA : Office National d'Assainissement.

PH : Potentiel Hydrogène.

STEP: Station dépuration.

T : Température.

V: Volume de boue obtenu après 30 minutes de décantation (ml/l).

VLEP : Valeurs limites d'exposition professionnelle

VBA : Volume de bassin d'aération (m³).

Cr : Indice de contamination.

R : Rendement de station.

CO₂ : Gaz de carbone.

AEP : Alimentation en eau potable

IB : l'indice de boue.

CR : Rapport de Contamination.

Introduction générale

Introduction générale :

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeurs. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part des pays, et très nombreux sont les professionnelles qui se livrent à cette activité.

Cependant, si le métier de construire a une grande importance pour l'homme, la durabilité des ouvrages constitue l'une de ces préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil ; car les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer.

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative. En raison de l'interaction du béton avec des influences externes, les propriétés mécaniques et physiques du béton peuvent être menacées.

Parmi les facteurs menaçants l'attaque des produits chimiques tels que les acides qui sont nocifs pour le béton. Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation - c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

L'attaque chimique constitue un sujet d'importance croissante, en raison de la propagation des dommages des structures en béton dans les zones urbaines et industrielles. Bien que le ciment Portland ordinaire est le plus couramment utilisé dans la construction d'infrastructures, sa résistance aux attaques chimiques, tels que les sulfates est un sujet préoccupant de plus en plus à travers tout le monde.

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories.

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratés ne sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus

ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

Au contraire, si les produits de réactions sont insolubles, deux cas peuvent se présenter suivant que la nouvelle phase est ou non expansive. Si les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, ils comblent progressivement la porosité des bétons et ainsi diminuent la perméabilité et augmentent la durabilité.

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe, les facteurs et les mesures de protection des matériaux à base de ciment contre ces attaques sont utiles. En d'autres termes La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Puis, on parlera des dégradations dues aux attaques chimiques à savoir :

- ❖ l'attaque par les sulfates.
- ❖ l'attaque par les acides.
- ❖ l'attaque par l'eau de mer.
- ❖ pénétration des ions chlore.
- ❖ la carbonatation.
- ❖ la corrosion des armatures.
- ❖ l'alcali-réaction.
- ❖ lixiviation en eau douce.

En donnant une définition précise pour chaque phénomène, sa source, son mécanisme, les préventions et les solutions qui existent. En plus, on démontra la différence entre ces attaques et les caractéristiques de chaque dégradation.

L'eau est essentielle à la vie et au bien-être. C'est pourquoi, elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée, la distribution et le traitement des eaux usées répondent à des besoins vitaux, ont des impacts forts sur la santé et l'environnement.

Pour parer à cette situation, l'homme a conçu des stations pour l'épuration des eaux usées et a développé une technologie conséquente dans le domaine de la protection des milieux récepteurs.

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.

Dans cette optique notre travail est structuré en quatre chapitres qui sont les suivants :

- *Le premier chapitre c'est les béton et développements durables
- *Le deuxième chapitre c'est la durabilité des bétons.
- *Le troisième chapitre c'est les dégradations des bétons.
- *Le quatrième chapitre c'est les stations d'épuration.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale, qui rappelle les objectifs de notre travail.

Chapitre I :

Béton et

développement durable

I Béton et développement durable :

I.1 Introduction :

Il semble difficile aujourd'hui de parler de durabilité des bétons sans mentionner le positionnement des bétons vis-à-vis du développement durable. Bien entendu, la durabilité est l'un des facteurs les plus importants dans le développement durable.

On imagine mal d'envisager la démolition d'une construction en béton au bout d'une période courte. Mais le développement durable recouvre d'autres dimensions :

1) Préserver la qualité de l'environnement : par la restauration, l'aménagement et le maintien des habitats essentiels aux espèces ainsi que par une gestion durable du recours aux populations animales et végétales.

2) Améliorer l'équité sociale non seulement : par la satisfaction des besoins essentiels des communautés humaines présentes et futures, mais aussi par l'amélioration de la qualité de vie, notamment par l'accès pour tous à un logement de qualité.

3) Renforcer l'efficacité économique : c'est-à-dire favoriser une gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières, afin de permettre la satisfaction des besoins des communautés humaines, notamment par la responsabilisation des entreprises et des consommateurs. [1]

I.2 La première dimension du développement durable :

La première dimension du développement durable peut être abordée par l'analyse du cycle de vie. Il s'agit de calculer l'impact environnemental d'une « unité fonctionnelle », c'est-à-dire tout simplement une maison ou une route, sur l'environnement depuis sa conception jusqu'à sa disparition complète. L'analyse prend en compte toutes les matières premières utilisées, l'énergie (sous forme thermique, électrique ou de transport), ainsi que les émissions gazeuses et aqueuses. [1]

Ces impacts regroupent un ensemble de données, et peuvent être différemment exprimés selon les objectifs recherchés et les méthodes utilisées. La discipline n'est pas

encore stabilisées, les méthodologies ne sont pas fixées et restent trop nombreuses pour assurer une véritable gestion en connaissance de cause. [1]

La norme internationale, l'ISO 14040, reste encore floue. La norme française P01-010, maintenant homologuée, exprime l'analyse de cycle de vie en 20 impacts environnementaux, regroupant un ensemble de 400 données de base mesurées ou calculées. Pour chaque dimension, un commentaire est fait pour le béton, plutôt en tendance qu'en affirmation, car les données doivent être recalculées pour chaque utilisation. [1]

- **Consommation d'énergie renouvelable :** L'industrie cimentière française utilise 10 % de l'énergie thermique sous forme de biomasse pour produire du ciment, et met en place des éoliennes là où cela présente un intérêt. Il faut tout de même préciser que l'énergie électrique consommée par l'industrie constitue la demande « de base », régulière et sans « pointe ». La demande électrique régulière ne correspond pas à l'offre aléatoire d'une éolienne. En général, l'investissement d'une éolienne doit être complété par l'investissement d'une centrale thermique de puissance correspondante.
- **Consommation d'énergie non renouvelable :** L'industrie cimentière représente une part importante de l'énergie non renouvelable consommée dans le béton, c'est pourquoi elle s'efforce d'économiser l'énergie fossile en lui substituant des déchets combustibles : environ le quart de l'énergie provient de cette filière, économisant ainsi l'importation d'environ 500000 tep/an. Par comparaison avec la brique ou l'acier, le béton est assez économe, car seule la partie liante est cuite.
- **Consommation de ressources non énergétiques :** Le béton est un consommateur de granulats. Cette ressource est abondante, et rien n'en prévoit la disparition. Il est cependant évident que les granulats pourraient être recyclés si la construction le prévoyait, à l'image des automobiles actuelles « recyclables par conception ». Un autre moyen de limiter la consommation de ressources est l'usage de bétons à hautes performances, qui assurent la même fonctionnalité en utilisant moins de matériaux. La France est pionnière dans le domaine des bétons à hautes performances, et la technologie française s'exporte bien. Il faut ajouter que les bétons à hautes performances ont en général une durabilité supérieure aux bétons courants. [1]

- **Consommation d'eau :** Le béton utilise de l'eau pour la partie liante, intégrée dans la structure des hydrates. Par contre, le béton permet de canaliser et contenir l'eau pour en assurer un meilleur usage. Par cet exemple on voit la complexité de l'analyse de cycle de vie d'une fonctionnalité comme un réseau d'eau potable ou usée. Seule la prise en compte complète des éléments de construction, d'usage permet de caractériser l'impact environnemental. [1]
- **Déchets valorisés :** Seule la construction routière permet aujourd'hui un recyclage satisfaisant des déchets produits par le chantier, y compris le recyclage des enrobés bitumineux. Pour le ciment, quelques sous-produits d'autres industries sont valorisés : le laitier, les cendres volantes, mais aussi une partie des boues d'aluminerie, des sables de fonderies. Ces produits peuvent faire l'objet d'un contrôle de qualité satisfaisant pour l'usage en construction. [1]



Figure .I.1 : Four de cimenterie. [1]

- **Déchets éliminés :** La production de béton génère une quantité marginale de déchets. Par contre, les déchets inertes liés à la démolition de constructions ne sont pas encore suffisamment recyclés bien qu'utilisables en remplissage. [1]

- **Changement climatique :** L'impact sur le changement climatique illustre parfaitement la simplification à outrance des problématiques environnementales. La température moyenne de la Terre a augmenté de 0,6 °C depuis le début de l'ère industrielle, ce que l'histoire n'a jamais observé, entraînant des phénomènes météorologiques locaux exceptionnels. [1]

La courbe de montée de température suit celle de la population humaine de façon impressionnante. Le gâchis énergétique des pays développés peut être mis en cause¹ : les champions sont les USA avec 20,02 t de CO₂ par habitant, puis l'Australasie avec 12,2 t de CO₂/hab. le Japon avec 9,14 t de CO₂/hab., l'Europe de l'Ouest avec 8,28 t de CO₂/hab. L'Amérique latine représente 2,79 t de CO₂/hab., l'Afrique 1,39 t de CO₂/hab. Ces données montrent l'importance de l'efficacité énergétique des pays. La France émet 6,2 t de CO₂/hab. La production d'électricité représente 0,44 t de CO₂/hab. en France contre 3,67 en Allemagne et 7,94 aux USA, ceci grâce au nucléaire. Les différences montrent bien les progrès réalisables par diffusion de techniques connues. [1]

La communauté européenne a signé un engagement de réduction des émissions annuelles de gaz à effet de serre de 8 % entre 1990 et 2010. Cet engagement a entraîné une directive d'allocations et d'échanges de quotas, avec création d'une bourse d'échange pour optimiser économiquement la réduction des émissions industrielles et énergétiques. Cette méthode ne prend en compte qu'une partie du problème en ne traitant que la partie « production » de l'analyse de cycle de vie, et non l'ensemble.

Un exemple caricatural vient du verre : pour faire un triple vitrage, très performant, il faut trois fois plus d'énergie, donc trois fois plus de CO₂ émis à la production. Faut-il revenir pour autant à des simples vitrages minces et donc consommer beaucoup plus pour maintenir une température acceptable dans les logements ? La réponse est évidente. Le problème est le même avec le bâtiment, où les murs massives apportent de l'inertie thermique, source de confort, mais aussi d'économies de chauffage et de climatisation. L'analyse de cycle de vie deviendra inévitablement un outil d'aide à la décision pour éviter les contresens. [1]

- **Acidification atmosphérique :** Le béton n'a pas d'impact sur ce critère, sauf de façon très indirecte et marginale au travers des émissions de NO_x et SO_x des usines, mais aussi, en particulier, du transport. Le béton étant plutôt basique corrige l'eau légèrement acide dans les premiers temps d'usage, puis n'a rapidement plus aucun effet. [1]
- **Pollution de l'air :** La pollution de l'air provient des émissions des cimenteries, installations classées pour la pollution et l'environnement (ICPE), et des poussières émises lors de la production des granulats et des bétons. Cette pollution reste minérale, et faible. Les émissions liées au transport des matériaux peuvent devenir non négligeables. Pour le béton, le transport reste faible en comparaison d'autres industries. [1]
- **Pollution de l'eau :** Le béton n'a pas d'impact négatif sur l'eau, utilisé pour son stockage et son transport, il contribue même à en préserver la qualité.



Figure .I.2 : Tuyaux préfabriqués en béton. [1]

- **Pollution des sols :** Le béton est souvent utilisé pour protéger les sols de la pollution, par exemple en parois moulées. L'impact sur les sols est souvent positif selon l'usage.
- **Destruction de la couche d'ozone stratosphérique :** La destruction de la couche d'ozone provient essentiellement des chlorofluorocarbures (CFC), interdits maintenant mais toujours utilisés. Ce gaz n'est pas produit en construction. Par contre, la couche

d'ozone est sensible aux variations climatiques, et il est possible de voir des évolutions fortes pour cette raison, non prise en compte actuellement dans cette dimension.

- **Formation d'ozone photochimique :** Comme l'acidification, l'impact est indirect et surtout lié au transport. Cet impact est sans objet pour les bétons mis en œuvre.
- **Atteinte à la biodiversité :** Sans objet pour les bétons qui n'ont pas d'impact sur la biodiversité, car ils ne modifient pas le milieu ambiant. [1]
- **Contribution à la qualité sanitaire des espaces intérieurs :** Le béton n'a pas d'impact sur l'air. Il faut par contre se rappeler que les produits organiques (tels que colles et peintures) peuvent avoir un impact non négligeable.
- **Contribution à la qualité sanitaire de l'eau :** Les tests de lixiviation montrent que l'eau potable est souvent en contact avec du béton, sans impact sanitaire. Dans certains cas c'est, à l'inverse, le passage de l'eau qui peut entraîner une précipitation (marginale mais non nulle) de métaux lourds dans la porosité du béton par effet de pH.
- **Confort hygrométrique :** Les dimensions de confort restent des facteurs qualitatifs. Le béton est un excellent isolant hydrique, souvent utilisé pour cette fonction en fondation. [1]
- **Confort acoustique :** Le béton est utilisé en murs acoustiques le long des autoroutes, car il absorbe les aigus. Il faut, là encore, prendre en considération la conception et, en particulier, la surface pour éviter des phénomènes d'écho. En construction, il faut éviter les murs d'un seul tenant pour éviter la transmission de certains sons. Ces rupteurs acoustiques sont classiquement utilisés.

- **Confort visuel :** Le béton est une surface trop connue! Mais les évolutions des qualités de parement sont la preuve d'un confort visuel retrouvé. [1]



Figure .I.3 : Chambre des métiers de Loire-Atlantique, Sainte-Luce. [1]

- **Confort olfactif :** Le béton n'a pas d'odeur une fois durci. La simple lecture de ces modes d'évaluation de la première dimension du développement durable permet de situer les questions de durabilité des bétons dans ce contexte d'analyse de cycle de vie. Le défaut principal du béton est l'utilisation des ressources énergétiques et non énergétiques non renouvelables. Sa principale qualité est la durabilité, qui donne un cycle de vie très long et limite donc l'impact de cette utilisation. [1]

Il faut relativiser l'impact direct du béton par la fonction qu'il remplit, et les économies d'impacts ultérieurs qu'il génère. Une construction qui nécessiterait un entretien régulier et important peut, en effet, totalement renverser l'analyse de cycle de vie de l'ensemble. Les évaluations faites par calcul montrent que la phase de construction ne représente qu'environ 10 % de l'impact environnemental d'un bâtiment ou d'un kilomètre de route. Ces proportions donnent une idée de l'impact de la qualité d'usage des bâtiments et de l'impact de la durabilité des ouvrages. [1]

Il faut rappeler qu'en France le chauffage des bâtiments avec des combustibles fossiles représentent 18,4 % des émissions totales, soit pratiquement autant que l'agriculture (19,3 %) et l'industrie (20 %). Le chauffage des bâtiments est en croissance de 14 % par rapport à 1990, alors que l'industrie est en baisse de 22 % par rapport à 1990 (année de référence de l'accord de Kyoto de réduction des gaz à effet de serre). [1]



Figure .I.4 : Le lycée Jean-Jaurès près de Montpellier. [1]

I.3 La deuxième dimension du développement durable :

La deuxième dimension du développement durable est d'améliorer l'équité sociale. Cette dimension est très largement tournée vers la construction et l'habitat. L'enjeu des matériaux de construction est donc majeur. La construction de logements sociaux est devenue un véritable enjeu politique, il faut, certes, construire rapidement et à moindre coût, mais aussi répondre aux besoins des générations futures. [1]

La comparaison des différents matériaux de construction doit se faire dans le cadre de l'analyse de cycles de vie. Le béton est évidemment au cœur de ces questions dans la mesure où il représente 90 % du marché de la construction. Si la problématique peut être posée en termes simples, elle reste difficile à aborder dans sa totalité.

Le ratio entre l'investissement nécessaire et le coût ultérieur de fonctionnement de l'ouvrage fait partie des équations difficiles à résoudre. [1]

La durée prévue de l'ouvrage peut aussi être un paramètre clef de l'investissement : le tunnel sous la Manche, le pont Rion-Antirion en Grèce, le viaduc de Millau sont des ouvrages à durée de vie prévue de 120 ans. Le musée des Arts premiers de Paris a été conçu pour une durée de vie de 20 ans. Une maison est, en général, prévue pour durer 50 ans. [1]

Les facteurs sociaux ont évidemment une influence notable: les « barres » de HLM des années soixante sont aujourd'hui détruites, car ne correspondant plus aux nouvelles données sociétales, et sont remplacées par des ensembles immobiliers plus adaptés aux temps modernes. [1]

Trop lentement d'ailleurs, car il manque en France en général, et, plus particulièrement, à Paris plusieurs centaines de milliers de logements sociaux. L'équité sociale n'est pas encore atteinte. Le béton permet d'y contribuer, restant de loin le matériau le plus économique et le plus utilisé au monde pour la construction. [1]

Ne parler que de logements dans cette dimension sociale serait réducteur, car l'aménagement urbain, tant apprécié aujourd'hui, avec les zones piétonnes et les transports collectifs, n'a jamais été plus consommateur de béton. Coloré, texturé, matricé, la diversité d'aspect des bétons est si grande que peu de personnes parviennent à identifier ce matériau caméléon qui se fond harmonieusement dans le paysage urbain. [1]

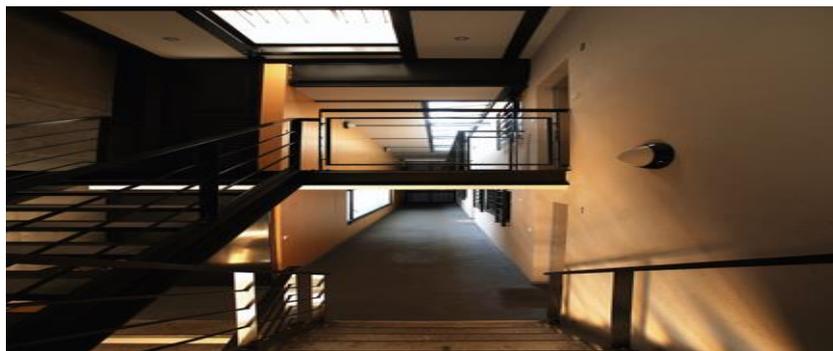


Figure .I.5 : Logements sociaux à Fontenay-aux-Roses « Toit et Joie ». [1]

I.4 La troisième dimension du développement durable :

La troisième dimension, l'efficacité économique, est probablement celle qui s'approche le plus directement de la notion de durabilité. Le béton est un matériau durable en ce sens qu'il ne nécessite, dans la majorité des cas, ni protection, ni entretien spécifique. La grande majorité des structures de génie civil sont en béton brut et ne font l'objet que de surveillance visuelle régulière. [1]

Les ouvrages à problèmes sont pratiquement toujours des ouvrages présentant un défaut de conception ou de réalisation. La plupart du temps, l'optimisation économique est d'éviter les protections, consommatrices de temps et de ressources, en acceptant le risque de problèmes spécifiques de durabilité. Le béton pourrait être peint, enduit, traité, avec des armatures inoxydables pour réduire totalement le risque de dégradation. [1]

Ce calcul est rarement économiquement intéressant, le plus souvent réservé à des cas très particuliers comme les ponts de grande portée ou le stockage des déchets nucléaires. [1]



Figure .I.6 : Pont TGV Perpignan-Figueras. [1]

Conclusion :

En conclusion, on constate à l'usage que les concepts du développement durable se construisent dans une complexité évidente, contraire aux tentatives permanentes de simplification des problèmes. Les analyses de cycles de vie ne sont pas encore « mûres », car les données d'entrée restent entachées d'une incertitude forte. La liste des dimensions à prendre en compte dans ces analyses pour réduire l'empreinte écologique des activités humaines est aujourd'hui certainement loin d'être exhaustive. Pour autant, l'appréciation qualitative du béton dans les dimensions aujourd'hui référencées montre que ce matériau n'a pas à être cloué au pilori de l'écologiquement correct. Et, dans tous les cas, sa durabilité est le facteur fondamental pour réduire son impact. [1]

Chapitre II : Durabilité des bétons

II Durabilité des bétons :

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton est un des facteurs importants dans les domaines du génie civil et du génie industriel. C'est une préoccupation de plus en plus mise en avant par les gestionnaires d'ouvrages. Ces derniers exigent des durées de vie de plus en plus longues avec un minimum d'entretien. Par exemple les réseaux d'assainissement ou le patrimoine bâti doivent avoir une longue durée dans le temps.

Or la durabilité des ouvrages en béton est étroitement liée à celle du béton lui-même. Ce dernier est un matériau hétérogène et poreux en équilibre chimique réagissant avec son environnement (gel - dégel, pluie...).

L'étude de sa durabilité fait intervenir des couplages entre plusieurs disciplines : chimie, physique et mécanique, ceci à diverses échelles de la nanostructure à la macrostructure. Les études expérimentales des phénomènes liés à la durabilité nécessitent souvent un temps très long et les résultats sont parfois difficiles à exploiter.

Le PH de la matrice cimentaire est très Alcalin, il est voisin de 13, tout autre milieu dont le PH est inférieur à cette valeur peut être considéré comme un milieu agressif. Cependant le comportement du béton placé dans un environnement chimiquement agressif dépend de facteurs complexes et multiples liés d'une part à l'environnement (nature, concentration et renouvellement ou non des éléments agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de cure).

Pour réaliser un béton durable il suffit dans la majorité des cas de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Le respect d'exigences supplémentaires notamment le choix du ciment est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères, telle qu'une conservation en milieu chimique agressif (eau séléniteuse, nitrate d'ammonium etc....) éventuellement couplée à une température de climat chaud.

Dans cette étude les paramètres de quantification de la durabilité des ciments sont:

- la résistance en compression simple.
- la résistance en traction par flexion. [2]

II.2 Généralité sur les de béton :

II.2.1 Définition du béton :

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées a fin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ».

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil .Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

II.2.2 Les Constituants Du Béton :

II.2.2.1 Le ciment:

II.2.2.1.1 Définition :

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant, les 1450 °C .Broyés sous forme d'une poudre fine souvent D'une couleur grise, en contact avec l'eau forment des minéraux hydratés très stables. Les travaux effectués ont montré que les principaux composés du ciment portland sont :

- ❖ Le Silicate Tricalcique (Alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S).
- ❖ Le Silicate Bicalcique (Belite) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S).
- ❖ L'Aluminate Tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A).
- ❖ L'Alumino-Ferrite Tétracalcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ... etc.

Le ciment joue le rôle de liant du béton hydraulique. Le ciment est composé d'un mélange en poudre de chaux et de calcaire argileux qui durcit avec l'eau. Pour faire du béton ou du mortier, on utilise du ciment gris ordinaire dit de Portland. Il se vend généralement en sac de 50 kg Sa masse volumique absolue est de $3,02 \text{ g/cm}^3$.



Figure .II.4 : Le ciment.

II.2.2.1.2 Les constituants du ciment :

❖ Fabrication du clinker :

Le composé de base des ciments est un mélange de chaux apportée par des roches calcaires et d'alumine, de silice et d'oxyde de fer apportés par des argiles. Calcaires et argiles sont extraits de carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker Portland.

Le clinker, auquel on ajoute quelque pourcentage de gypse est ensuite finement broyé de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 kg/dm³.

❖ Autres Constituants Des Ciments :

Ils modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. De part leur nature, ils permettent aussi d'abaisser le prix de revient

✓ Laitier granulé de Haut fourneau (S) :

Il est obtenu par refroidissement rapide de scories provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier a des propriétés hydrauliques.

✓ Pouzzolanes naturelles (Z) :

Ce sont des roches d'origine volcanique ou sédimentaires ayant une composition appropriée, ou des argiles et schistes activés thermiquement. Les pouzzolanes n'ont pas de propriété

hydrauliques, mais en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment des hydrates stables :

on dit qu'elles ont des propriétés pouzzolaniques.

✓ **Cendres volantes (V ou W) :**

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques au charbon. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques; Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

✓ **Schistes calcinés(T):**

Ce sont des schistes portés à une température de 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

✓ **Calcaires (L):**

Ils doivent être constitués de 75% au moins de CaCO_3

✓ **Fumées de silice (D) :**

Proviennent de l'industrie du silicium et des alliages. Elles ont des propriétés pouzzolaniques.

✓ **Fillers(F):** Ce sont des constituants secondaires et n'excèdent pas 5% dans la composition des ciments.

Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

II.2.2.1.3 Le processus de fabrication de ciment Portland :

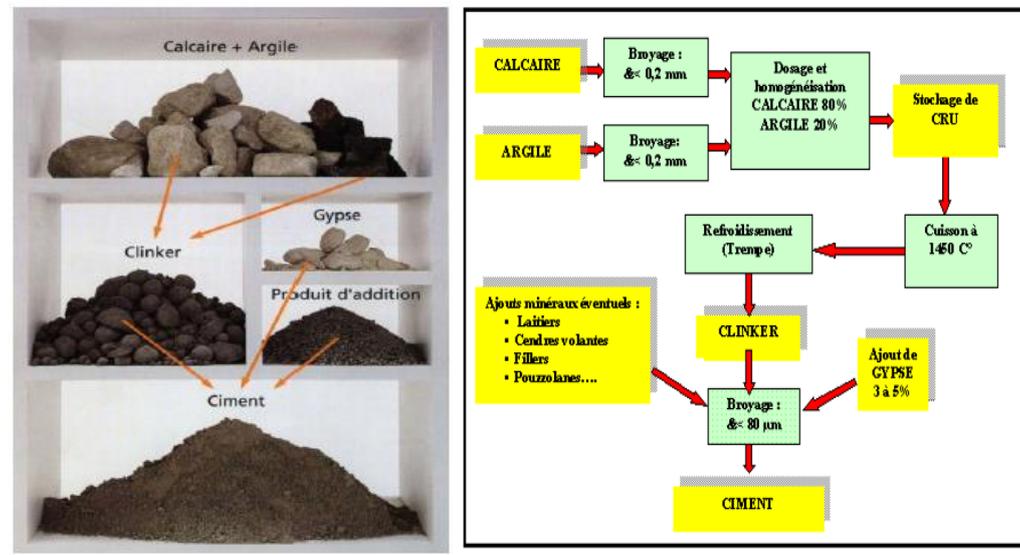


Figure II.5 : Etapes de fabrication du ciment.

II.2.2.1.4 Propriétés physico-chimiques du ciment :

Les ciments sont caractérisés par leur vitesse de réaction, leur chaleur d'hydratation, leur finesse etc.... Ces caractéristiques sont définies par des essais tels que:

- ❖ Composition chimique.
- ❖ Consistance normale.
- ❖ Temps de prise.
- ❖ Leur finesse de mouture (broyage).

II.2.2.1.5 Ajouts cimentaires :

Peuvent être utilisés dans le béton en remplacement partiel du ciment portland.

Les plus connus et les plus utilisés dans le béton sont:

- ❖ Les **cendres volantes** générées par la combustion du charbon dans les centrales thermiques.
- ❖ La **fumée de silice** émanant de certains procédés métallurgiques.
- ❖ Le **laitier** de haut fourneau.
- ❖ Pouzzolanes naturelles (**Métakaolin**).

D'autres ajouts cimentaires alternatifs moins connus peuvent aussi être utilisés:

- ❖ Des cendres de balles de riz.
- ❖ Du verre broyé.

On distingue deux types d'ajouts:

- ✓ **Ajout cimentaire hydraulique:** peut s'hydrater même en absence du ciment. Exemple le laitier, les cendres volantes de classe C etc.....
- ✓ **Ajout cimentaire pouzzolanique:** ne réagit qu'avec la présence du ciment portland. Les normes CSA A3000 et ASTM C618, 1240 définissent les critères d'utilisation des ajouts.

II.2.2.2 Les granulats :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : filles; sablons; sables; graves; gravillons; ballast; enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine Alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.



Figure .II.6 : Les granulats.

II.2.2.2.1 Caractéristiques des granulats :

La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons dépend grandement des caractéristiques des granulats dont les principales sont:

- ❖ La granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules.
- ❖ La résistance mécanique (compression, traction et module).
- ❖ La densité relative, la masse volumique.
- ❖ L'absorption, la porosité et la teneur en humidité.
- ❖ La présence de matières nuisibles.
- ❖ La résistance aux cycles de gel et dégel.
- ❖ La résistance à l'abrasion et aux chocs.

II.2.2.3 Le sable :

II.2.2.3.1 Définition :

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une Classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les filles.

A cette définition se rattachent les sables de concassage; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.



Figure .II.7 : Le sable.

II.2.2.3.2 Classification des sables :

- **Sable grossier** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.
- **Sable moyen** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.
- **Sable fin** : Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

II.2.2.4 L'eau de gâchage :

L'eau est un constituant du béton nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Une Classification classique permet de distinguer trois types d'eau :

- **L'eau chimiquement liée** : Elle n'est plus considérée comme faisant partie de la phase Liquide car cette eau est combinée aux hydrates, dont elle fait partie, sous forme d'eau de cristallisation.
- **L'eau adsorbée**: est constituée par les couches de molécules d'eau sur la surface solide des pores. Soumises aux champs des forces électriques superficielles des particules de CSH et à l'action des forces de VAN DER WAALS. La structure électronique de la molécule d'eau ne varie que très peu dans ce cas la.
- **L'eau libre**: cette eau échappe aux forces superficielles des particules solides. En excès par rapport à l'eau nécessaire à l'hydratation, elle occupe les micropores. [4]



Figure .II.8 : L'eau de gâchage.

II.2.2.5 Adjuvants chimiques :

Pour améliorer certaines propriétés des bétons on a recours à des adjuvants chimiques. Les adjuvants sont des produits organiques et inorganiques qui, quand ils sont ajoutés en petite quantité, modifient certaines propriétés des bétons. Les plus connus sont: Entraîneur d'air, Réducteur d'eau à moyen ou à forte action, accélérateur ou retardateur de prise etc....

L'addition de ces produits dans le béton engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes.

On utilise les adjuvants surtout pour :

- ❖ Diminuer le coût des constructions en béton.
- ❖ Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
- ❖ Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.
- ❖ Obéir à certaines urgences durant le bétonnage. [5]

II.2.3 Différents types de bétons :

II.2.3.1 Béton auto plaçant (BAP) :

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon.

Le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration.

Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

II.2.3.2 Béton de haute performance (BHP) :

Bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0,40. Leur propriété essentielle est leur grande Résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires.

Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de Gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants.

II.2.3.3 Béton de fibre :

Béton dans lequel sont incorporées des fibres, ce qui permet suivant l'ouvrage de supprimer le Treillis soudé traditionnel.

II.2.3.4 Béton a durcissement rapide :

Bétons dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent La réalisation des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service Rapide, ainsi que le décoffrage prématuré ou la mise en précontrainte le plus rapidement en Préfabrication.

II.2.3.5 Béton léger :

Les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage 2100 kg/m³. Parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique.

II.2.3.6 Béton lourd :

C'est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau.

II.2.3.7 Béton ordinaire :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, eau, avec un rapport (E/C) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre $20 \text{ MPA} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPA}$.

II.2.4 Caractéristiques du béton :

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois. La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.

Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

II.2.4.1 Résistance à la compression :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression unie axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

II.2.4.2 Résistances à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm sont soumises à un moment de Flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

II.2.5 Propriétés des bétons :

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

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

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

II.2.5.1 Le béton a l'état frais :

II.2.5.1.1 Définition :

Mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage. La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau.

Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton:

- Méthode et durée de transport.
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats).
- Forme, granulométrie et type de granulats.
- Le volume d'air.
- Le dosage en eau.



Figure .II.1 : Béton a l'état frais.

II.2.5.1.2 La valeur d'affaissement au cône d'Abrams :

La norme NF EN 206-1 définit c cinq classes de consistance.

Tableau.II.1 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams.

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥220

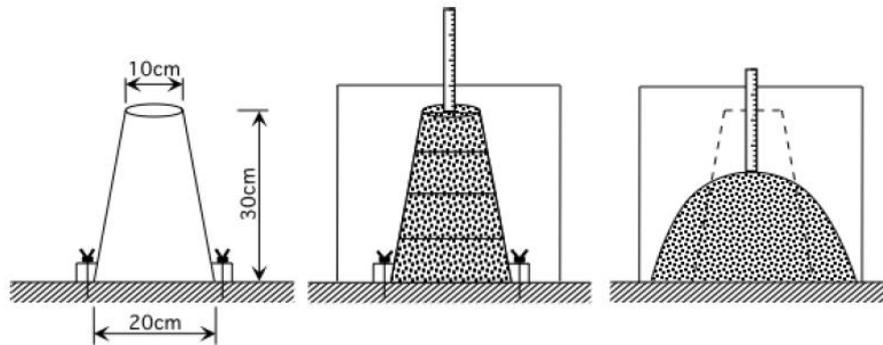


Figure II.2 : Teste de cône d'Abrams.

II.2.5.1.3 La masse volumique du béton frais :

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = (M2 - M1) / V$$

D : est la masse volumique du béton.

M1 : est la masse du récipient (kg).

M2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³).

II.2.5.2 Le béton a l'état durci:

II.2.5.2.1 Définition :

Solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

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

- ❖ La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- ❖ Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- ❖ Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- ❖ Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.



Figure .II.3 : Béton a l'état durci.

II.2.5.2.2 Résistance à la compression :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de Compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = F / A_c$$

f_c : résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés).

F : charge maximale, exprimée en Newtons.

A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à MPa (N/mm^2) près.

II.2.5.2.3 Résistance à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NFP18-407(NA428), munie d'un banc de flexion à 4 points. Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = (P * A) / 2$$

La contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$

La relation suivante permet de calculer la résistance : [3]

$$F_{ftj} = 1.8 (P / a^2)$$

II.2.6 Rôle des différents éléments constituant le béton :

- **Ciment** : c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau**: c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats** : ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- **Le sable**: il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- **Adjuvants**: pour donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens. et Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables. [4]

II.3 Principaux avantages et inconvénients de bétons :

II.3.1 Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

II.3.2 Inconvénients du béton :

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation).
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux).
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.[6]

II.4 Définition de la durabilité des bétons :

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à

maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu qui est appelé la durée de d'utilisation de projet. La prise en compte de cette durabilité permet de valider et justifier la rentabilité de l'investissement.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Pour s'assurer de cette durabilité, pendant longtemps les bétons ont été longuement spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte. Un béton performant ayant en principe un dosage correct en ciment et une bonne compacité, ces deux prescriptions pouvaient effectivement garantir une certaine durabilité du matériau béton.

La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de mise en œuvre, de fabrication et d'entretien. [7]

II.5 L'approche performantielle :

Cette nouvelle tendance de conception des ouvrages sur la base d'une approche performantielle nécessite de prendre en compte, dès la phase de

conception, le comportement à long terme et de pouvoir spécifier, notamment pour les projets importants, des critères performantiels sûrs et objectifs en matière de durabilité.

La phase de conception est en effet capitale : c'est à ce stade que l'on peut agir au maximum sur le niveau de durabilité, en vue de limiter les dépenses de maintenance et d'entretien futurs. Il est en effet toujours plus facile et moins coûteux d'optimiser la formule du béton, plutôt que de mettre en œuvre des moyens lourds et souvent d'efficacité aléatoire lors de la construction ou lors des phases de réparation.

Les critères performantiels doivent être adaptés aux nouvelles exigences de durée de vie, aux nouvelles méthodes de formulation des bétons et aux procédés de fabrication (préfabrication, par exemple), mais aussi, au-delà de la technique, d'une manière générale, aux objectifs économiques, environnementaux et sociaux spécifiques à chaque ouvrage, quelle qu'en soit l'importance. Cette méthode est typiquement utilisée dans le cas où la durabilité attendue de l'ouvrage dépasse 50 ans.

Cette approche a été développée pour la prévention de la corrosion des armatures et des dégradations générées par l'alcali-réaction, en se plaçant au niveau du matériau béton. Il offre à l'ingénieur (et au concepteur en général) une « boîte à outils », c'est-à-dire une méthodologie complète, pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité. Elle fournit des réponses pratiques, applicables dès maintenant sans attendre de nouveaux progrès scientifiques. Elle est basée sur des paramètres simples, mais particulièrement pertinents pour quantifier les phénomènes et pour utiliser des outils prédictifs.

Cette approche (en anglais PSC ou PBS pour Performance-Based Specification of Concrete) définit des stipulations en termes de résultats et donc de performances. Il s'agit d'une démarche prédictive, par essai ou modélisation, de la durabilité des structures en béton, basée soit sur l'évaluation "directe" des performances en relation avec un mécanisme d'agression, soit sur la notion d'indicateurs "indirects" de durabilité.

Cette approche peut être utilisée au niveau du design mais également en contrôle de conformité. L'approche performantielle de la durabilité doit être appliquée pour la construction, mais également pour la gestion (ultérieure) des ouvrages.

La première application en Europe de l'approche performantielle a été faite en 1995 sur les bétons du pont Vasco de Gama, à Lisbonne, dans la perspective d'une durée de vie contractuelle de 120 ans.

II.5.1 Etapes de la démarche performantielle :

La démarche performantielle se déroule en général de la manière suivante :

- Définition de la catégorie de l'ouvrage en déterminant son importance économique et stratégique, en particulier en sélectionnant la durée de vie exigée.
- Définition des conditions environnementales incluant par exemple le type d'agressivité, les variations de l'humidité,... etc.
- Définition des risques de dégradation: corrosion des armatures, alcali réaction,...
- Choix des indicateurs de durabilité et des caractéristiques du matériau en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, de son environnement et des dispositions constructives.
- Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité en fonction de l'importance de l'ouvrage, du type d'environnement, de la durée de vie exigée et des dispositions constructives.
- Réalisation des essais de laboratoire sur béton suivant un mode opératoire bien déterminés, sur des éprouvettes conservées dans des conditions précises et pendant une durée préconisée.
- Choix d'un modèle prédictif de durée de vie où les indicateurs de durabilité paraissent comme des données d'entrée. [8]

II.6 Indicateurs et les paramètres et les facteurs de durabilité :

II.6.1 Définition des indicateurs de durabilité :

Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif, (béton), qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou de plusieurs processus de dégradation.

Ils interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique.

Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés.

Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates.

Deux catégories d'indicateurs sont à distinguer, La première est celle des indicateurs de durabilité généraux, qui sont valables pour différents types de dégradation (corrosion des armatures, alcali-réaction...etc.).

La deuxième catégorie est celle des indicateurs spécifiques relatifs à un processus de dégradation donné, par exemple l'alcali-réaction ou le gel.

En outre, la détermination directe de certains indicateurs de durabilité généraux pourra être remplacée par celle d'indicateurs de substitution.

II.6.1.1 Indicateurs de durabilité généraux sélectionnés :

Les indicateurs de durabilité généraux que l'on peut sélectionner selon les critères explicités ci-dessus, sont les suivants :

- ❖ Porosité accessible à l'eau.
- ❖ Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure.
- ❖ Perméabilité aux gaz.
- ❖ Perméabilité à l'eau liquide.
- ❖ Teneur en portlandite Ca(OH)_2 (initiale, dans le cas d'un matériau carbonatable).

Ce panel d'indicateurs de durabilité généraux constitue un ensemble de paramètres non redondants. Néanmoins, la détermination de l'ensemble de ces paramètres n'est pas systématiquement nécessaire.

Dans cette liste, les paramètres à déterminer effectivement dépendront des dégradations prévisibles, de l'environnement, du cas pratique étudié...etc.

Ceci est illustré par les paramètres impliqués dans les spécifications selon le cas considéré ou encore par ceux requis par les modèles prédictifs.

II.6.1.2 Indicateurs de durabilité spécifiques, sélection et justification :

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques à ce processus

à titre d'exemple, pour la prévention des dégradations dues au gel, les caractéristiques du réseau de bulles d'air (en particulier le facteur d'espacement : demi-distance entre deux bulles voisines) semblent être un indicateur spécifique pertinent. En effet, ces caractéristiques peuvent se révéler au moins aussi importantes que les caractéristiques durées eau poreux, vis-à-vis du gel, selon le type de béton considéré et la quantité d'air entraîné.

Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques, concernent deux échelles d'observation.

II.6.1.3 Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton) :

Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique), pour l'évaluation de la réactivité des granulats et la concentration en alcalins équivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) actifs de la solution interstitielle (où $[\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}] = [\text{Na}_2\text{O}] + 0,658 [\text{K}_2\text{O}]$). Le rôle primordial des alcalins actifs, c'est-à-dire ceux dosés dans le filtrat d'une attaque sélective, dans le développement d'une alcali-réaction a en effet été démontré. Le moyen le plus simple d'accéder à cet indicateur est d'effectuer un bilan des alcalins.

On notera que le recours à cet indicateur n'est nécessaire que dans le cas de granulats peu réactifs.

II.6.1.4 Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci) :

Déformations de gonflement d'éprouvettes en béton (« essai de performance » d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction, faisant l'objet de la norme NF P 18-454. Cet indicateur est requis seulement dans certains cas

II.6.1.5 Indicateurs de substitution, fonctions et sélection :

La nouvelle approche de la durabilité ayant pour vocation de rester très souple et modulable afin de s'adapter aux besoins de chaque utilisateur, il peut-être envisagé de remplacer la détermination directe de certains des indicateurs de durabilité généraux par celle d'indicateurs de substitution. Ce pourra notamment être le cas pour des paramètres plus faciles à déterminer ou tout au moins accessibles par des méthodes d'essai pratiquées plus couramment dans certains laboratoires, ou bien pour des paramètres plus adaptés au problème

posé ou aux modèles mis en œuvre, ou encore lorsque des méthodes fournissant des données complémentaires aux indicateurs généraux sont requises.

Les indicateurs de substitution pourront soit être utilisés directement (notamment pour un simple classement de bétons, sous réserve qu'un système de classement soit disponible), soit permettre via des méthodes indirectes d'accéder aux indicateurs de durabilité généraux proposés. [9]

II.6.2 Paramètres de la durabilité :

L'examen d'un problème de durabilité nécessite donc de prendre en compte l'ensemble des paramètres, généralement interactifs, qui déterminent le comportement du béton vis-à-vis des différents agresseurs. Ces paramètres sont décrits ci-après.

II.6.2.1 Paramètres liés au matériau :

- ❖ Nature minéralogique des granulats.
- ❖ Teneurs en additions minérales.
- ❖ Teneurs en aluminat tricalcique C_3A et en silicate tricalcique C_3S .
- ❖ Teneur potentielle en portlandite $Ca(OH)_2$.

II.6.2.2 Paramètres liés à l'environnement :

Les principaux paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- ❖ La nature physique de l'agent agressif.
- ❖ La nature chimique de l'agent agressif.
- ❖ Les conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales.
- ❖ L'humidité relative du milieu.
- ❖ La température qui est généralement un facteur d'accélération des réactions.
- ❖ Les cycles climatiques.
- ❖ La mobilité du milieu agressif.

II.6.2.3 Paramètres liés à la structure :

L'approche « holistique » des problèmes de durabilité nécessite que soient pris en compte les effets des contraintes mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage : chargements, fatigue, dilatations et retraits différentiels...

Ces contraintes peuvent engendrer des fissurations qu'il convient de bien différencier de celles qui sont produites sous l'effet d'un agent agressif. Ces fissurations sont susceptibles d'accélérer et d'aggraver d'éventuelles attaques chimiques qui sont susceptibles elles-mêmes d'affaiblir la structure.

II.6.2.4 Paramètres économiques :

Les contraintes économiques locales imposent parfois le choix de matériaux (granulats, ciment) non optimisés vis-à-vis de la durabilité. Si l'importance de l'ouvrage le justifie, il peut être envisagé de mettre en œuvre une approche performantielle basée sur l'équivalence de performance d'une formule donnée de béton par rapport à un béton de référence conforme aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour l'environnement considéré, la démonstration de l'équivalence devant être faite. [10]

II.6.3 Les facteurs influant sur la durabilité des bétons :

Les principaux facteurs pouvant affecter la durabilité d'un béton sont la fissuration et la perméabilité car ils permettent aux agents agressifs présents dans l'eau et l'atmosphère d'attaquer la structure et notamment les armatures. La fissuration affecte sérieusement la durabilité du béton et donc de la structure, et dans ce sens, les fissures constituent des points de faiblesse potentielles qui affectent négativement la durabilité des constructions plus les facteurs suivants :

- ❖ L'effet de la température.
- ❖ La présence d'agents agressifs dans l'air ambiant tel que les embruns marins.
- ❖ Les sulfates dans le sol notamment dans régions du sud du pays.
- ❖ L'effet des vibrations sismiques.....etc. [9]

II.7 Condition de la durabilité des bétons :

La durée de vie probable est généralement estimée dans les études par rapport à l'ELS de durabilité. Pour concevoir une structure durable avec ces approches probabilistes, il est nécessaire de définir :

- ❖ Un modèle de conception qui prenne en compte les modèles de dégradation des matériaux, pour décrire l'évolution dans le temps de la résistance de la structure et de la sollicitation appliquée par l'environnement.
- ❖ Des états limites bien identifiés par des critères.
- ❖ La probabilité de défaillance maximale acceptable, associée à l'état limite identifié précédemment et définie par le maître d'ouvrage.
- ❖ La durée de vie minimale exigée par le maître d'ouvrage pour une probabilité de défaillance donnée.

En ce qui concerne les structures en béton armé, il est possible de définir des états limites de durabilité pour chacun des désordres liés à la corrosion des armatures (dépassivation, fissuration, éclatement...).

Les états limites de service suivants peuvent être considérés :

- ❖ **ELS 1** : dépassivation des armatures due à une carbonatation du béton ou à une pénétration des chlorures (frontière entre périodes d'incubation et de propagation).
- ❖ **ELS 2** : apparition des premières *fissures* dues à la formation de produits de Corrosion.
- ❖ **ELS 3** : *éclatement* du béton en parement (si la chute de pièces en béton n'induit pas la mise en danger de l'utilisateur).

Habituellement, c'est l'ELS 1 qui est considéré comme état limite car la modélisation de la fissuration du béton due à la corrosion est complexe à modéliser.

La durée de vie par rapport à la corrosion des aciers peut alors être définie comme le temps nécessaire pour que l'ELS1 soit atteint :

- ❖ Environnement sans chlorure : temps mis pour que la profondeur de carbonatation soit égale à l'enrobage.

- ❖ En présence de chlorures : temps mis pour que la concentration en chlorures libres $[\text{Cl}^- \text{ libres}]$ atteigne une concentration critique $[\text{Cl}^- \text{ libres}]_{\text{crit}}$ au niveau du premier lit d'armatures.

Les témoins de durée de vie associés sont:

- ❖ Environnement sans chlorure : profondeur de carbonatation (*i.e.* zone où pH 9) et évolution en fonction du temps (cinétique), ou évolution du profil de teneur en CaCO_3 (ou en Ca(OH)_2 résiduelle) en fonction du temps.
- ❖ En présence de chlorures : profondeur de pénétration des chlorures et évolution en fonction du temps (cinétique), ou évolution du profil en fonction du temps. [11]

II.8 La clé d'une bonne conception (durabilité) :

L'objectif vis à travers une construction durable est que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité.

Il est utile d'ajouter que le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression. De plus, on constate, ce qui n'était pas toujours le cas auparavant, que, dans bien des cas, un entretien régulier du béton est nécessaire.

Depuis quelques décennies, la nécessité s'est faite sentir de formuler des bétons adaptés à leur utilisation, et l'on peut formuler des bétons durables en utilisant des granulats adéquats, en réduisant la quantité d'eau, en utilisant des adjuvants adéquats et en effectuant une mise en place, une vibration et une cure soignées. Ceci garantira au béton un retrait faible, une certaine compacité, et une bonne ouvrabilité. De plus, la durabilité peut être améliorée par une bonne conception structurale, en utilisant la technologie de la précontrainte qui diminuerait le risque de fissuration, source de pénétration des agents extérieures, en disposant correctement une quantité suffisante d'armatures passives, en prévoyant un enrobage suffisant afin de protéger les armatures, et enfin en planifiant judicieusement les étapes de construction. Ceci permet de limiter l'ouverture d'éventuelles fissures.

La durabilité du béton est, dans bien des cas, d'une très grande importance. Il n'en demeure pas moins que, jusqu'à récemment, la technologie du béton a eu comme principal objectif de parvenir à des résistances mécaniques de plus en plus élevées. On avait posé comme hypothèse "qu'un béton résistant est un béton durable", dans de nombreuses conditions d'exposition des structures en béton, la résistance mécanique et la durabilité doivent ensemble être prises en considération dès l'étape de conception.

L'expression durabilité du béton est souvent utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif, physique ou chimique.

Les agents agressifs qui attaquent le béton peuvent être classés schématiquement en deux grandes catégories :

- ❖ Les agents externes
- ❖ Les agents internes.

Parmi les agents externes, on peut citer les ions chlore, le gaz carbonique, les sulfates, les cycles de gel dégel, et les abrasifs. Parmi les agents internes, on retrouve les ions chlore incorporés dans certains accélérateurs, les alcalis du ciment avec des granulats contenant des silices et donc potentiellement réactifs. [12]

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté une petite généralité sur les bétons, avec les différents types et composition des bétons, et on a cité le rôle de chaque constituant plus les principaux avantages et inconvénients des bétons.

On a aussi déterminé et défini la notion de la durabilité des bétons avec ces indicateurs et différents paramètres et facteurs influents sur la durabilité des ouvrages.

Chapitre III :

Les dégradations

des bétons

III Les dégradations des bétons :

III.1 Introduction:

Les structures en béton sont souvent affaiblies par les dégradations qui les affectent durant leur vie, ceci est dû à l'environnement qui n'a pas été pris en considération. La dégradation qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées.

Pour ne pas arriver à ce stade on doit freiner sa progression ou la neutraliser le plus vite possible en prenant les mesures nécessaires qui s'imposent.

Une fois les causes ainsi que les dégradations 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 dégradations similaires, il est possible de protéger la structure. Il existe un grand nombre de protections, elles sont à choisir selon les différentes dégradations, 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 dégradations. 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. [13]

Dans ce chapitre nous parlerons de ces dégradations comment sont détectées et leurs causes d'y être.

III.2 Les différentes dégradations pouvant affecter les bétons :

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons.

III.2.1 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. [14]

III.2.1.1 Fissure :

La fissure est un « défaut » ou une « discontinuité brutale » apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond.

La fissuration peut se propager dans toute la masse d'un béton saturé, cette dégradation se manifeste par une intense microfissuration de la pâte de ciment.

La fissuration se manifeste ensuite par une intense dégradation de toutes les surfaces exposées. La profondeur de dégradation peut atteindre plusieurs centimètres. Les gros granulats sont facilement déchaussés. Le béton sévèrement attaqué perd toute sa cohésion et s'érode rapidement en libérant des fragments de pâte et tout son squelette granulaire.

La fissuration engendre une diminution de la résistance à la compression et une importante chute de la résistance à la traction et du module d'élasticité des bétons. Elle peut diminuer la performance du béton d'enrobage en augmentant sa perméabilité et en diminuant sa résistance à la pénétration des agents externes potentiellement agressifs. [15]

III.2.1.2 Retrait :

Le retrait est qualifié d'endogène ou d'autodessiccation en l'absence d'échange hydrique (sans perte de masse) avec le milieu ambiant, et le retrait est dit de dessiccation ou de séchage lorsqu'il y a déséquilibre hydrique entre l'intérieur du béton durci dont l'hygrométrie de départ est de l'ordre de 75 à 100 % selon le rapport E/C et celle du milieu ambiant. [15]

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 :** 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 :** 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 thermique :** 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:** 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. [14]

III.2.2 Dégradations Physiques :

- **Abrasion :**

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels etc.

- **Erosion :**

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.

- **Cavitation :**

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

- **Chocs :**

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.

- **Surcharge :**

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

- **Le feu :**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

- **Cycle gel/ dégel :**

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. **[16]**

- **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. [14]



Figure III.1 : Dégradation due aux sels de déverglaçage.

III.2.3 Dégradations Chimiques :

III.2.3.1 Réactions Alcalis-Granulats (RAG) :

La réaction alcali-granulats est une réaction chimique à évolution lente entre certains granulats dits « réactifs » et les alcalins normalement présents dans la solution interstitielle du béton ou introduits par des agents extérieurs.

Cette réaction conduit à la formation d'un gel de silicate suivie d'un gonflement du béton qui provoque une fissuration importante et une perte de résistance considérable.

Afin qu'une réaction alcali-granulats ait lieu, les trois conditions suivantes doivent être réunies mais ne donnent pas forcément lieu à la réaction :

- Présence de granulats réactifs (silice mal cristallisée)
- Milieu ambiant humide
- Teneur suffisante en alcalins dans le béton (calcium, sodium). [17]

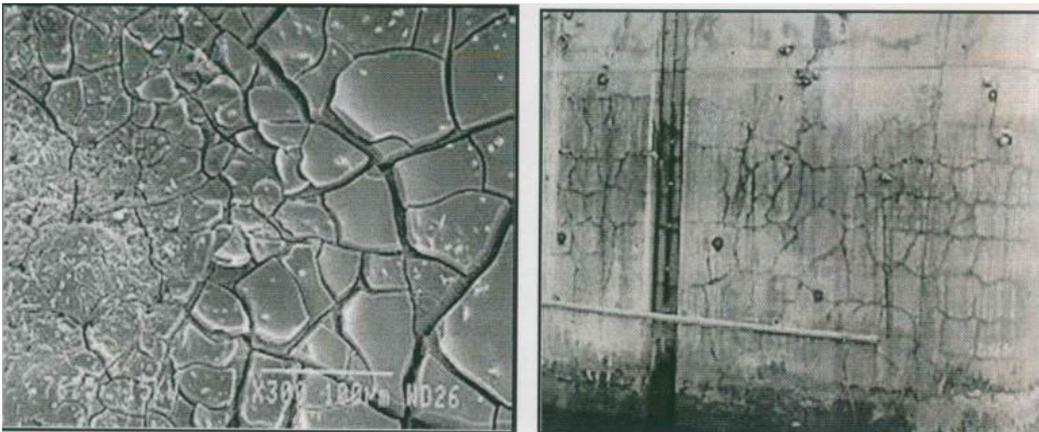


Figure III.2 : Réactions alcalis-granulats.

❖ Désordres dus à l'alcali-réaction :

La dégradation et les manifestations externes de la réaction alcali-granulat se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants:

- Une fissuration.
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant la direction de distribution des armatures.
- Des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels siliceux translucides.
- Des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement.
- Des déformations.
- Des colorations ou décolorations. [17]

III.2.3.2 La réaction sulfatique interne :

La réaction sulfatique interne résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire qui normalement se transforment en ettringite primaire lors de la prise du béton.

Si cette réaction ne peut avoir lieu, l'ettringite secondaire (également dite différée) expansive peut se former ultérieurement dans le béton durci et provoque son gonflement et sa désorganisation.

Cette remobilisation des sulfates nécessite une élévation de température notable et durable du béton pendant sa prise (par exemple, > 75°C pendant plus de 4 heures), la réaction se produit donc essentiellement dans des bétons étuvés ou des pièces massives (piles de pont de section importante par exemple).

D'autres paramètres de la réaction sulfatique interne :

- Teneur en alcalins du béton.
- Teneur en SO_3 et $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$ du ciment.
- Formulation du béton (dosage en ciment, E/C granulats).
- Humidité relative du milieu. [17]

❖ Dégradation dus à la réaction sulfatique interne :

Les désordres provoqués par l'attaque sulfatique sont dus principalement au :

- Gonflement du béton.
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges.
- Éclatements localisés de la matrice cimentaire au droit du granulat. [17]

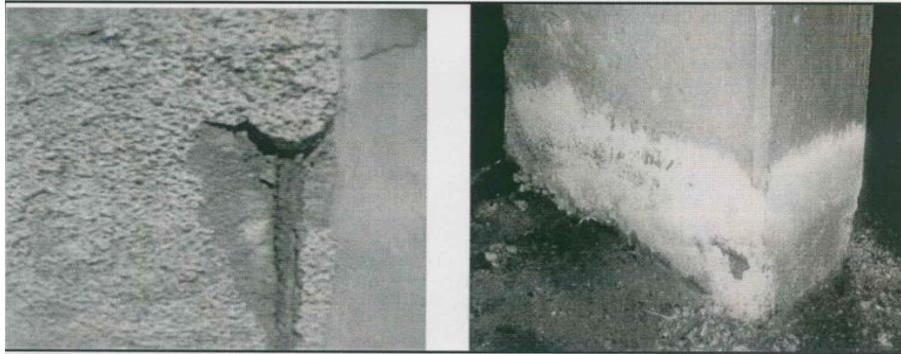


Figure III.3 : Attaques sulfatiques.

III.2.3.3 Attaque sulfatique externe :

Les sulfates source de cette attaque ont des origines naturelles mais aussi accidentelles notamment la pollution industrielle. Les sols peuvent contenir naturellement une quantité de sulfates (de 0.01 à 0.05%). Dans le cas des sols constitués de roches gypseuses, cette teneur peut être supérieure à 5%.

Les eaux souterraines séléniteuses proviennent de la dissolution de nappes de gypse. Elles peuvent aussi provenir de la dissolution de tous les sulfates alcalins. L'eau de mer est naturellement chargée en sulfates.

Les ions sulfatiques ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite secondaire, le gypse secondaire et la thaumasite.

Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations. [17]

Origines :

- Eau de mer
- Sols contenant des sulfates, engrais...

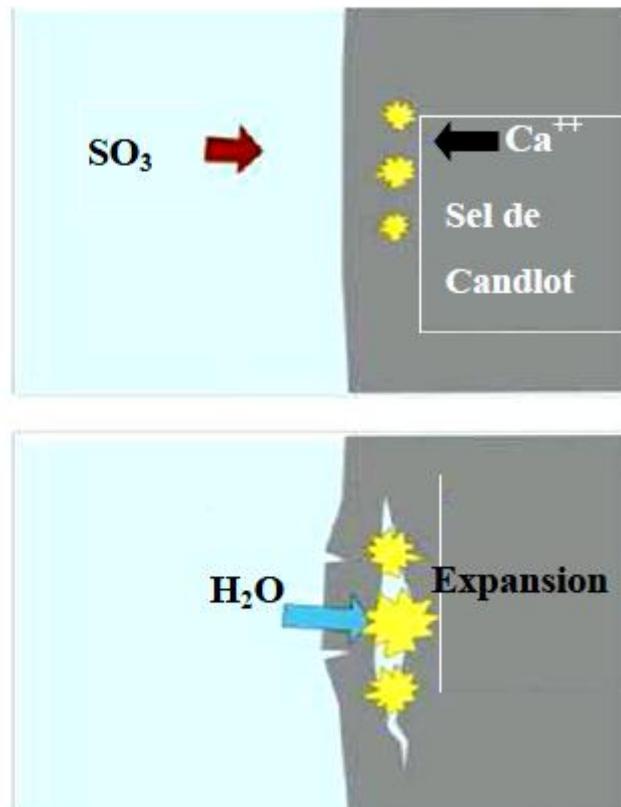


Figure.III.4 : Schéma illustratif de l'attaque sulfatiques externe.

III.2.3.4 Attaque due aux acides :

Le principal milieu externe d'agression chimique pour le béton, c'est le milieu acide. Lorsque les acides entrent en contact avec le béton, ils dissolvent la chaux produite par l'hydratation du ciment, faisant alors progressivement diminuer le PH et ils annihilent ainsi la passivation des aciers mais aussi la résistance du béton. Plus le PH est faible plus l'attaque est importante.

Les différents types des acides :

- Les pluies acides (cas extrême des eaux usées).
- Les acides minéraux.
- Les acides organiques. [17]

Origines :

- Pluies acides
- Produits chimiques
- Produits de fermentation
- Eaux usées, domestiques....

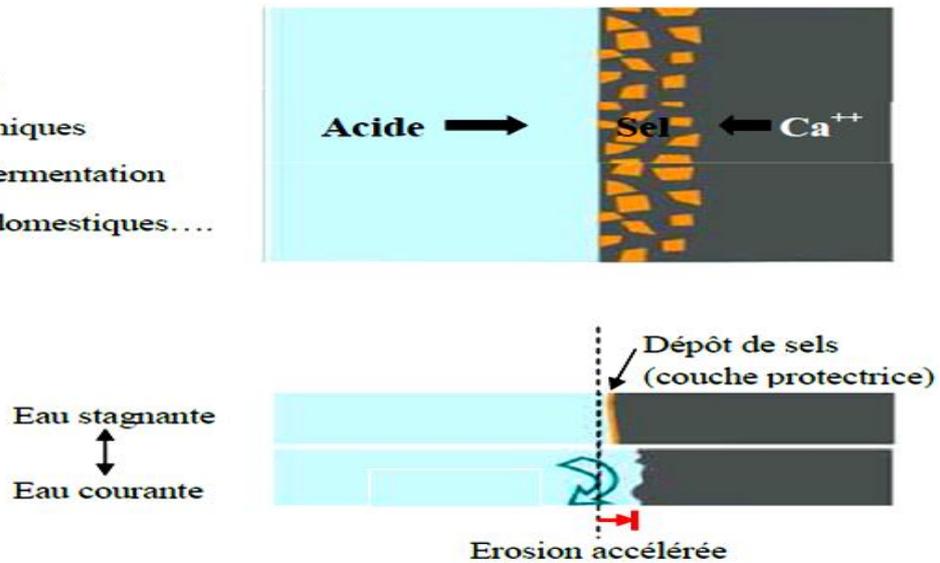


Figure.III.5 : Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton.

III.2.3.5 Lixiviation :

Lixiviation est une opération qui consiste à faire passer lentement un solvant à travers un matériau en couche épaisse afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles.

C'est le terme souvent employé pour décrire le phénomène d'extraction progressive des ions calcium (dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et décalcification des C-S-H) lors de la percolation des solutions agressives dans le béton.

La lixiviation peut être décrite comme une dissolution progressive résultant d'une succession d'états d'équilibre entre les hydrates et la solution : au fur et à mesure que les ions agressifs arrivent au contact des hydrates, l'équilibre entre ces hydrates et la solution interstitielle est rompu mais il est aussitôt rétabli par une nouvelle dissolution des hydrates et/ou par la précipitation d'un nouveau composé selon que la solution est sous-saturée ou sursaturée par rapport à ce composé. [10]



Figure III.6 : Lixiviation.

III.2.3.6 Action de l'H₂S sur les bétons :

L'hydrogène sulfuré est un gaz extrêmement inflammable, qui peut former des mélanges explosifs avec l'air. D'autre part, le contact avec les produits oxydants peut être une source d'incendie et d'explosion.

La dégradation du béton dans les ouvrages d'assainissement par l'action de l'H₂S est une attaque acide à PH très faible (généralement inférieur à 1).

L'acide sulfurique (H₂SO₄) formé à partir de H₂S réagit avec les composant calciques (entre autre Ca(OH)₂), présent dans la matière cimentieuse en formant du gypse (sulfate de calcium).[18]

III.2.3.6.1 Risques d'incendie :

En cas d'incendie, le dioxyde de carbone et les poudres chimiques peuvent être utilisés comme agent extincteur, mais seulement s'il on est certain de pouvoir stopper l'émission de gaz. Dans le cas contraire, il est préférable d'éloigner de la flamme tout élément combustible et de laisser brûler.

En raison de la toxicité de l'hydrogène sulfuré et des fumées émises, les intervenants doivent être équipés d'appareils de protection respiratoire isolants autonomes et de combinaisons de protection spéciales. [18]

III.2.3.6.2 Comment se forme l'H₂S ?

Quand les conditions de septicité sont réunies, les eaux usées se retrouvent en phase dite d'anaérobie. Dans cette phase se produit le processus de formation de sulfures dissous (S²⁻) et d'hydrogène sulfuré (H₂S).

Les populations bactériennes actives en anaérobie sont les bactéries fermentatives et les bactéries sulfato-réductrices. Elles utilisent les sulfates comme source d'énergie pour dégrader la matière organique et produire ainsi des sulfures dissous et de l'H₂S. [19]

III.2.3.6.3 Les principaux facteurs influant sur la formation d'H₂S :

- Quantité de matière en suspension dans l'effluent (formation de dépôt et bio film).
- Température de l'effluent (développement des bactéries et de leur activité).
- Concentration en oxygène et en sulfates (alimentation du travail des bactéries).
- Vitesse d'écoulement de l'effluent (sédimentation, temps de contact avec les bactéries).
- PH de l'effluent (transformation des sulfures en H₂S).

L'H₂S se forme dans les collecteurs mais dégaze essentiellement dans les postes de relevage et de refoulement où l'effluent subit les plus fortes turbulences.

C'est donc à ces points précis du réseau ainsi que dans les collecteurs en aval que la problématique de la corrosion par l'acide sulfurique sera la plus forte. [20]

III.2.3.7 Attaques due au H₂SO₄ :

Le H₂SO₄ qui se trouve dans les milieux industriels sous forme gazeuse et liquide présente un effet néfaste sur le béton, acier et même la santé des ouvriers.

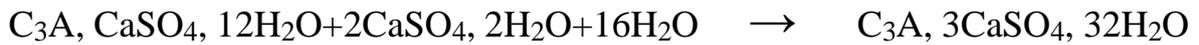
Sachant que le béton est de PH basic cette propriété joue un rôle très important dans la durabilité du béton, mais la présence des produits chimiques tel que H₂SO₄ à proximité des constructions pose un problème réel.

L'attaque de l'acide sulfurique sur le béton armé se traduit par une perte de masse (détérioration) et la résistance à la compression diminue d'une manière tragique tous ça est le résultat des réactions chimiques entre l'acide et les constituants du ciment à savoir.

D'une part la formation du gypse secondaire suite à la lixiviation (dissolution) de la portlandite (Ca (OH)₂) et silicates de calcium hydratés C-S-H selon la notation cimentière C=CaO, S= SiO₂, H=H₂O et le carbonate de calcium (Ca CO₃) des ajouts selon :



D'autre part la formation de l'ettringite secondaire produit des réactions entre l'aluminat de calcium C_3A ($3CaO, Al_2O_3$), le monosulfoaluminate tétracalcique ($C_3A, CaSO_4, 12H_2O$) et l'hydrate d'alumine ($C_3A, 6H_2O$) et le gypse respectivement selon:



Les solides ainsi formés possèdent deux volumes beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donnée naissance; il en résulte donc une expansion qui conduira a la détérioration donc l'attaque du béton par le H_2SO_4 peut engendrer une lixiviation du béton et une dépassivation des armatures en réduisant le PH de la solution interstitielle. [17]



Figure III.7 : Evolutions de dégradation des éprouvettes en mortier de ciment dans des milieux acides à différentes concentration.

III.2.3.8 La carbonatation :

La carbonatation est un phénomène chimique lié à l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère. C'est une pathologie de béton qui avec le temps atteint des couches de plus en plus importantes. Elle dégrade les bétons armés et elle est notamment responsable de la mise à nu de leurs armatures en acier.

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction dite de carbonatation avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ « chaux hydratée », qui est une base, et qui confère à l'eau qui se trouve dans les pores du béton un pH élevé (entre 12,5 et 13), en carbonate (CaCO_3).

Ce front de carbonatation abaisse le PH de la solution interstitielle depuis 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures.

La chaux libre (CaO) et les alcalis du ciment (Na_2O et K_2O) contribuent également à rendre l'eau des pores basique.



La carbonatation entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'acier censées garantir cette résistance gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage les aciers sont alors mis à nu. [21]

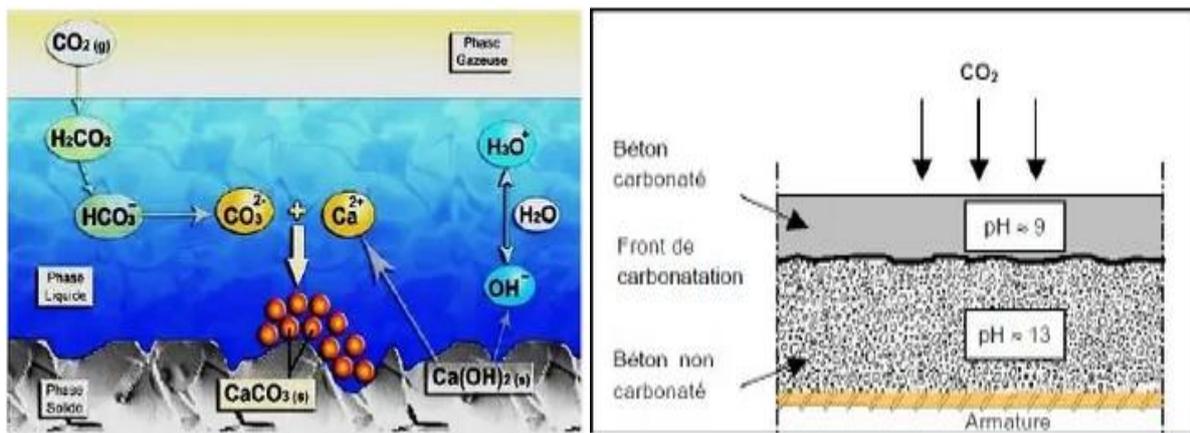


Figure III.8 : Phénomène de la carbonatation.

III.2.3.8 .1 Les principaux facteurs influant la carbonatation :

- La composition du béton.
- Le dosage en eau et en ciment rapport E/C.
- Le milieu et la nature de l'ouvrage.
- Le rapport surface/volume.

Suivant la quantité de chaux renfermée dans le ciment, l'humidité du matériau et de l'ambiance enfin et aussi de l'exposition le phénomène évoluera différemment.

Dès la formation superficielle des premières couches carbonatées, le phénomène se ralentit ou s'annule. [17]

III.2.3.8 .2 Vitesse de carbonatation :

Après un temps assez court d'un à trois mois, la vitesse de carbonatation devient à peu près inversement proportionnelle à la profondeur déjà carbonatée car la couche superficielle de carbonate formée freine la diffusion du gaz carbonique.

Exemple :

Pour fixer les idées, à propos d'un béton moyen, conservé en atmosphère ordinaire à environ 65 % d'humidité relative, on peut donner les valeurs suivantes :

- 5 mm de carbonatation après 1 an.
- 10 mm de carbonatation après 4 ans.
- 25 mm de carbonatation après 25 ans (et peut aller jusqu'à 10 cm. [17])

III.2.3.9 Attaques des aciers par les Chlorures :

Les chlorures pénètrent généralement par diffusion due au fait que la teneur en chlorure est plus forte dans le milieu environnant que dans le béton (gradient de concentration).

Les chlorures venant de l'extérieur restent en majorité à l'état dissous dans la solution interstitielle du béton. Mais ils peuvent aussi réagir avec certains constituants du matériau (réaction chimique ou adsorption).

Les chlorures, tout comme les carbonates, peuvent au-delà d'une certaine concentration (C critique) au niveau de l'acier être responsables de l'amorçage de la corrosion.

L'ion chlorure, peut aussi réagir avec le matériau en profondeur. Les sels de chlorure présents naturellement dans l'eau de mer, notamment les chlorures de magnésium $MgCl_2$ et les chlorures de calcium $CaCl_2$ sont agressifs vis-à-vis du béton.

Le chlorure de magnésium $MgCl_2$ réagit avec la portlandite $Ca(OH)_2$ et provoque la dissolution (ou lixiviation) du liant. Le chlorure de calcium $CaCl_2$ réagit avec l'aluminate tricalcique C_3A (provenant du clinker) et conduit à la formation d'un chloro-aluminate de chaux puis d'ettringite, voire même de thaumasite (en présence de silice dissoute et de carbonates), qui sont des gels expansifs pouvant générer des gonflements, des fissurations et des éclatements du béton. [17]

En général:

- Les chlorures agissent par rupture du film passif des aciers qui perd son caractère protecteur.
- Les chlorures sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et le film passif est lui-même variable selon l'endroit.
- Les chlorures entraînent une corrosion qui est localisée (piqures).

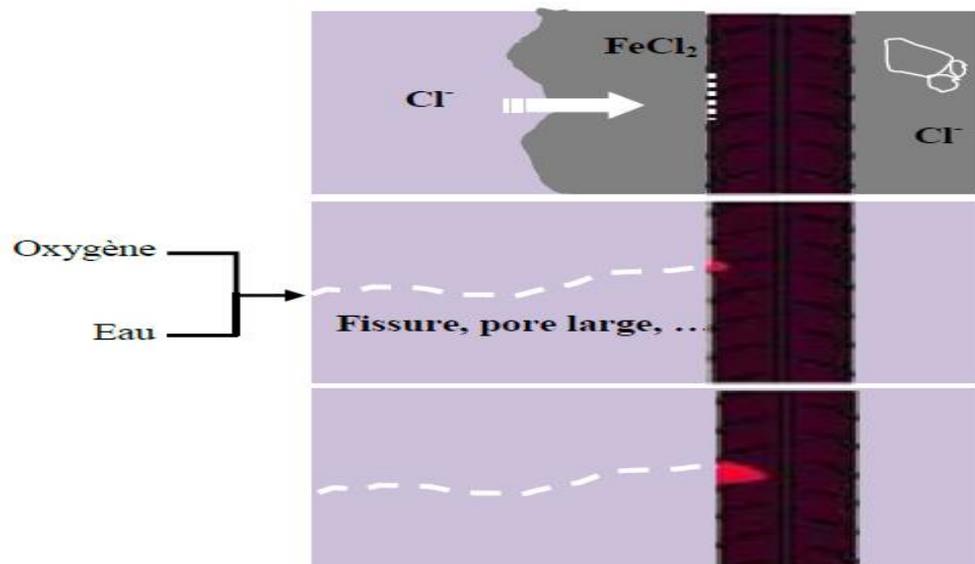


Figure.III.9 : Schéma illustratif de dégradation des armatures due aux chlorures.

III.2.3.10 La corrosion :

La corrosion des armatures du béton armé est une pathologie fréquemment rencontrée en génie civil. Les facteurs qui sont à l'origine de cette pathologie sont schématisés sur la figure suivante :

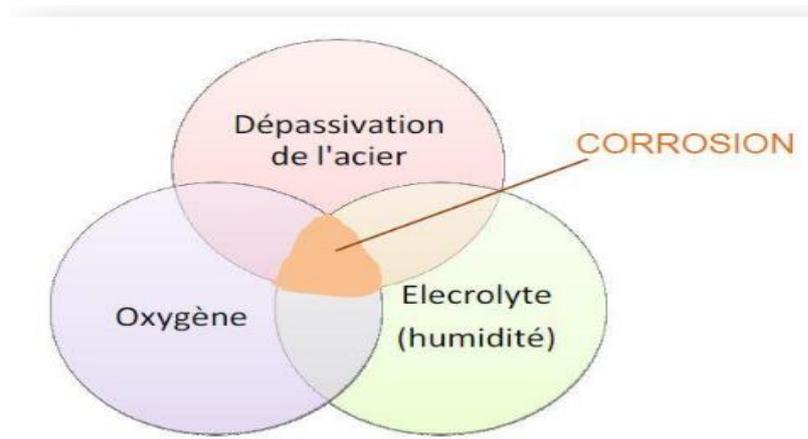


Figure III.10 : Réunion des facteurs de la corrosion.

L'acier enrobé dans le béton peut sous certaines conditions, se dépassiver et engendrer des désordres notables pour le comportement en service de la structure par la diminution de sa capacité portante.

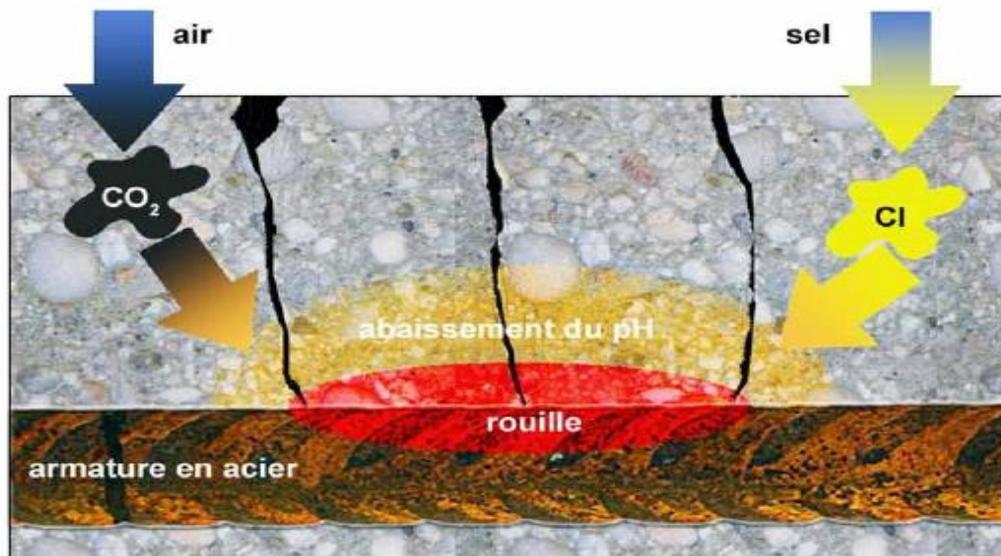


Figure.III.11 : Schéma de principe de la corrosion des armatures.

Les causes d'une telle fragilisation peuvent être par exemple la perte de ductilité de l'acier ou bien encore la perte d'adhérence acier-béton. [17]

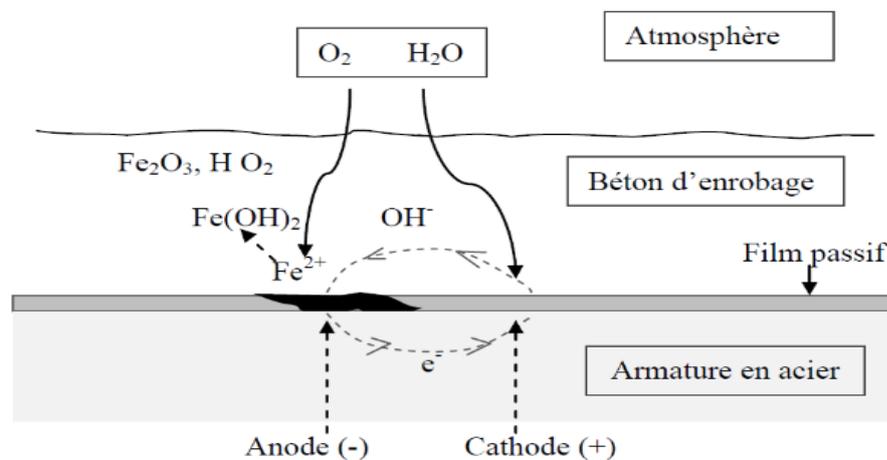


Figure III.12 : Processus électrochimique de la corrosion des armatures.

III.2.3.10.1 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 piquûres 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. [14]

III.2.3.10.2 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.

On présente ci- dessous les facteurs prépondérants :

- Humidité relative.
- Enrobage.
- Température.
- Teneur en chlorure.
- Oxygène.
- Agents agressifs autres que les chlorures.
- Réactions de corrosion des aciers dans le béton. [22]

III.2.3.10.3 Les causes de la corrosion :

- La présence d'oxygène « non évacué » favorise la formation d'oxydes qui corrodent les parois métalliques des conduites, échangeurs, robinetterie ...
- De l'oxygène peut être libéré « depuis » les gaz dissous (air) dans l'eau suite à des changements de température et de pression.
- Vitesse d'eau trop faible.
- Installations « non conformes aux règles de l'art ».
- Mélange de matériaux.
- Surdimensionnement des canalisations.
- Pas de mise à la terre des canalisations.
- Utilisation d'inhibiteurs de corrosion pas toujours appropriés.
- Pas d'inhibiteur de corrosion derrière un adoucisseur. [22]

III.2.3.10.4 Les conséquences de la corrosion :

Une corrosion anormale d'un système de chauffage cause des désordres qui vont:

- Réduire la durée de vie de votre installation.
- Amplification des risques de fuite.

- Nuire à votre confort.
- Augmenter la facture énergétique.
- Causer des détériorations anormales et prématurées.
- Créer d'importants surcoûts de charge d'entretien. [22]

III.2.3.10.5 Protection contre la corrosion :

Les moyens de lutte contre la corrosion comprennent :

- L'isolation physique par des revêtements, métallique (voir acier galvanisé) mais le plus souvent organique (peintures, ébonitage...), voire minéral (fonte revêtue de mortier de ciment)...
- Le maintien des caractéristiques chimiques de l'eau dans un état réduisant au maximum les vitesses de corrosion.
- L'ajout d'inhibiteurs de corrosion dans l'eau.
- L'application de potentiels électrochimiques soit à partir d'un matériau sacrificiel, soit à partir de sources extérieures (protection cathodique). [23]

III.2.4 Causes de dégradation dues à l'âge du béton :

Le phénomène du fluage se produit à moyen et à long terme, ce dernier concerne les ouvrages en béton armé. La déformation d'un élément en béton soumis à un chargement de longue durée est la somme de la déformation dite instantanée et de la déformation différée due au fluage.

Déformation instantanée: c'est la déformation qui se produit sous l'effet d'un chargement de courte durée (jusqu'à quelques jours).

Déformation différée: le chargement étant maintenu constant la déformation croît lentement, à vitesse décroissante jusqu'à atteindre, après plusieurs années sa valeur maximale qui est en ordre de grandeur, le double de celle de la déformation instantanée.

Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est en fonction notamment des caractéristiques du béton, de son âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps.

Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais encore mal compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice ainsi qu'à un processus de réaménagement de la structure des cristaux hydratés du liant.

C'est Eugène Freyssinet qui, le premier, dès 1912, à mis en évidence ce phénomène et en a mesuré les conséquences sur le comportement des structures en béton armé et en béton précontraint (réduction de la résistance sous charges soutenues, pertes de précontrainte, redistribution de moments). [17]

III.2.5 D'autres causes de dégradation :

Certaines causes essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre peuvent également participer à la dégradation des bétons.

- Mauvais positionnement des armatures: les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.
- Mauvaise qualité des bétons employés un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux: nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.
- Vibration trop importante: une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants.
- Absence de cure du béton: la cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface. [17]

III.3 Les procédés de réparation :

III.3.1 Méthodologies de réparation :

Les travaux de réparation doivent être précédés par une préparation comprenant :

- La purge des bétons dégradés.
- Le traitement des armatures corrodées, leur remplacement éventuel ou l'ajout d'armatures supplémentaires.
- Le nettoyage des surfaces.

Trois modes de réparation peuvent être envisagés :

- La restauration du béton par ragréage (petites surfaces).

- La restauration du béton par bétonnage / béton projeté.
- Le renforcement structural par ajout de béton et/ou d'armatures.

III.3.2 Le traitement des fissures :

On envisagera quatre modes de réparation en fonction de l'évolution des fissures :

- Le ragréage classique.
- L'injection de la fissure au moyen d'un produit souple.
- Le pontage de la fissure.
- La transformation de la fissure en joint de dilatation.

III.3.3 Modes de protection des armatures :

Quatre possibilités peuvent être envisagées :

- La purge des bétons dégradés et leur remplacement avec éventuellement un traitement de protection des armatures (passivation) n'est praticable que si on peut éliminer en totalité les polluants du béton.
- La mise en œuvre d'une protection cathodique.
- La déchlorurassions des bétons, suivis de leur réalcalinisation. On extrait les chlorures par électrolyse avant d'apporter des ions OH^- .
- La mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton qui vont diffuser en profondeur et passiver les armatures. [24]

III.3.4 Bonnes pratiques et conseils de prévention :

Comment réduire les risques ?

➤ **Bien choisir la formulation :**

En dehors des performances mécaniques à atteindre le béton d'un ouvrage doit résister aux attaques de l'environnement.

Des classes d'environnement sont définies dans la norme NF EN 206/CN. La classe d'environnement doit être définie par le maître d'ouvrage ou par son maître d'œuvre.

Les conséquences sur la formulation qui découlent de cet environnement sont aussi prescrites par la NF EN 206/CN. Elles portent par exemple sur le type de ciment, la quantité minimale de ciment ou la quantité d'eau relativement à la quantité de liant.

D'autres recommandations portent sur la prévention de l'alcali réaction (RAG) ou sur la réaction sulfatique interne (RSI).

Si les conditions de la norme ne peuvent pas être réunies (par exemple dans un contexte hors métropole pour le type de ciment), des essais en laboratoire peuvent qualifier une formulation vis-à-vis d'une attaque spécifique.

➤ **Soigner la mise en œuvre :**

Tous les efforts faits dans la mise au point d'une formulation pour répondre à de nombreux critères de performances peuvent être ruinés par une mise en œuvre défectueuse :

- ✓ Ajouts d'eau en toupie juste avant coulage.
- ✓ Moyens de mise en œuvre inadaptés.
- ✓ Mauvaise vibration.
- ✓ Des coffrages non étanches à la laitance.
- ✓ Ferrailage mal calé.
- ✓ Mauvaise disposition des aciers.
- ✓ Mauvaise protection du béton (contre l'excès de chaleur ou de froid).

Il est, en outre, indispensable de respecter :

- ✓ les ferrailages en général.
- ✓ les sections de barres requises.
- ✓ les enrobages des barres vis-à-vis de la peau du béton.

Le respect de ces conditions contribue grandement à la durabilité.

Ce qu'il faut retenir :

- ✓ Bien choisir la formulation.
- ✓ Soigner la mise en œuvre.
- ✓ Lire la documentation existante.
- ✓ Ne pas oublier la cure. [25]

Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de dégradations du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures.

On a montré que la structure en béton n'est pas seulement menacée par les charges qui lui sont appliquées, mais aussi par l'environnement dans lequel elle est construite. Pour que cet environnement ne nuise pas à la structure on doit prendre soin du béton et l'entretenir.

Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces dégradations et les procédés de réparations.

Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptée, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles dégradations semblables.

Chapitre IV : Les stations d'épurations

IV Les stations d'épurations :

IV.1 Introduction :

L'eau est essentielle à la vie et au bien-être. C'est pourquoi elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée. Ainsi après l'avoir employé presque exclusivement pour ses besoins ménagers, l'homme en développant son savoir a étendu les champs d'utilisation de l'eau à travers l'industrie et l'agriculture jusqu'à la hisser en tête des ressources stratégiques des nations.

Dans le monde La qualité des eaux a connu ces dernières années une grandes détérioration à cause des rejets industriels non contrôlés, des rejets urbaine, trafic routier, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces dernières produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

Pour parer à cette situation, l'homme a conçu des stations pour l'épuration des eaux usées et a développé une technologie conséquente dans le domaine de la protection des mi lieux récepteurs. Ces stations sont actuellement très répandues à travers le monde, et leur réalisation est devenue systématique et obligatoire pour les grands centres urbains et les industries grandes consommatrices d'eau. Ces pendant, la conception et les réalisations d'une station d'épuration coûtent cher, et cela est encore plus vrai pour les pays du tiers monde.

Les eaux usées sont épurées directement dans la station d'épuration avec une série de traitement primaires permettant d'éliminer les déchets, les sables, les graisses et les matières en suspension, puis un traitement biologique pour écarter le reste de la pollution.

Le traitement des eaux usées a pour objectif de les dépolluer pour qu'elles n'altèrent pas la qualité du milieu naturel dans lequel elles seront ensuite rejetées. Il constitue une phase fondamentale dans le cycle vertueux de l'eau. Il répond à deux préoccupations essentielles :

- préserver le patrimoine naturel et la qualité de vie en jouant un rôle de protection sanitaire des populations et en contribuant au maintien de la qualité de l'environnement et des activités liées à l'eau.
- préserver les ressources en eau.

Le traitement des eaux usées est donc un enjeu de santé publique et de protection de l'environnement encadré par une réglementation européenne de plus en plus exigeante.

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. [26]

IV.2 Généralité sur les eaux usées :

Les eaux usées il semble important d'avoir une idée sur sa définition, son origine et ses caractéristiques, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour son épuration. Les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels.

Une eau est considérée comme « eau usée » lorsque son état, sa composition sont modifiés par les actions anthropiques dans une mesure telle qu'elle se prête moins facilement à toutes ou certaines des utilisations auxquelles elle peut servir à l'état naturel. Aujourd'hui on parle de plus en plus des notions d'eaux claires.

Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés : c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles). [27]

IV.2.1 Origine des eaux usées :

Les eaux usées quelle que soit leur origine, sont généralement chargées en éléments indésirables qui selon leurs composition, représentent un danger réel pour les milieux récepteurs ou leurs utilisateurs.

L'élimination de ces éléments toxiques exige de concevoir une chaîne de traitement. Toutefois, avant de concevoir tout procédé d'épuration, il est impératif de caractériser l'effluent à traiter quantitativement et qualitativement. [27]

IV.2.2 Différents types des eaux usées :

Nous distinguons les catégories d'eaux usées classées en suivant :

IV.2.2.1 Origine pluviales :

Ce sont des eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation. Elles peuvent être particulièrement polluées surtout en début de pluie par deux mécanismes le lessivage des sols et des surfaces imperméabilisées.

Les déchets solides ou liquides déposés par temps sur ces surfaces sont entraînés dans le réseau d'assainissement par les premières précipitations qui se produisent.

Par temps sec, l'écoulement des eaux usées dans les collecteurs des réseaux est lent ce qui favorise le dépôt de matières décan tables. Lors d'une précipitation, le flux d'eau plus important permet la remise en suspension de ces dépôts.

IV.2.2.2 Origine industrielle :

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés.

On peut néanmoins, faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent :

- Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés...).
- Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...).
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...).
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, porcherie, produits pharmaceutiques...).
- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires...).

IV.2.2.3 Origine agricole :

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux.

IV.2.2.4 Origine domestique :

Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles se composent essentiellement par des eaux de vanne d'évacuation de toilette. Et des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bains.

Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses.
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents.
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées.
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (W.C), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme.

IV.2.3 la pollution des eaux usées :

La pollution ou la contamination de l'eau peut être définie comme la dégradation de celle-ci en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques; par des déversements, rejets, dépôts directs ou indirects de corps étrangers ou de matières indésirables telles que les microorganismes, les produits toxiques, les déchets industriels. Selon leurs natures, on distingue divers types de pollution.

IV.2.3.1 Pollution minérale :

Elle est constituée essentiellement des métaux lourds en provenance des industries métallurgiques et de traitement de minerais, ex (plomb, du cuivre, du fer, du zinc et du mercure...etc.).

IV.2.3.2 pollution microbiologiques :

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes.

IV.2.3.3 Pollution chimique :

Ile résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. La pollution chimique des eaux est regroupée en deux catégories :

- Organiques (hydrocarbures, pesticides, détergents, phénols...).
- Minérales (métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...).

IV.2.3.4 pollution physique :

Résultat de la présence dans l'eau de particules ou de déchets capables de colmater le lit d'un cours d'eau (cas des eaux provenant par exemple des mines, d'usines de défibrage de bois, de tanneries).

IV.2.3.5 Pollution par le phosphore :

Le phosphore a pour origine les industries du traitement de surfaces des métaux, les laveries industrielles des fabrications, d'engrais agroalimentaire. Comme l'azote, le phosphore est un élément nutritif, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques.

IV.2.3.6 Pollution par l'azote :

Les activités industrielles, peuvent être à l'origine des rejets plus ou moins riche en azote (élément nutritif) issu des fabrications d'engrais, des cokeries, et des industries chimiques et agroalimentaires . L'azote existe sous deux formes: la forme réduite qui regroupe l'azote ammoniacal (NH_3 ou NH_4^+) et l'azote organique (protéine, créatine, acide urique). Plus une forme oxydée en ions nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-).

IV.2.3.7 Les pollutions diverses:

Thermiques (rejets d'eaux chaudes des centrales nucléaires), celles provoquées par matériaux radioactifs, 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.

IV.2.4 les Paramètres de pollution :**IV.2.4.1 Paramètres organoleptiques :****IV.2.4.1.1 Couleur :**

La couleur des eaux résiduaires industrielles est en général grise, signe de présence de matières organiques dissoutes, de MES, du fer ferrique précipité à l'état d'hydroxyde, du fer ferreux lié à des complexes organiques et de divers colloïdes.

IV.2.4.1.2 Odeur :

Les eaux résiduaires industrielles se caractérisent par une odeur. Toute odeur est pollution qui est due à la présence de matières organiques en décomposition.

IV.2.4.2 Les paramètres physiques :**IV.2.4.2.1 Température :**

Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier O_2) dans l'eau ainsi que, la détermination du PH et la vitesse des réactions chimiques .La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des micro organismes vivants dans l'eau.

IV.2.4.2.2 La turbidité :

La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau, elle est de loin le paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. Elle varie suivant les matières en suspension (MES) présentes dans l'eau.

IV.2.4.2.3 Les matières en suspension(MES) :

Exprimée en mg par litre. Ces ont les matières non dissoute de diamètre supérieur à 1µm contenues dans l'eau. Dans le milieu récepteur, les MES peuvent entraîner des perturbations de l'écosystème par une diminution de la clarté de l'eau, Les matières volatiles en sus photosynthèse végétale. De plus, ces MES peuvent être de nature organique et entraîner les nuisances associées aux molécules organiques.

IV.2.4.2.4 Les matières volatiles en suspension (MVS) :

Elles sont recueillies soit par filtration, soit par centrifugation, séchées à 105°C, puis pesées, ce qui fournit la teneur en MES (mg/l). Elles sont ensuite chauffées à 500-600°C, les matières volatiles disparaissent, et la perte de poids est attribuée aux MVS (g ou mg/l).

IV.2.4.2.5 Les matières minérales sèches(MMS) :

Elles représentent la différence entre les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS) et correspondent à la présence de sel, et de silice.

IV.2.4.2.6 Les matières décan tables et non décan tables :

On distingue les fractions qui décantent en un temps donné (2 heures) suivant les conditions opératoires, et les matières non décan tables qui restent dans l'eau et qui vont donc être dirigées vers les procédés biologiques.

IV.2.4.3 Paramètres chimiques :**IV.2.4.3.1 Potentiel d'hydrogène :**

Sa valeur détermine un grand nombre d'équilibre physicochimique. La valeur de PH basse ou élevée altère la croissance des microorganismes existant dans l'eau (leur gamme de croissance est comprise entre 5 et 9).

IV.2.4.3.2 Demande chimique en oxygène (DCO) :

Demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau et oxydable dans des conditions opératoires bien définies.

Elle est d'autant plus élevée qu'il y'a des corps oxydables dans le milieu.

L'oxygène affecte pratiquement la totalité des matières organiques biodégradables et non biodégradables. La DCO est mesuré en mg d'O₂/l.

- DCO =1.5 à 2 fois DBO pour les eaux usées urbaines.
- DCO =1 à 10 fois DBO pour l'ensemble des eaux résiduaire.
- DCO >2.5 fois DBO pour les eaux usées industrielles.

La relation empirique de la matière oxydable en fonction de la DBO5 et la DCO est donnée par l'équation suivante: $MO = (2 DBO5 + DCO) / 3$.

IV.2.4.3.3 La demande biochimique en oxygène (DBO5) :

Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation (Avec l'intervention des bactéries) les matières organiques contenues dans une eau usée. Elle indique la quantité de matière organique présente dans une eau usée, qui est un des plus importants critères qui permet l'évaluation de la qualité et le degré de pollution de ces eaux usées.

Matière organique + bactéries → Boues + gaz + eau

Généralement, la pollution est dégradée d'une manière significative pendant une durée de 5 jours. Au-delà de 5 jours la consommation en oxygène diminue énormément ainsi on a adopté la notion DBO5 obtenue après 5 jours d'incubation à 20°C et dans l'obscurité.

IV.2.4.4 Les paramètres bactériologiques :

Les micro-organismes qui se trouvent dans l'eau usée sont à l'origine du traitement biologique. Ils comprennent, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Parmi les éléments pathogènes les plus rencontrés, on cite:

IV.2.4.4.1 Virus :

Les virus se trouvent dans les eaux résiduaires à des concentrations de l'ordre de milliers d'unités infectieuses par millilitre d'eau.

IV.2.4.4.2 Raccordement des industries :

Le raccordement des industries aux égouts urbains permet d'obtenir le mélange nécessaire d'eau usée urbaine et industrielle ce qui présente des avantages, aussi bien pour l'usine que pour la municipalité. Néanmoins la capacité de réception du réseau d'assainissement, la qualité des eaux résiduaires, imposent certaines limites au raccordement à l'égout.

IV.2.4.4.3 Taille de l'agglomération :

Le volume des eaux usées rejeté par habitant et par jour augmente généralement avec la taille de l'agglomération par suite de certaines différences d'habitude de vie, de niveau de développement et suivant le mode de tarification de la consommation d'eau potable. [26]

IV.3 Les stations d'épuration :**IV.3.1 Définition de l'épuration :**

En assainissement, l'épuration constitue le processus visant à rendre aux eaux résiduaires rejetées la qualité répondant aux exigences du milieu récepteur il s'agit donc d'éviter une pollution l'environnement et non de produire de l'eau potable. [26]

IV.3.2 Définition des stations d'épuration :

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

Une station d'épuration est destinée à recevoir des eaux usées, ce terme englobe 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. [28]

Une station d'épuration des eaux usées est alimentée par un réseau d'assainissement collectif (réseau unitaire, qui évacue les eaux usées et les eaux pluviales dans la même canalisation, ou réseau séparatif, qui collecte les deux types d'eau dans des canalisations séparées).

Ce réseau est constitué de canalisations, en général en béton, qui collectent les eaux usées et pluviales et les acheminent par gravité jusqu'à la station où elles sont traitées. [14]

Une station d'épuration d'effluents urbains est généralement constituée de deux filières distinctes de traitement. La filière "eau" s'occupe de l'épuration proprement dite de l'effluent, la filière "boues" est plus particulièrement chargée de la collecte et de la déshydratation des boues générées par les traitements précédents.

La filière "eau" se compose généralement d'un prétraitement éliminant les grosses matières en suspension charriées avec l'effluent. Celui-ci traverse ensuite un décanteur primaire dans lequel sédimente la majeure partie de la pollution particulaire.

Vient ensuite un traitement biologique principalement aérobie dans lequel une biomasse acclimatée élimine la pollution dissoute. Un ouvrage de clarification final permet de recycler la biomasse épuratrice et de délivrer au milieu naturel un effluent conforme aux normes européennes qui imposent des limites pour les eaux de rejets des stations d'épuration et les boues en excès. L'issue des différents traitements, ces dernières sont épaissies et déshydratées par divers procédés avant d'être évacuées de l'installation.

L'installation comporte des équipements annexes (ventilation, désodorisation, armoires électriques, automates, etc.) indirectement liés au traitement de la pollution mais également sensibles à la corrosion. [18]

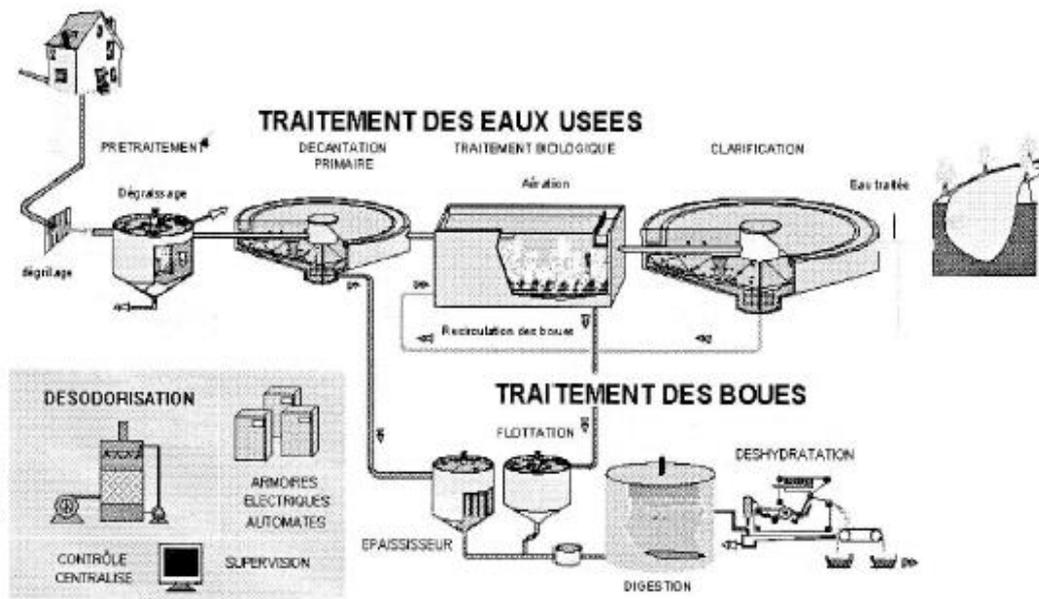


Figure .IV.1 : Synoptique classique d'une station d'épuration.

IV.3.3 Rôle des stations d'épuration :

Ce rôle peut être résumé dans les points suivants :

- Traiter les eaux.
- Protéger l'environnement.
- Protéger la santé publique.
- Valoriser éventuellement les eaux épurées et les boues issues du traitement. [26]

IV.3.4 Implantation de la station :

La station d'épuration reste un outil fondamental pour la protection des milieux naturels. La valorisation de l'image de la station passe par un ensemble de dispositions qui sont à prendre en considération dès l'élaboration du projet en commençant par le choix de l'emplacement du site.

A cet égard, quelques règles doivent être rappelées :

- Éviter les zones inondables entraînant parfois des dysfonctionnements de longues périodes sinon veiller à mettre les équipements électriques hors d'eau.
- Éviter de construire à proximité d'habitations, de zones d'activités diverses (sportives, touristiques, industrielles, ...). Dans la pratique, et pour éviter tout contentieux avec

le voisinage, on réserve une distance minimale de 200 m en tenant compte de la dominance des vents (si possible).

- s'éloigner le plus possible des zones de captage même si le périmètre de protection est respecté.

- réaliser des études géotechniques (vérification de l'imperméabilité par exemple pour un lagunage). La portance du sol (tenue des ouvrages et des canalisations de liaison) et les qualités de sol conditionnent beaucoup le coût du génie civil.

- prendre des précautions particulières lorsqu'un aquifère se situe à faible profondeur (clapets en fond de bassins, ...).

- ne pas implanter les ouvrages dans les zones plantées d'arbres à feuilles caduques (lit bactérien, lagunage, bassin d'aération...).

- penser aux extensions ou aux aménagements futurs (disponibilité et réservations de terrains). [29]

IV.4 Procédés d'épuration des eaux usées :

Les différents procédés épuratoires sont décrits dans l'ordre classiquement adopté en épuration

- **Prétraitements** : dégrillage, dessablage, déshuilage.
- **Traitement primaires** : procédés décantation physique, procédés décantation chimique
- **Traitement secondaires (biologique)** : épuration biologique des matières organiques.
- **Traitement tertiaires** : azote, phosphore, désinfection, traitement des boues.

IV.4.1 Prétraitements :

Le prétraitement est un ensemble d'opérations physiques et mécaniques destinées à extraire de l'eau brute. Les dispositifs de prétraitement physique sont présents dans toutes les stations d'épuration, quels que soient les procédés mis en œuvre à l'aval.

Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou les particulaires les plus grossiers. Il comporte 4 parties principales :

IV.4.1.1 dégrillage :

Le dégrillage consiste à séparer les matières les plus volumineuses charriées par l'eau brute, on faisant passer l'effluent d'entrée à travers des barreaux dont l'écartement est bien calculé. L'efficacité du dégrillage est en fonction de l'écartement entre les barreaux de la grille on distingue :

- Dégrillage fin pour écartement 3 à 10 mm.
- Dégrillage moyen pour écartement 10 à 25 mm.
- Dégrillage pour écartement 30 à 100mm. [26]

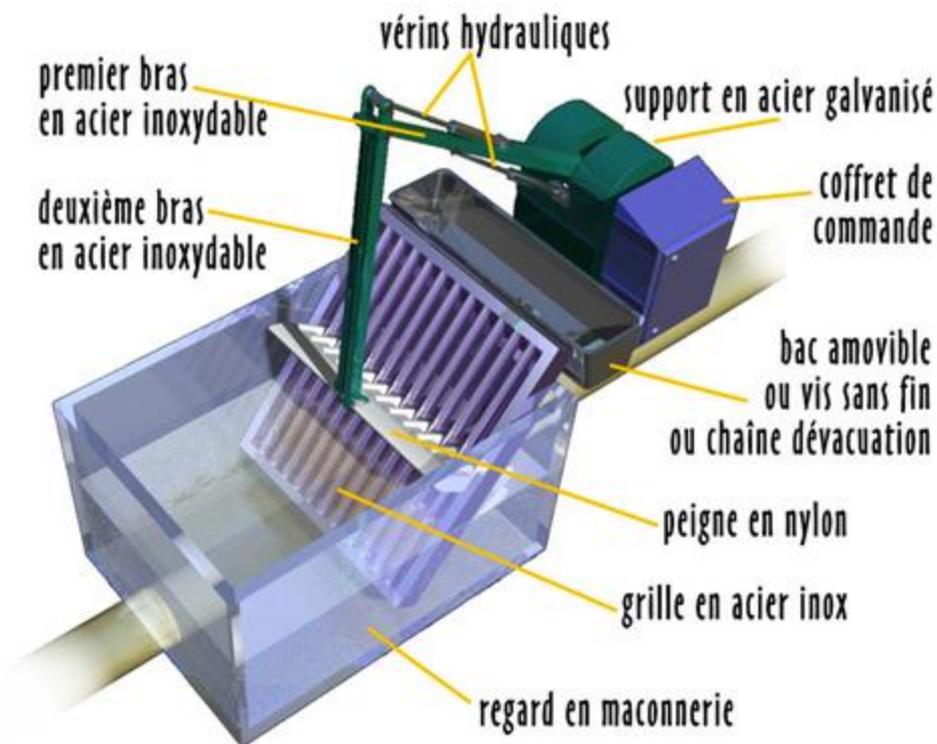


Figure .IV.2 : Schéma d'un dé grilleur.

IV.4.1.2 Tamisage :

Le tamisage est un dégrillage poussé utilisé dans les stations d'épuration industrielles. Il consiste en une filtration sur toile mettant en œuvre des mailles de différentes dimensions. Il existe un macro-tamisage (mailles $> 0.3\text{mm}$) et un tamisage (mailles $< 100\mu\text{m}$). [26]

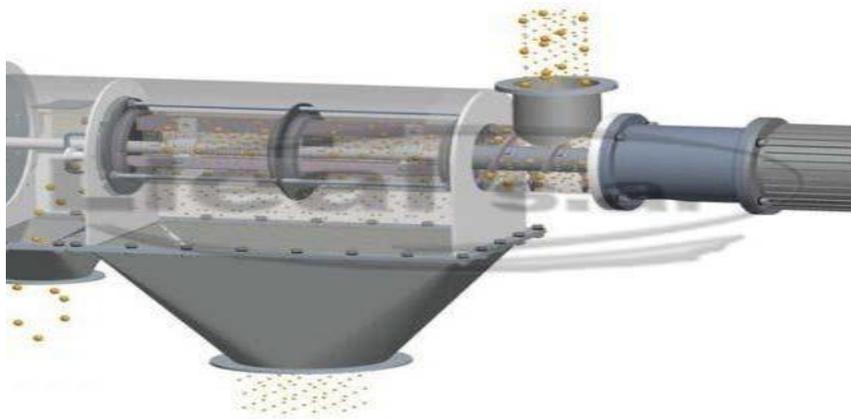


Figure .IV.3 : Schéma d'un tamisage.

IV.4.1.3 Le dessablage :

Le dessablage consiste à retirer de l'effluent les sables et les particules minérales plus ou moins fines, afin de protéger les conduites et pompes contre la corrosion et éviter même le colmatage des canalisations par les dépôts au cours du traitement et permet de réduire la production des boues et d'éviter de perturber les autres étapes de traitement, en particulier, le réacteur biologique.

La technique classique du dessabler consiste à faire circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation avec une vitesse d'environ de 0.3m/s qui permet le dépôt d'une grande partie des sables. [26]



Figure .IV.4 : Schéma d'un dessabler.

IV.4.1.4 Déshuilage-Dégraissage :

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre de figer les graisses).

C'est un procédé destiné à éliminer les graisses et les huiles dans les eaux résiduaires.

Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, qui peuvent gêner l'efficacité du traitement biologique. La rétention environ 80% de la matière grasse lorsque la température est inférieure à 30°C. [14]

Les huiles et les graisses présentent plusieurs inconvénients pour le traitement tel que :

- Envahissement des décanteurs récoltés en surface est dite clarifié. Elle est dirigée vers un autre stade d'épuration.
- Mauvaise diffusion de l'oxygène dans les décanteurs.
- Mauvaise sédimentation dans les décanteurs.
- Risque de bouchage des canalisations et des pompes.
- Diminution du rendement du traitement qui arrive après. [26]



Figure .IV.5 : Schéma d'un déshuileur-dégraisseur.

IV.4.2 Le traitement primaire :

Le traitement primaire constitue une pré-épuración non négligeable pour garantir la qualité du rejet en milieu naturel. Il fait appel à différents procédés physiques et chimiques. Les matières décan tables se déposent au fond ou flottent à la surface par différence de densité ou après l'adjonction de produit agglomérant les matières, accélérant leur flottation ou leur sédimentation (Satin et Selmi, 2006).

Le traitement primaire élimine plus de la moitié des matières en suspension jusqu'à 60% et de la matière organique de l'ordre de tiers de la DBO5 entrante

IV.4.2.1 La décantation physique :

Le traitement primaire consiste en une simple décantation. Elle permet d'alléger les traitements biologiques et physico-chimiques ultérieurs, en éliminant une partie des solides en suspension.

L'efficacité du traitement dépend du temps de séjour et de la vitesse ascensionnelle (qui s'oppose à la décantation).

La décantation primaire permet d'éliminer, pour une vitesse ascensionnelle de 1.2m/h, 40 à 60% de MES, soit 40% de MO, 10 à 30 % de virus, 50 à 90% des helminthes et moins de 50% des kystes de protozoaires et entraîne également avec elle une partie des micropolluante.

IV.4.2.2 La décantation physico-chimique :

Si les particules sont très fines (colloïdales), ils peuvent rester en suspension dans l'eau très long temps, ces dernières n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour les éliminer, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation qui ont pour but de déstabiliser les particules en suspension et faciliter leur agglomération.

Par l'injection des réactifs tels que: (le sulfate d'alumine, le sulfate ferrique) pour coagulation et pour la Floculation on trouve: les flocculant minéraux, les flocculant organiques.[26]

IV.4.3 Traitement secondaires :

Le traitement secondaire des eaux usées est le procédé qui permet la dégradation des polluants grâce à l'action de micro-organismes. Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées.

Une multitude d'organismes est associée à cette dégradation selon différents cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve généralement des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires.

Les microorganismes responsables de l'épuration s'agglomèrent sous forme de floes et se développent en utilisant la pollution comme substrat nécessaire à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes.

IV.4.3.1 Procédés biologiques extensifs :

Le traitement biologique consiste à l'utilisation de la flore bactérienne dans les eaux usées pour dégrader les matières organiques polluantes. Il constitue le second grand stade de l'épuration des eaux de raffinage. Ce stade est destiné initialement à éliminer la DBO5 et la DCO qui subsiste après l'épuration physico-chimique.

Ils reposent sur les phénomènes de l'autoépuration naturelle et ils demandent une faible énergie mais nécessitent, en revanche, de grandes superficies et de longs séjours des eaux usées. Du point de vue économique, ils sont moins coûteux. Ce sont le lagunage, l'épandage, etc.

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

IV.4.3.1.1 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 : PH, 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 phase 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. [14]



Figure .IV.6 : Bassin de traitement biologique.

IV.4.3.1.2 Le lagunage naturelle :

Les eaux usées admises sur un lagunage naturel sont dégradées par un écosystème constitué essentiellement d'algues microscopiques, de bactéries aérobie et anaérobie et une microfaune adaptée. L'oxygène dissout nécessaire à la respiration bactérienne est produit uniquement grâce aux mécanismes photosynthétiques en présence de rayonnement solaire.[26]

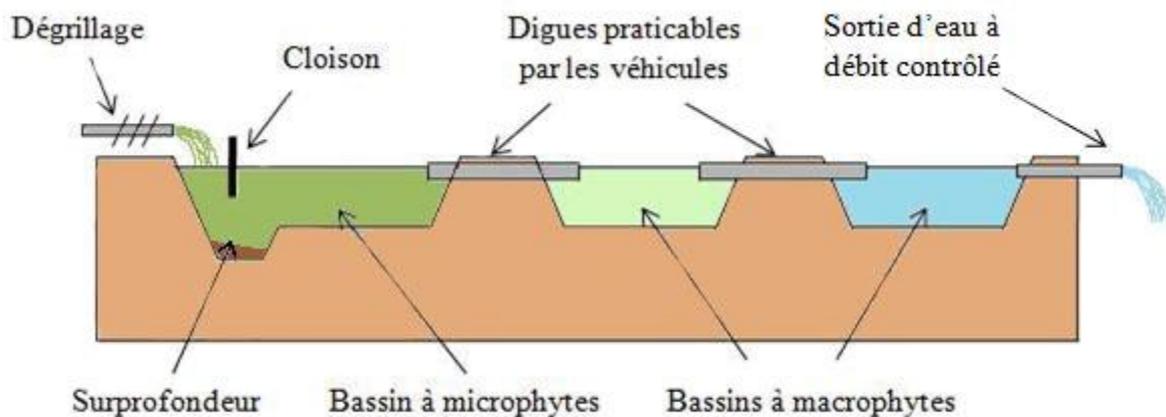


Figure .IV.7 : Lagunage naturel.

IV.4.3.1.3 Lagunage aérée :

Le lagunage aéré consiste à intensifier l'activité aérobie par un apport artificiel d'oxygène par des aérateurs mécaniques flottants ou fixes ou une insufflation d'air avec un long temps de séjour des effluents dans des bassins pour parvenir à une épuration poussée.[27]



Figure .IV.8 : Le principe d'un lagunage aéré.

IV.4.3.2 Procédés biologiques intensifs :

Les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel.

IV.4.3.2.1 Disques biologiques (cultures fixées) :

Les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel.

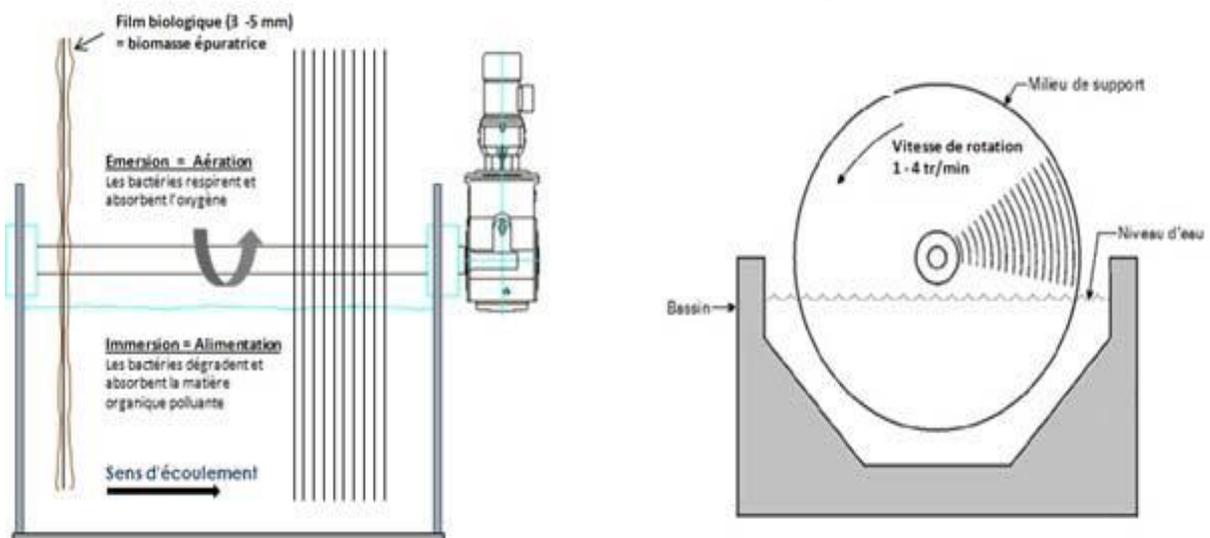


Figure .IV.9 : Schéma de principe d'une filière type de disques biologiques.

IV.4.3.2.2 Lits bactériens (cultures fixées) :

Les disques biologiques ou bio disques sont des disques enfilés parallèlement sur un axe horizontal tournant. Ces disques plongent dans une auge, où circule l'eau à épurer ayant subi une décantation. Pendant une partie de leur rotation ils se chargent de substrat puis ils émergent dans l'air le reste du temps (pour absorber de l'oxygène).

Les disques sont recouverts par un bio film sur les deux faces. Ils ont un diamètre de 1 à 3 m, sont espacés de 20 mm et tournent à une vitesse de 1 à 2 tr mn-1.

Les boues en excès se détachent du disque et sont récupérées dans un clarificateur secondaire avant rejet dans le milieu naturel.

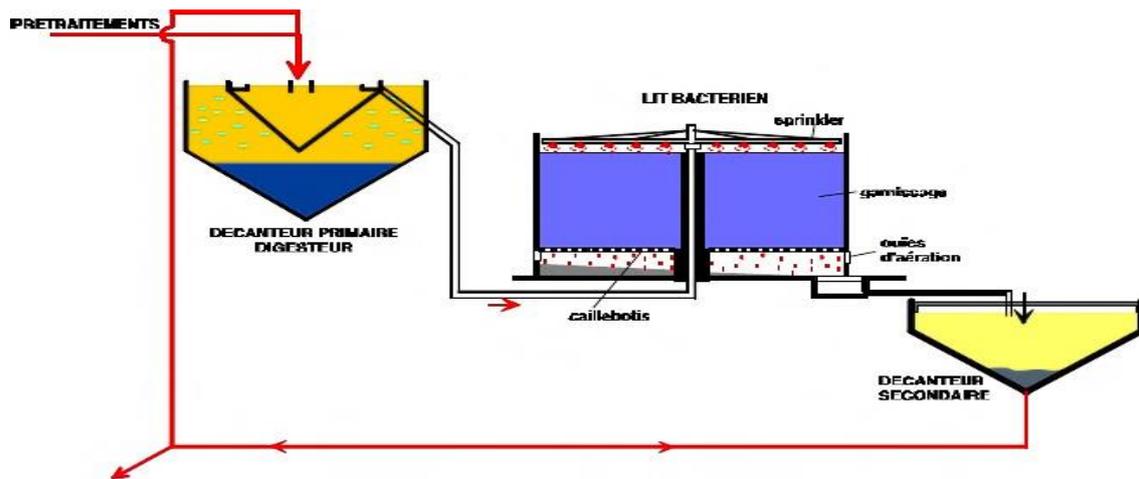


Figure .IV.10 : Schéma de principe d'une filière type de boues.

IV.4.3.2.3 Traitement biologique par boues activées :

Le procédé à boues activées consiste à provoquer le développement d'un floc bactérien dans un bassin alimenté en eaux usées à traiter (bassin d'aération) (Kollar, 2004), l'apport d'air dans le bassin d'aération pour la satisfaction de la DBO5 et pour la respiration de la masse cellulaire. Il est destiné à contribuer au brassage et au maintien en suspension des boues activées. Il permet d'obtenir des performances poussées pour éliminer le carbone, l'azote et le phosphore. Le bassin d'aération peut être précédé d'un décanteur primaire dans le but d'éliminer les matières en suspension décan tables et sera suivie d'un clarificateur qui assurera la séparation de l'effluent épurée avec les boues, celle-ci seront en partie recyclée dans le bassin d'aération pour assurer le réensemencement et la concentration permanente, et l'autre partie extraites vers le traitement des boues.

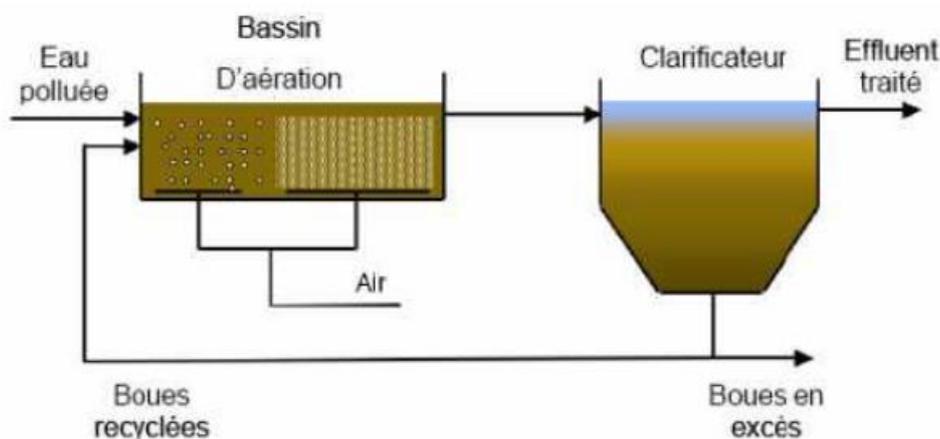


Figure .IV.11 : Processus des boues activées.

IV.4.4 Décantation secondaire :

Le clarificateur est un bassin circulaire, équipé d'un point racleur. La liqueur mixte, venant des bassins biologiques via la deuxième chambre de répartition est séparée en eau épurée et boues biologiques par décantation. Les boues décantées sont siphonnées par une pompe à vide, une partie sera acheminée vers la première chambre du répartiteur assurant la recirculation des boues contenant la culture bactérienne épuratrice.

Afin de maintenir la concentration en biomasse nécessaire dans ce bassin, l'autre partie sera transmise au flotteur. [27]



Figure .IV.12 : Décanteur secondaire «clarificateur».

IV.4.5 Traitement tertiaire :

Certains rejets d'eaux traitées sont soumis à des réglementations spécifiques concernant l'élimination d'azote, de phosphore ou des germes pathogènes, qui nécessitent la mise en œuvre de traitements tertiaires.

Il regroupe toutes les opérations physiques et chimiques qui complètent les traitements primaires et secondaires.

IV.4.5.1 L'élimination de l'azote :

Les stations d'épuration n'éliminent qu'environ 20 % de l'azote présent dans les eaux usées, par les traitements de nitrification – dénitrification. Pour satisfaire aux normes de rejet en zones sensibles, des procédés physiques et physico-chimiques complémentaires permettent l'élimination de l'azote par : électrodialyse, résines échangeuses d'ions, "stripage" de l'ammoniaque, mais ces traitements ne sont pas utilisés dans le traitement des eaux résiduaires

urbaines, pour des raisons de rendement et de coût. L'élimination de l'azote se fait généralement selon un processus biologique en deux étapes importantes.

IV.4.5.2 La nitrification :

La nitrification est un processus se déroulant sous l'action de certains microorganismes spécifiques et qui conduit à la transformation de l'ammoniac (ou de l'ammonium) en nitrate en 2 étapes :

- Nitrosation : sous l'action de bactéries nitreuses aérobies (Nitrosomonas).
- Nitrification : par les bactéries nitrifiantes aérobies (Nitrobacter).

La nitrification est une des étapes du traitement d'une eau usée qui vise la transformation de l'ammonium (NH_4) en nitrate (NO_3). Cette transformation est réalisée par des bactéries, en milieu aérobie.

IV.4.5.3 La dénitrification :

Est un processus anaérobie par lequel les nitrates sont réduits en azote et en oxydes d'azote. Les micro-organismes utilisent les nitrates comme source d'oxydante à la place de l'oxygène et en présence d'une source d'un carbone organique qui doit être apportée dans le milieu.

IV.4.5.4 L'élimination du phosphore :

L'élimination du phosphore, ou "dé phosphatation", peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques. En ce qui concerne les traitements physico-chimiques, l'adjonction de réactifs, comme des sels de fer ou d'aluminium, permet d'obtenir une précipitation de phosphates insolubles et leur élimination par décantation. Ces techniques, les plus utilisées actuellement, éliminent entre 80 % et 90 % du phosphore, mais engendrent une importante production de boues.

IV.4.5.5 Elimination et traitement des odeurs :

Les eaux usées, chargées en matières organiques particulaires et dissoutes, peuvent induire directement ou indirectement, par l'intermédiaire de leurs sous-produits d'épuration (graisses, boues), la formation d'odeurs désagréables suivant un processus de fermentation.

Les odeurs provenant des STEP sont dues aux gaz, aérosols ou vapeurs émises par certains produits contenus dans les eaux usées ou dans les composés se formant au cours des différentes phases de traitement.

Les sources les plus importantes d'odeurs sont :

- Les prétraitements.
- Les boues et leur traitement.

Pour éviter ces nuisances, les ouvrages sensibles seront couverts et munis d'un système de ventilation ainsi que d'une unité de traitement biologique des odeurs.

On distingue généralement deux types de traitement biologique des odeurs :

- Les bio-filtres.
- Les bio-laveurs.

Dans les premiers, la biomasse est supportée par un plancher spécifique et l'air traverse le massif (souvent de la tourbe). Les seconds réalisent un deuxième filtre grâce à une suspension. La biomasse est libre, et l'épuration se produit dans un réacteur.

IV.4.5.6 La désinfection :

Un abaissement de la teneur des germes, parfois exigé pour les rejets dans des Zones spécifiques (zones de baignade, zones de conchylicoles) ou dans le cadre d'une réutilisation, il sera réalisé par des traitements de désinfection chimique par:

IV.4.5.7 Le chlore :

C'est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec le micro-organisme. Les composés utilisés dans le traitement des eaux usées sont: le chlore gazeux (Cl_2), l'hypochlorite de sodium (NaClO) appelé communément "eau de Javel", l'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), le chlore de chaux ($\text{CaCl}_2\text{OCl}_2$) et le chlorite de sodium (NaClO_2).

IV.4.5.8 L'ozone (O_3) :

C'est un oxydant puissant, la désinfection par l' O_3 est utilisée aux États-Unis, en Afrique du Sud et au Moyen Orient essentiellement. Il permet l'élimination des bactéries,

des virus et des protozoaires. C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus.

Les tests de toxicité effectués sur des poissons, des crustacés et des algues n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque toxicité

Il existe aussi des traitements physiques tel que:

IV.4.5.9 Les rayons ultraviolets :

Qui consistent à utiliser des lampes à mercure disposées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau. Leur rayonnement s'attaque directement aux microorganismes.

Ce traitement est très simple à mettre en œuvre, car il n'y a ni stockage, Ni manipulation de substances chimiques et les caractéristiques chimiques de l'effluent ne sont pas modifiées.

IV.4.5.10 La filtration :

C'est un procédé physique qui permet de retenir les microorganismes par rétention à l'aide d'un filtre. Qu'elle soit réalisée sur sable ou sur membrane cette technique exige une épuration secondaire préalable garantissant une élimination assez poussée des matières en suspension.

L'élimination des virus, des bactéries et des protozoaires est fonction du milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur du massif filtrant et du niveau d'oxydation de l'eau filtrée.

IV.4.6 Le traitement des boues :

Les boues constituant le résidu principal des stations d'épuration. Le traitement des boues représente 30% de l'investissement dans la construction d'une station d'épuration. Il est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès à fin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance.

On distingue trois grands types de traitement :

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

b) 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 .IV.13 : Lits de séchage.

c) 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.

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

Le traitement des boues a pour objectifs de :

- Réduire la fraction organique afin de diminuer leur pouvoir fermentescible et les risques de contamination (stabilisation).
- Diminuer leur volume total afin de réduire leur coût d'évacuation (déshydratation).[26]

IV.5 Les risque du métier :

Les agents effectuant des opérations sur les stations d'épurations, les lagunes et les bassins de rétention sont soumis à un certain nombre de risques pouvant entraîner des accidents de service ou des maladies professionnelles.

IV.5.1 Risques inhérents aux lieux de travail :

IV.5.1.1 Risque de bruit :

Le fonctionnement dans des locaux souvent confinés, notamment de pompes et de systèmes d'aération ventilation (les locaux des usines de traitement des eaux usées sont ventilés en permanence et l'air vicié est traité avant rejet dans l'atmosphère), est générateur d'une nuisance sonore qui peut être importante.

IV.5.1.2 Risque électrique :

L'environnement spécifique des installations (présence d'eau, humidité ambiante, produits corrosifs,...) peut entraîner un vieillissement rapide des installations et être à l'origine de risque électriques.

IV.5.1.3 Risque d'inhalation du à la qualité de l'air :

La qualité de l'air est amoindrie à la fois par la contamination accidentelle des eaux usées par des produits toxiques, par l'utilisation des produits chimiques utilisés dans le cadre du traitement et par la présence de gaz toxiques générés par les traitements appliqués aux eaux usées.

IV.5.1.4 Risque de chutes, de glissades voire de noyade :

Les agents des stations d'épuration travaillent fréquemment autour des bassins.

IV.5.1.5 Risque de circulation :

Dans le cadre de l'évacuation des boues ou de la réception de matières de curage, des poids lourds (camions bennes, camions "hydrocureurs") et des engins de chargement (pour les boues) circulent dans l'enceinte de la station d'épuration.

IV.5.2 Principaux risques liés aux tâches :**IV.5.2.1 Risques de chutes, de glissades, et de noyades :**

Lors des rondes de surveillance, les opérateurs circulent sur des passerelles autour des bassins. Aux abords d'un bassin ou d'une fosse il existe aussi un risque de noyade. Celui-ci est aggravé dans les bassins où de l'air est insufflé depuis le fond : en raison de la densité mélange, il est impossible d'y surnager.

IV.5.2.2 Risques dus à la manutention manuelle :

Les opérateurs sont amenés à manœuvrer des pièces lourdes notamment manutention de trappes ou de tampons, démontage de moteurs, de turbines, de pompes, enlèvement de bennes à déchets,... ce qui peut conduire à des contusions, écrasements, lombalgies ...

IV.5.2.3 Risque électrique :

Dans le cadre de l'entretien et de la maintenance des équipements de la station, les agents peuvent être amenés à contrôler les appareillages électriques et à faire des travaux de modification et de réparation les installations électriques.

IV.5.3 Principaux risques liés aux produits :**IV.5.3.1 Risque chimique :**

Ce risque chimique est lié à l'utilisation de produits employés pour le traitement des eaux (chlore, chaux, chlorure ferrique, eau de javel, flocculants divers, acide sulfurique, méthanol,) et des boues, ainsi qu'à la présence de gaz toxiques générés par ces traitements (sulfure d'hydrogène, mercaptans, ammoniac, amines, aldéhydes, cétones, acides organiques, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, ...). Les niveaux de pollution sont très variables.

Le risque majeur est lié au gaz de fermentation : le sulfure d'hydrogène, toxique redoutable. Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont les suivantes :

- VLEP sur 8 heures : 5 ppm

- VLEP « court terme » : 10 ppm

Le sulfure d'hydrogène est rapidement mortel à une concentration de 800 à 1 000 ppm.

IV.5.3.2 Risques biologiques :

Les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à une grande variété d'agents biologiques pathogènes, lesquels peuvent être par exemple à l'origine de diarrhées, de nausées, d'infestations parasitaires, d'hépatites ou encore de la leptospirose.

IV.5.4 Principaux risques liés aux équipements de travail :

IV.5.4.1 Risques mécaniques :

Le fonctionnement des installations comme les dégrilleurs, la vis de relevage, les bandes transporteuses, les ponts racleurs, pompes,... conduisent à un risque d'entraînement, d'écrasement, de cisaillement, de chocs.

IV.5.4.2 Incendie :

Il est lié principalement aux installations spécifiques : chaudières, installations de séchage des boues, stockage de produits inflammables... Mais une inflammation des refus de dégrillage ou de déshuilage, une défaillance d'une installation électrique est toujours possible.

IV.5.4.3 Explosion :

Ce risque résulte de la présence de méthane ou d'hydrogène sulfuré à des concentrations dangereuses dans un espace confiné. Ce gaz provient principalement de la fermentation des matières organiques.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté une petite généralité sur les eaux usées, quelle est l'origine des eaux usées et la composition de ces eaux, et on a cité les différentes étapes de traitement des eaux usées dans une station d'épuration et on a précisé aussi quelque types de traitement des eaux par exemple : boues activé, lit bactérienne, bio disque et lagunage naturelle.

La collecte et le traitement des eaux résiduaires urbaines sont règlementés. Par conséquent, le marché de la construction de station d'épuration est porteur. Il existe différentes filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. Le choix d'une de ces filières dépend de différents impératifs technico-économiques et surtout de la quantité d'eau à traiter.

Chapitre V : Présentation de la station d'épuration de la wilaya de Guelma

V.1.2 Présentation de la STEP de Guelma :

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

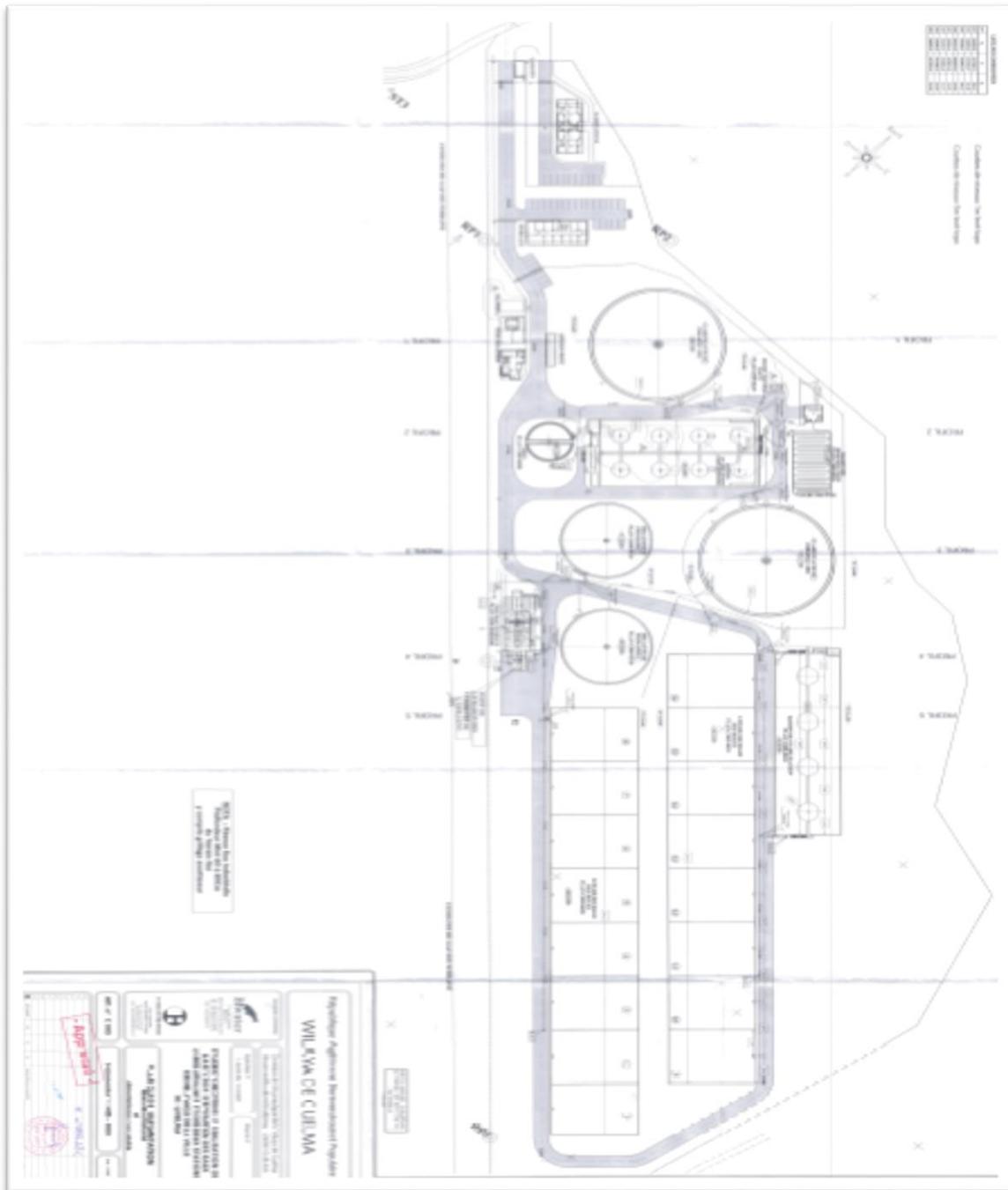


Figure.V.2 : Plan architectural de la STEP Guelma. [14]

V.1.3 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, 2008). [26]



Figure.V.3 : Photo aérienne de la station d'épuration (Guelma). [26]

V.1.4 Caractéristique et Nature des effluents :

La station est alimentée par des effluents d'origine domestique (à hauteur de 199086 Equivalent- Habitants) en 2010. [26]

V.2. 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 gravitaire 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 tout en même temps; les égouts, les rejets industriels, individuels.....etc.).(STEP Guelma, 2008). [26]

V.2.1 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.

V.2.2 Charges Hydrauliques et Polluantes :

Les différents nombres de charges à retenir sont (Tab) [26]

Tableau .V.1 : Charge polluante.

Paramètres	Charge Kg/j	Concentration lg/l
DCO	16000	500
DBO5	10800	338
MES	14000	438

V.3. Les éléments de traitement au niveau de STEP Guelma :

V.3.1 Dégrillage :

Espacement des barreaux : 20mm pour le dérailleur automatique et 30mm pour l'agrigle fixe

Epaisseur des barreaux : 10mm maximum.

La grille sera dimensionnée pour un colmatage maximum de 30 cm La surface immergée sera égale à 2,49m². [26]

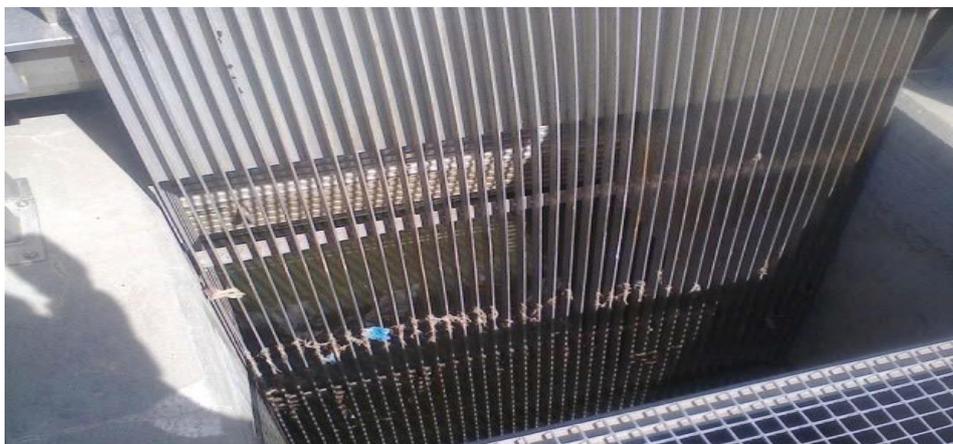


Figure.V.4 : Dégrillage (STEP Guelma). [26]

V.3.2 Dessablage / déshuilage :



Figure.V.5 : Dessablage – Déshuilage (STEP Guelma). [26]

Un 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.
- Un déshuilage aéré avec raclage mécanique des graisses et flottant.
 - Hauteur de l'ouvrage minimum 1.75m.
 - Surface totale minimum : 168m^2 .
 - Nombre d'ouvrages : 02.
 - Surface d'un bassin : 17.5m^2 .
 - Largeur d'un bassin : 4.80m. [26]

V.3.3 Décanteur primaire :



Figure.V.6 : Décanteur primaire (STEP Guelma). [26]

Ce traitement élimine 30 à 40 % des matières en suspension et réduit d'environ 30 % la DBO et la DCO.

- Nombre d'ouvrages : 02.
- Forme : cylindro-conique.
- Surface totale minimum : 1.394m².
- Surface /Bassin minimum : 697m².
- Diamètre d'une bassine minimum : 30.00m.
- Hauteur d'eau : 3.0m. [26]

V.3.4 Bassin de traitement biologique :

Le traitement biologique se déroule au niveau de bassin d'aération. [26]

- **Bassin d'aération :**

Débit journalier des eaux usées : 32.000m³/j

L'aération s'effectue dans deux bassins longitudinaux fonctionnant en parallèle, Donc volume total d'aération : 9.33m³.

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

Surface d'un bassin : 1.037m².

Longueur d'un bassin : 64.40m.

Largeur d'un bassin : 16.10m. [26]

- **Besoins en oxygène :**

Production d'O₂ : 1.7 kg O₂/KWh.

Les besoins en oxygène sont multiples, il est calculé 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 kgO₂/j, soit 230 kgO₂/h.

Besoins en oxygène de point = 367.52kgO₂/h. [26]



Figure.V.7 : Bassin de traitement biologique (STEP Guelma). [26]

V.3.5 Clarificateur :

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. [26]



Figure.V.8 : Clarificateur (STEP Guelma). [26]

V.3.6 Lit de séchage :



Figure.V.9 : Lits de séchage (STEP Guelma). [26]

V.3.7 Bassin de désinfection :



Figure.V.10 : Bassin de désinfection (STEP Guelma). [26]

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

- Temps de contact : 20 mn.
- volume de désinfection : 726 m³.
- longueur : 24.2 m.
- largeur : 15 m.
- Hauteur des chicanes : 2.00m.
- Chloration.
- Débit a' traité : 2.18 m³/h.
- Dose de chlore : 05mg/l.
- Choix de l'oxydant : NACLO. [26]

Tableau .V.2 : Quantité de chlore a Dosé.

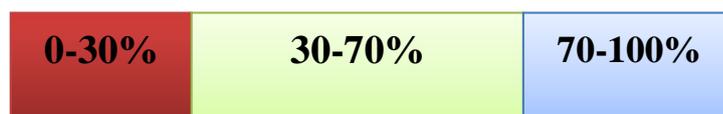
Dose moyenne	Débit moyen	Débit de chlore	Débit d'hypochlorite de calcium
05 ppm	1 ,333 m ³ /h	6,665 kg/h	48,30 kg/h

V.4 Evaluation du rendement de la station d'épuration de Guelma :

V.4.1 Introduction :

Le rendement d'une station d'épuration est le rapport de la pollution éliminée par cette station sur la pollution reçue. Il définit les performances et la capacité d'épuration de la STEP. [26]

Grille dévaluation du rendement :



0-30% : on a faible rendement de la station d'étude.

30-70% : on a moyen rendement de la station d'étude.

70-100% : on a bon rendement de la station d'étude.

V.4.2 Evolution spatial du rendement dans la station d'épuration de Guelma :

Par manque de données et pour combler les lacunes, Le calcul des rendements s'est fait sur les mois communs des années. Les figures. 11, 12 et 13 expriment le passage de la matière organique (DCO, DBO₅ et MES) par la station d'épuration durant les quatre années d'étude (2016,2017, 2018 et 2019). [26]

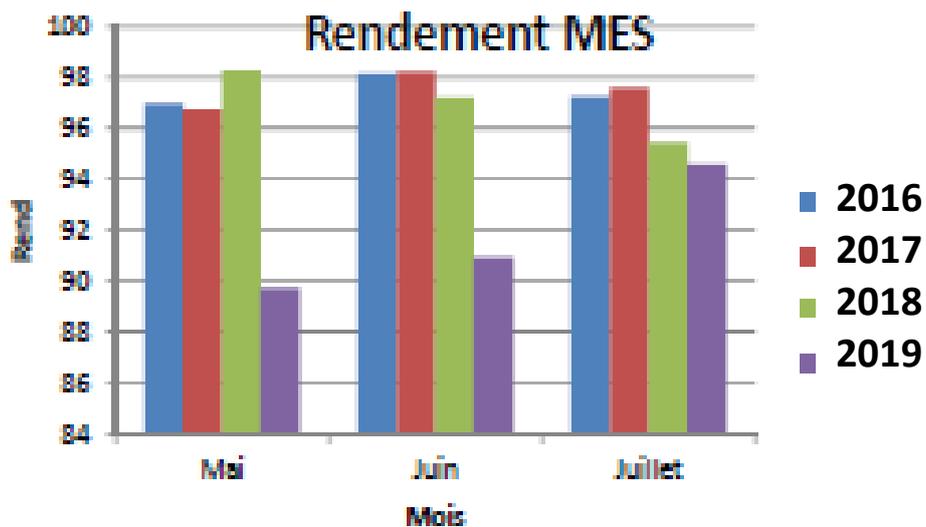


Figure.V.11 : Evolution spatial du rendement de MES de la station de Guelma. [26]

La Figure 11 Indique les différents rendements pour les quatre années d'observation du paramètre MES. Cependant une distinction se fait au cours de l'année 2019 où on note une diminution du rendement qui passe de 98,24% à 89,71%. Ceci peut être expliqué par un mauvais fonctionnement de la station par un apport de la matière en suspension soit lors de L'étape dégrillage (apport solide), ou dans le bassin de décantation (dépôt de matière en suspension). [26]

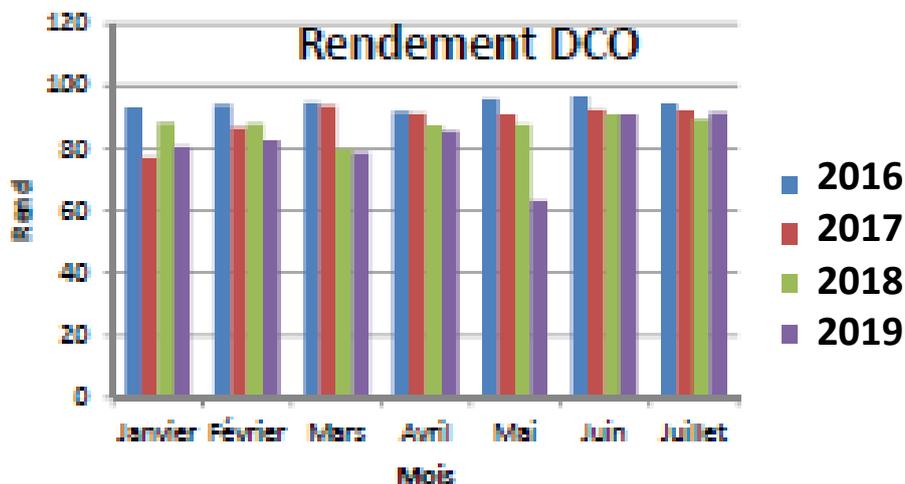


Figure.V.12 : Evolution spatial du rendement de DCO de la station de Guelma. [26]

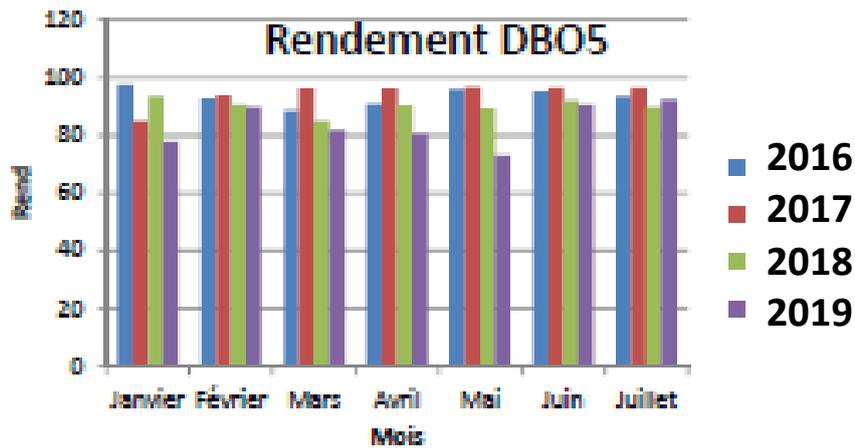


Figure.V.13 : Evolution spatiale du rendement de DBOs de la station de Guelma. [26]

La DCO et la DBO5 semblent donner les mêmes diagrammes. On remarque que le mois de Mai, pour l'année 2019, le rendement est relativement faible par rapport aux années précédentes, tout en restant dans la fourchette bon rendement.

La consommation de l'oxygène par les bactéries peut être à l'origine de cette baisse de rendement. On pense aussi au mauvais fonctionnement du bassin d'aération.[26]

Conclusion :

Ce travail consiste à étudier les eaux usées de la station d'épuration de la ville de Guelma. L'étude géomorphologique de la wilaya de Guelma a montré qu'il existe plusieurs formes qui se présentent comme suit :

Les formations d'âge Quaternaire sont localisées le long de la vallée de l'Oued Seybouse et les formations de Mio-Pliocène, avec des lacs comme le lac souterrain de Bir Ben Osmane. Cette wilaya construit des ressources d'eau importantes comme les Oueds et les barrages tel que Seybouse, bouhamdane, mellah et charef et les barrages comme Hammam Debagh et Medjez Beggar et finalement les Plaines citons celles de Guelma et Bouchegouf.

L'évaluation de performance épuratoire sur la matière organique exprimé en MES, DBO5 et DCO, montre que la station de Guelma permet fait un bon rendement et une bonne élimination de la matière organique qui mène à une bonne qualité d'épuration, avec un rendement qui varie entre 63,22% à 98,24%, pendant les quatre années étudiées.

Conclusion générale

Conclusion :

Ce mémoire consiste à étudier la Durabilité des bétons dans les stations d'épurations et les dégradations qui les affectent et aussi les modes de réparation pour une longue durée de vie.

On constate à l'usage que les concepts du développement durable se construisent dans une complexité évidente, contraire aux tentatives permanentes de simplification des problèmes. Pour autant, l'appréciation qualitative du béton dans les dimensions aujourd'hui référencées montre que ce matériau n'a pas à être cloué au pilori de l'écologiquement correct. Et, dans tous les cas, sa durabilité est le facteur fondamental pour réduire son impact.

Cette recherche nous a permis de sérier les facteurs à prendre en compte pour l'appréhension de la problématique de la durabilité des bétons. La conception d'un ouvrage en béton ou en béton armé nécessite d'apprécier à priori l'ensemble des contraintes environnementales et les agressions potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

On a montré que la structure en béton n'est pas seulement menacée par les charges qui lui sont appliquées, mais aussi par l'environnement dans lequel elle est construite. Pour que cet environnement ne nuise pas à la structure on doit prendre soin du béton et l'entretenir.

Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces dégradations et les procédés de réparations.

On a présenté des généralités sur les eaux usées, quelle est l'origine des eaux usées et la composition de ces eaux, et on a cité les différentes étapes de traitement des eaux usées dans une station d'épuration et on a précisé aussi quelques types de traitement des eaux par exemple : boues activées, lit bactérienne, bio disque et lagunage naturelle.

Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptée, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles dégradations semblables.

Finally, we have completed this work with a study and evaluation of the station in Guelma. It is clear that the station has a good yield and a good elimination of organic matter, which leads to a good quality of purification during the four years studied.

Référence :

- [1] JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT. «La durabilité des bétons». «Chapitre 1»/ATILH/ 2008.France.
- [2] **GUETARI Zoubeida.** «L'EFFET DE LA DEGRADATION CHIMIQUE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS. » mémoire de magister. Université Hadji Mokhtar – Annaba.2013.
- [3] <https://www.coffrages-cosmos.com/les-differents-types-de-beton-et-leurs-specificites/>. consulté le 15/06/2020
- [4] <http://www.guidebeton.com/composition-beton>. Consulté le 26/05/2020.
- [5] <https://www.holcim.be/fr/les-constituants-du-beton-les-adjuvants>. Consulté le 19/03/2020.
- [6] <https://www.jevaisconstruire.be/quels-sont-les-avantages-et-les-inconvenients-dune-construction-en-beton-prefabrique/>. Consulté le 18/03/2020.
- [7] <https://www.infociments.fr/betons/notion-de-durabilite-des-betons>.consulté le 11/04/2020
- [8] <https://www.holcim.be/fr/causes-et-preventions-des-alterations-du-beton-approches-de-la-durabilite-du-beton>. Consulté le 10/05/2020.
- [9] **OUALIT MEHENA.** «Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien.» mémoire de magistère. Université M'Hamed Bougara –BOUMERDES.2009.
- [10] JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT. «La durabilité des bétons».«Chapitre 12»/ATILH/ 2008.France.
- [11] JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT. «La durabilité des bétons».«Chapitre 9»/ATILH/ 2008.France.
- [12] https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m_Fissuration-en-beton-avec-referenc-particuliere-au-beton--haute-performance29.html. Consulté le 03/03/2020.
- [13] JEAN-MICHEL TORRENTI , OLIVIER DIDRY, JEAN-PIERRE OLLIVIER FREDERIC PLAS.« La dégradation des bétons».1999.France.
- [14] **HOUMEUR MOUAADH ET-TAYIB ET LAMMARI YACINE.** Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives. Mémoire de master. Université Guelma 2018.
- [15] JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT. «La durabilité des bétons». «Chapitre 10»/ATILH/ 2008.France.
- [16] https://www.memoireonline.com/10/08/1579/m_rehabilitation-ouvrages-beton-arme-degrades-corrosion-armatures3.html#toc8. Consulté le 17/04/2020.

[17] **MOUHAMED SALIM KOUADJI.** «Dégradations au niveau de l'usine alzinc constates et recommandations». Mémoire de mastère. Université de Tlemcen.2013.

[18] **MAGALI EVESQUE –DNIEL BINDSCHEDLER – FREDERIC BLANCHET – REGINALD BORREMANS – GEORGES BROSS – OLIVIER BROES – GILLES CARRAND – DANIEL COPIN – ADRIAN GOMILA –DIDIER LESAGE – PROFESSEUR PROVERBIO – LAURENT SCHRODER – LUC VANCALBERGH-INGO WULFF.** «Réseau et ouvrages publics d'assainissement /Altération et corrosion, prévention et protection ».projet de recommandation. 2004.

[19] <http://www.spppi-estuaire-adour.org/wp-content/uploads/2015/07/formation-h2s.pdf>. Consulté le 25/04/2020.

[20] <https://tp.fransbonhomme.fr/conseils/comment-et-ou-se-forme-lh2s>. Consulté le 07/05/2020.

[21] **JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT.** «La durabilité des bétons». «Chapitre 9»/ATILH/ 2008.France.

[22] https://www.researchgate.net/publication/308995229_Corrosion_63_pagespdf. Consulté le 13/03/2020

[23] <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-et-betons/protection-contre-la-corrosion>. Consulté le 20/05/2020.

[24] **ITMAIZEH EHAB.** «Pathologie de structure en bétons armé». Mémoire de master .UNIVERSITE LARBI TEBESSI-TEBESSA .2016

[25] https://www.groupe-sma.fr/SGM/jcms/jizhprod_70559/fr/degradations-sur-ouvrages-d-art-betons-armes. Consulté le 22/04/2020.

[26] **BENFIALA ISSAM ET HAULI ZOUHIR.** « Le Rendement épuratoire de la station d'épuration de la ville de Guelma». Mémoire de master .UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.2017.

[27] **SAADI MOHAMED ET LAHMAR FARES ALAA EDDINE.** Evaluation de l'efficacité de la station d'épuration de GUELMA (N-EST ALGERIE). Mémoire de master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.2018.

[28] <http://www.pathologie-beton.fr/pathologie/les-stations-depurations-et-de-traitements-des-eaux/>. Consulté le 02/02/2020.

[29] <http://www.fndae.fr/documentation/PDF/Fndae22bis.pdf>. Consulté le 28/02/2020.

[30] <https://travail-emploi.gouv.fr/archives/archives-courantes/metiers-et-activites/article/agent-de-station-d-epuration>. Consulté le 18/02/2020.