

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

HABIRECH NADA

**Thème : Influence des adjuvants à base des déchets végétaux sur
le comportement du béton armé – Etat de l'art-**

Sous la direction de :

Dr. Nigri Ghania

Juin 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu Tout-Puissant pour m'avoir donné le courage et l'aide pour faire ce travail.

Je voudrais exprimer aussi mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et de leur exprimer ma gratitude.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à ma directrice de ce travail, **Dr NIGRI Ghania**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa patience et son accompagnement bienveillant tout au long de la réalisation de ce travail. Sa précieuse aide a grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens à remercier également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Je suis profondément reconnaissante envers mes parents, ma chère mère **Laila** et mon père **Abd Elwahab**, pour leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements constants.

Merci également à mes sœurs **Anfel** et **Marwa**, ainsi qu'à mon frère **Haitham**, pour leur soutien moral et leur présence réconfortante. Je n'oublierai jamais les enfants de ma sœur, **Rafif** et **Djasser**, pour leur amour et leur grand soutien.

Enfin, j'adresse mes remerciements chaleureux à mon amie **Roumayssa**, pour sa précieuse amitié, son écoute et son soutien tout au long de ce parcours.

DEDICACE

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné
la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire,
la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et du bonheur.

Je dédie ce modeste travail A :

Tous les enseignants du département de génie civil,
toutes ma famille.

tous ceux qui me sont chères.

tous ceux qui m'aiment.

tous ceux que j'aime.

Tous mes collègues promotion «2025».

RESUMES

FRANÇAIS – ARABE – ANGLAIS.

Résumé

La corrosion de l'acier d'armature est un phénomène courant dans les structures en béton armé. Cette corrosion résulte de la pénétration d'acides et de sels, ce qui abaisse le pH de la solution interstitielle du béton et entraîne la décomposition de la couche protectrice passive initialement formée. Par conséquent, de nombreuses études ont été menées pour comprendre les mécanismes de passivation, de corrosion et de protection contre la corrosion afin de résoudre ce problème.

L'ajout d'inhibiteurs de corrosion constitue une excellente solution pour les structures en béton armé. Des inhibiteurs de corrosion synthétiques ont été développés pour assurer une protection adéquate de l'acier d'armature contre la corrosion. Cependant, leur utilisation est actuellement quasi inexistante en raison de leur toxicité, de leur coût élevé et de leur impact environnemental négatif. Cette situation a incité les chercheurs à rechercher d'autres types d'inhibiteurs non seulement efficaces, mais également respectueux de l'environnement.

Plusieurs études ont montré que les extraits de plantes (feuilles, racines et tiges) constituent des matériaux idéaux pour remplacer les matériaux organiques synthétiques et autres matériaux inorganiques coûteux et toxiques.

En général, certains inhibiteurs de corrosion verts peuvent atteindre une efficacité inhibitrice de 94 %, comparable à celle des inhibiteurs synthétiques courants. Cette efficacité peut être améliorée jusqu'à 99 % en extrayant le groupe fonctionnel de ces matériaux organiques verts.

Mots Clés : Inhibiteur, corrosion, plantes, acier doux, béton armé.

ملخص

يُعد تآكل حديد التسليح ظاهرة شائعة في هياكل الخرسانة المسلحة. وينتج هذا التآكل عن تغلغل الأحماض والأملاح، مما يُخفض درجة حموضة محلول مسام الخرسانة، ويؤدي إلى تحلل الطبقة الواقية السلبية المتشكلة في البداية. ونتيجةً لذلك، أُجريت دراسات عديدة لفهم آليات التخميل والتآكل والحماية من التآكل، وذلك لحل هذه المشكلة.

وُعدّ إضافة مثبتات التآكل حلاً ممتازاً لهياكل الخرسانة المسلحة. وقد طُوّرت مثبتات تآكل اصطناعية لضمان حماية كافية لحديد التسليح من التآكل. ومع ذلك، يكاد يكون استخدامها معدومًا حاليًا نظرًا لسميتها وتكلفتها العالية وتأثيرها البيئي السلبي. وقد دفع هذا الوضع الباحثين إلى البحث عن أنواع أخرى من المثبتات، ليست فعالة فحسب، بل وصديقة للبيئة أيضًا.

وقد أظهرت العديد من الدراسات أن المستخلصات النباتية (الأوراق والجذور والسيقان) تُعدّ مواد مثالية لتحل محل المواد العضوية الاصطناعية وغيرها من المواد غير العضوية باهظة الثمن والسامة.

وبشكل عام، يُمكن لبعض مثبتات التآكل الخضراء تحقيق كفاءة تثبيطية تبلغ 94%، وهي نسبة تُضاهي كفاءة المثبتات الاصطناعية الشائعة. يمكن تحسين هذه الكفاءة إلى 99% باستخلاص المجموعة الوظيفية من هذه المواد العضوية الخضراء.

الكلمات المفتاحية: مثبتات، تآكل، نبات، فولاذ، خرسانة مسلحة

Abstract

Corrosion of reinforcing steel is a common phenomenon in reinforced concrete structures. This corrosion results from the penetration of acids and salts, which lowers the pH of the pore solution of the concrete and leads to the decomposition of the initially formed passive protective layer. Therefore, many studies have been conducted to understand the mechanisms of passivation, corrosion and corrosion protection in order to solve this problem.

The addition of corrosion inhibitors is an excellent solution for reinforced concrete structures. Synthetic corrosion inhibitors have been developed to ensure adequate protection of reinforcing steel against corrosion. However, their use is currently almost nonexistent due to their toxicity, high cost, and negative environmental impact. This situation has prompted researchers to search for other types of inhibitors that are not only effective but also environmentally friendly.

Several studies have shown that plant extracts (leaves, roots, and stems) are ideal materials to replace synthetic organic and other expensive and toxic inorganic materials. In general, some green corrosion inhibitors can achieve an inhibitory efficiency of 94%, comparable to that of common synthetic inhibitors.

This efficiency can be improved up to 99% by extracting the functional group from these green organic materials.

Keywords: Inhibitors, Corrosion, Plants, Steel, Reinforced Concrete

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURES

LISTE DE TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

Sommaire	Pages
Introduction générale	1-3
Chapitre 1 : Généralités sur le béton	4
1.1.Introduction.	4
1.2. Le béton.	4
1.2.1. Le ciment.	4
1.2.1.1. Procèdes de fabrication du ciment.	5
1.2.1.2. Composants du ciment.	6
a) Le clinker portland.	6
b) Les additions minérales.	7
✓ Les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau (S).	7
✓ La fumée de silice (F).	8
✓ Les cendres volantes (C).	8
✓ Le sulfate de calcium.	9
✓ Pouzzolane naturelle.	10
✓ Pouzzolane artificielle.	10
✓ Fillers (F).	10
✓ Les calcaires (L).	11
✓ Schistes calcinés (T).	11
✓ Constituants mineurs de ciment.	11
1.2.1.3. Classification du ciment	11
✓ En fonction de leur composition.	11
✓ En fonction de leur résistance normale.	12
1.2.1.4. Hydratation du ciment portland.	13
1.2.1.4.1. Hydratation des silicates C_3S et C_2S .	14
1.2.1.4.2. Hydratation de la phase aluminates.	14
1.2.1.5. L'évolution des propriétés mécaniques du ciment portland.	15
1.2.1.5.1. Critères de choix du ciment.	15
✓ Critère I : Choix de la classe de résistance du ciment.	15
✓ Critère II : Impératifs de mise en œuvre.	16
✓ Critère III : Environnement de l'ouvrage.	16
1.2.2. Les granulats.	17

1.2.2.1. Les différents types de granulats.	17
a) Les granulats naturels.	17
- Les Granulats alluvionnaires.	18
- Les Granulats de carrières.	18
b) Les granulats artificiels.	18
c) Les granulats recyclés.	19
1.2.2.2. Caractéristiques des granulats.	19
a) Caractéristiques physiques.	19
• Les masses volumiques.	19
- La Masse Volumique Apparente (en vrac).	19
- La Masse Volumique Absolue.	19
- La porosité (p).	20
• Teneur en eau (W %).	20
• Taux d'absorption d'eau (AB %).	20
1.2.2.3. Les granulats courant pour béton.	20
a) Sable.	20
1) Classification des sables.	20
2) Caractéristiques des sables destiné à la fabrication du béton.	21
b) Gravier.	21
1) Propriétés mécaniques du gravier.	21
➤ L'essai Micro Deval (NA 457).	21
➤ Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation).	21
1.2.3. L'eau de gâchage.	22
1.2.3.1. Exigences requises pour les eaux de gâchage : NF EN 1008.	23
1.2.3.2. La norme préconise 3 types d'exigences.	23
1.2.4. Adjuvants.	24
1.2.4.1. Classification des adjuvants.	24
a) Adjuvants modifient l'ouvrabilité du béton.	24
✓ Les plastifiants-réducteurs d'eau.	25
✓ Les super plastifiants.	25
✓ Mode d'action des super plastifiants.	25
b) Les Adjuvants modifient la prise et le durcissement.	27
✓ Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement.	27

✓ Les retardateurs de prise.	27
c) Les Adjuvants modifient certaines propriétés particulières.	28
✓ Hydrofuges de masse.	28
✓ Entraîneurs d'air.	28
✓ Inhibiteurs de corrosion.	29
1.2.5. Propriétés essentielles d'un béton.	30
1.2.5.1. Propriétés du béton frais.	30
a) Test au cône d'Abrams.	31
b) Essai au maniabilimètre LCL.	31
1.2.5.2. Propriétés du béton durci.	32
a) La résistance à la compression à l'âge de 28 jours.	32
b) Résistance à la traction.	33
- Traction directe.	33
- Traction par fendage.	33
- Traction par flexion.	34
C) La porosité.	34
d) Retrait.	34
1.2.6. Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du Béton.	35
1.2.6.1. Les avantages de béton.	35
1.2.6.2. Les inconvénients de béton.	35
1.2.7. Différents types de bétons.	35
1.2.7.1. le béton ordinaire.	35
1.2.7.2. Le béton armé.	35
1.2.7.3. Le béton fibré.	36
1.2.7.4. Le béton lourd.	36
1.2.7.5. Le béton léger.	37
1.2.7.6. Le béton prêt à l'emploi.	37
1.2.7.7. Béton de haute performance (BHP).	37
1.2.7.8. Le Béton auto plaçant (BAP).	38
1.2.7.9. Béton préfabriqué.	38
1.2.7.10. Le béton précontraint.	39
1.2.7.11. Béton projeté.	39
1.2.8. Conclusion.	40

Références Bibliographiques du chapitre 1.	41-46
Chapitre 2 : Pathologies du béton	47
2.1. Introduction.	47
2.2. Pathologies et causes de dégradations du béton armé.	48
2.2.1. Dégradations mécaniques.	48
2.2.1.1. Les Chocs.	49
2.2.1.2. Surcharge.	49
2.2.2. Dégradations physiques.	49
2.2.2.1. Retrait.	49
a) Le retrait de plastiquées.	50
b) Le retrait de dessiccation.	50
c) Le retrait thermique.	50
d) Le retrait d'auto-dessiccation.	50
2.2.2.2. Gel-dégel.	50
2.2.2.3. Sels de déverglaçage.	51
2.2.3. Dégradations Chimiques.	51
2.2.3.1. Carbonatation.	51
a) Mécanismes de la carbonatation.	52
b) Les paramètres influençant la carbonatation.	52
- Rapport eau/ciment (E/C).	52
- Le dosage en ciment.	53
- La nature de ciment.	53
- La température.	53
- La résistance à la compression.	54
- Humidité relative.	54
- La concentration en dioxyde de carbone.	55
- La Vitesse de carbonatation.	55
c) Conséquence de la carbonatation sur le béton.	55
- Chute du pH de la solution interstitielle et corrosion des armatures.	55
- Evolution des propriétés de transfert.	55
- Retrait de carbonatation.	56
- Augmentation locale de la teneur en eau.	56

- Diminution de la porosité.	56
2.2.3.2. Alkali-réaction ou réaction alcali-granulats (RAG).	57
a) Désordres dus à l'alcali-réaction.	58
b) Types de Réactions Alcalis-Granulats.	58
✓ Réaction Alcalis-Silice (RAS).	58
✓ Réaction Alcalis-Silicate.	59
✓ Réaction Alcalis-Carbonate (RAC).	60
2.2.3.3. Attaques chimiques.	60
a) Réaction sulfatique interne.	60
b) Chlorures.	62
✓ Les conséquences de l'attaque des Chlorures.	62
c) Attaque due aux acides.	63
✓ Les différents types des acides.	64
✓ Action des acides.	64
d) Attaques Bactériennes.	64
2.2.3.4. Dégradation des armatures (Corrosion).	65
a) Origine de la corrosion.	65
b) Les types de corrosion.	65
✓ Corrosion chimique (sèche).	65
✓ Corrosion Biochimique (Bactérienne).	66
✓ Corrosion électrochimique (humide).	66
❖ Corrosion uniforme ou généralisée.	66
❖ Corrosion localisée.	67
a. Corrosion par piqûres.	67
b. Corrosion galvanique.	68
c. Corrosion par crevasses (caverneuse).	69
d. Corrosion sélective.	70
e. Corrosion sous contrainte.	70
f. Corrosion-frottement.	70
g. Fragilisation par l'hydrogène.	71
h. Corrosion érosion/abrasion/cavitation.	71
c) Les principaux facteurs de corrosion.	72
2.3. Aspect économique de la corrosion.	72

2.4. Conclusion.	73
Références Bibliographiques du chapitre 2.	74-77
Chapitre 3 :Protection et Lutte contre la corrosion	78
3.1. Introduction.	78
3.2. Inhibiteurs de corrosion.	78
3.3. Classification d'inhibiteurs.	79
3.3.1. Selon la nature des inhibiteurs.	79
3.3.1.1. Inhibiteurs organiques.	79
3.3.1.2. Inhibiteurs inorganiques (minéraux).	80
3.3.2. Selon leur mode d'action.	80
3.3.2.1. Inhibiteurs d'adsorption.	80
a) Adsorption physique.	80
b) Adsorption chimique (chimisorption).	80
3.3.2.2. Inhibiteurs passivants.	81
3.3.3. Selon leur réaction partielle.	81
3.3.3.1. Inhibiteurs anodiques.	81
3.3.3.2. Inhibiteurs cathodiques.	82
3.3.3.3. Inhibiteurs mixtes.	82
3.3.4. Selon leur origine.	82
3.3.4.1. Inhibiteurs de corrosion synthétiques.	82
a) Nitrites.	82
b) Amines.	83
c) Carboxylates.	83
d) Amides.	83
e) Inhibiteurs hétérocycliques.	84
3.3.5. Inhibiteurs naturel (vert, écologique).	84
3.3.5.1. Extraits de feuilles de <i>Metasequoia glyptostroboides</i> .	86
3.3.5.2. Extraits de feuilles d'olivier.	86
3.3.5.3. Extraits de feuilles d' <i>Olea Europaea L.</i>	88
3.3.5.4. Extraits de feuilles du <i>Ficus carica</i> .	88
3.3.5.5. Extraits de feuilles du <i>Damsissa</i> .	89
3.3.5.6. Extraits de feuilles des graines d' <i>Esfand</i> .	89
3.3.5.7. Extraits de feuilles de cônes de conifères.	89

3.3.5.8. Extraits des tanins.	90
3.3.5.9. Extraits de la gomme de Guar.	90
3.3.5.10. Extraits de Juglans regia.	91
3.3.5.11. Extraits de d'Artémisa Herba Alba.	91
3.3.5.12. Extraits de cladodes de l'Opuntia Ficus Indica (O.F.I.).	92
3.3.5.13. Extraits de Réglisse.	93
3.3.5.14. Extraits de Feuille de Luffa cylindrica (LCLE).	93
3.3.5.15. Extraits des feuilles d'Aloe Vera.	94
3.3.5.16. Extraits des feuilles palmier d'arec.	94
3.3.5.17. Extraits de l'extrait de gingembre.	95
3.3.5.18. L'extrait de feuilles de Fatsia japonica (FJLE).	95
3.3.5.19. Extraits des feuilles allium Sativum (Ail), pétroselinum crispum (Persil) et atractylis Flava Desf.	96
3.3.5.20. Les inhibiteurs de corrosion à base d'huile.	97
3.4. Récapitulatif des recherches ultérieures.	97-99
3.5. Conclusion.	101
Références Bibliographiques du chapitre 3.	102-105
Conclusions générales	106-107
Annexe (Fiche techniques)	108-110

Liste des figures	Pages
Chapitre 1 : Généralités sur le béton	
Figure 1.1: Le béton.	4
Figure 1.2: Le ciment.	5
Figure 1.3: Procédé de fabrication du ciment.	6
Figure 1.4: Extraction la matière première.	6
Figure 1.5: Le clinker.	7
Figure 1.6 : fumée de silice.	8
Figure 1.7 : Cendre volante.	9
Figure 1.8 : Le sulfate de calcium.	10
Figure 1.9: Grains de pouzzolane.	10
Figure 1.10 : Développement et hydratation d'une pâte de ciment.	13
Figure 1.11: gel de C-S-H.	14
Figure 1.12: Ca(OH) ₂ et CSH.	14
Figure 1.13 : Aiguilles d'ettringite.	15
Figure 1.14: monosulfoaluminate hydraté.	15
Figure 1.15: Photos des différents types de granulat.	18
Figure 1.16. Appareil micro-Deval.	22
Figure 1.17 : Photo du Los Angeles.	22
Figure 1.18: Eau de gâchage	24
Figure 1.19: Défloculation du ciment par l'action dispersante des super plastifiants.	26
Figure 1.20 : Mécanisme d'un entraîneur d'air dans le béton.	28
Figure 1.21: Inhibiteur de corrosion (Application externe).	29
Figure 1.22 : Essai d'ouvrabilité du béton.	31
Figure 1.23 : Photo d'un maniabilimètre LCPL.	32
Figure 1.24: Machine de l'essai la compression.	33
Figure 1.25: Traction directe.	33
Figure 1.26: Traction par fendage.	33
Figure 1.27: Béton ordinaire.	35
Figure 1.28: Béton armé.	36
Figure 1.29: Béton fibré.	36
Figure 1.30: Béton lourd.	37
Figure 1.31: Béton léger.	37
Figure 1.32: Béton de haute performance.	38

Figure 1.33: Béton auto plaçant.	38
Figure 1.34: Béton préfabriqué.	39
Figure 1.35: Béton précontraint.	39
Figure 1.36: Béton projeté.	40
Chapitre 2: Pathologies du béton	
Figure 2.1: Dégradation du béton.	48
Figure 2.2 : Les dégradation et les défauts du béton armé.	48
Figure 2.3 : Les différentes dégradations causées par le choc.	49
Figure 2.4: Fissuration du béton due au Retrait.	50
Figure 2.5 : Mécanisme de dégradation par le gel dégel.	51
Figure 2.6 : Phénomène de la carbonatation.	52
Figure 2.7 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment.	53
Figure 2.8: Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment.	53
Figure 2.9: Corrosion des armatures due à la carbonatation.	57
Figure 2.10: Phénomène de la RAG.	58
Figure 2.11: Sources de sulfates interne et externe.	61
Figure 2.12: Attaque sulfatique.	61
Figure 2.13: Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence des chlorures.	63
Figure 2.14: Piqure profonde causée par une attaque de chlorure.	63
Figure 2.15: Attaques acides.	63
Figure 2.16: Cycle du soufre dans les réseaux d'assainissement.	64
Figure 2.17: Corrosion des armatures dans le béton.	65
Figure 2.18: Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier.	66
Figure 2.19: Types de corrosion (a) corrosion localisée et (b) corrosion uniforme.	67
Figure 2.20: Corrosion par piqûres.	68
Figure 2.21: Formes de piqûres (a) cavité profonde (b) cavité caverneuse (c) hémisphérique.	68
Figure 2.22: Corrosion galvanique.	69
Figure 2.23: Corrosion par crevasses.	69
Figure 2.24: Corrosion sélective.	70
Figure 2.25: Fissures de la corrosion sous contrainte CSC.	70
Figure 2.26: Corrosion par frottement d'une pièce.	71

Figure 2.27: Fragilisation par l'hydrogène.	71
Figure 2.28: Corrosion-érosion due à de fortes vitesses de circulation du fluide corrosif.	72
Chapitre 3 : Protection et Lutte contre la corrosion	
Figure 3.1: Métal au contact d'un milieu agressif.	79
Figure 3.2 : Représentation de l'interaction de physisorption et de chimisorption entre la surface du substrat (adsorbant) et les molécules d'adsorbat.	81
Figure 3.3 : Nombre de publications sur les inhibiteurs verts de corrosion de l'acier à base d'extrait de feuilles de plantes (base de données Scopus de 2014 à 2024).	85
Figure 3.4: Feuilles de <i>Metasequoia glyptostroboides</i> .	86
Figure 3.5: Efficacité inhibitrice extrait de feuilles d'olive.	87
Figure 3.6: Exemple d'un procédé d'extraction écologique.	87
Figure 3.7: Feuilles de <i>Ficus carica</i> .	88
Figure 3.8: Graines d'Esfand.	89
Figure 3.9: Cônes de conifères.	90
Figure 3.10: Plante de Tanin.	90
Figure 3.11: la gomme de guar.	91
Figure 3.12: <i>Juglans regia</i> .	91
Figure 3.13: d'Artémisa Herba Alba.	92
Figure 3.14: <i>L'opuntia ficus indica</i> .	92
Figure 3.15: Réglisse.	93
Figure 3.16 : Plante <i>Luffa cylindrica</i> .	94
Figure 3.17: Aloe vera.	94
Figure 3.18: palmier d'arec.	95
Figure 3.19: Gingembre.	95
Figure 3.20 : Feuilles de <i>Fatsia japonica</i> (FJLE).	96
Figure 3.21 : le Persil.	96
Figure 3.22 : l'ail.	96
Figure 3.23 : l' <i>Atractylis Flava</i> Desf.	96
Figure 3.24 : Variation de l'efficacité inhibitrice en fonction des plantes.	100

Liste des Tableaux	Page
Chapitre 1 : Généralités sur le béton	
Tableau 1.1: composition en oxyde du clinker.	7
Tableau 1.2: phases anhydres du clinker.	7
Tableau 1.3: composition chimique d'un laitier granulé.	8
Tableau 1.4: Perte au feu et aire massique des fumées de silices.	8
Tableau 1.5 : Types de ciment et composition.	12
Tableau 1.6: Spécification mécaniques et physiques.	13
Tableau 1.7 : Classes d'environnement selon la norme française NF18-011.	17
Tableau 1.8: Effets des plastifiants sur le béton frais et durci.	27
Tableau 1.9: Synoptique des principaux adjuvants.	30
Tableau 1.10: Classe de consistance.	31
Chapitre 2: Pathologies du béton	
Tableau 2.1: Profondeurs de carbonatation en fonction du temps.	54
Tableau 2.2: Les principaux facteurs de corrosion.	72
Chapitre 3 : Protection et Lutte contre la corrosion	
Tableau 3.1 : Exposition des résultats des travaux de littérature.	97-99
Tableau 3.2 : Abréviations des plantes.	100

C ₂ S	Silicate bicalcique.
C ₃ S	Silicate tricalcique
C ₃ A	Aaluminate tricalcique.
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique.
(C-S-H)	Silicates de calcium hydratés.
Ca(OH) ₂	Portlandite.
(S)	Laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau.
(F)	Fumée de silice.
(C)	Cendres volantes.
CaSO ₄	Sulfate de calcium.
SiO ₂	Silice.
Al ₂ O ₃	Alumine.
Fe ₂ O ₃	oxyde de fer.
(F)	Fillers.
(L)	Calcaires.
(T)	Schistes calcinés.
CEM	Ciment.
(Es)	équivalent de sable
NA	Normes Algérienne.
EN	Normes Européenne.
NF	Norme française.
CEM I (CPA)	Cement, Ciment Portland Artificiel, catégorie I.
CEM II(CPJ)	Cement, Ciment Portland avec Ajouts, catégorie II
CEM III(CHF)	Cement, Ciment de Haut Fourneau, catégorie III
CEM IV (CPZ)	Cement, Ciment Pouzzolanique, catégorie IV.
CEM V (CLC)	Cement, Ciment aux Laitiers et aux Cendres.
R _{C28} , F _{C28}	Résistance du béton à la compression à 28 jours.
G	Coefficient granulaire fonction de la nature du granulat.
R _{nc28}	Résistance nominale du ciment à la compression à 28 jours.
C	Dosage en liant équivalent.
E	Quantité d'eau de gâchage exprimée en litres.
Kg	Kilogramme.
µm	Micromètre.
MPa	Méga Pascal.
m ³	Mètre cube.

mm	Millimètre.
mm ²	Millimètres carrés.
cm ³	Centimètre cube.
g/L	Grammes par litre.
Mg/L	Milligramme par litre.
Ppm	Parties par million, une unité utilisée pour exprimer de faibles concentrations de substances dans un mélange.
(v/v)	Volume/volume.
(p)	Porosité.
(W %)	Teneur en eau.
(AB %)	Taux d'absorption d'eau.
(BA)	Béton armée.
E/C	Rapport eau/ ciment.
e	Profondeurs de carbonatation.
M _{DE}	Coefficient micro Deval.
P	Passant au tamis de 2mm.
j	Jours.
h	Heurs.
(LA)	Coefficient Los Angeles.
F	Charge maximale, exprimée en Newtons.
A _c	l'aire de la section de l'éprouvette.
N	Newton.
pH	Potentiel d'hydrogène.
F _{tj}	Résistance caractéristique à la traction du béton a j jours.
P	Charge totale.
M	Moment de flexion.
a	La côté de la section carrée de l'éprouvette
(BHP)	Béton de Haute Performance.
(BAP)	Béton auto-plaçant.
(BTHP)	Béton à Très Hautes Performances.
CO ₂	Dioxyde de carbone.
Ca ²⁺	L'ion de calcium
CO ₃ ²⁻	Deux anions trioxyde de carbone.
(RAG)	Réaction Alkali-Granulats.
(RAS)	Réaction Alcalis-Silice.
(ACR)	Alkali-Carbonate Réaction.

(RSI)	Réaction Sulfatique Interne.
LCPC	Laboratoires des Ponts et Chaussées.
H ₂ O	Eau.
(JRS)	Juglans Regia.
(O.F.I.)	Opuntia Ficus Indica.
(LCLE)	Extraits de feuille de Luffa cylindrica
(FJLE)	Extraits de feuille de Fatsia Japonica.
(ASE)	Extrait d'Aluim Sativum.
(AFE)	Extrait d'Atractylis Flava Desf.
(PCE)	Extrait de Petroselinum Crispum.
(NaCl)	Chlorure de Sodium.
H ₂ SO ₄	Acide Sulfurique.
HCl	Acide Chlorhydrique.
H ₃ PO ₄	Acide Orthophosphorique.
Na ₂ SO ₄	Sulfate de Sodium.
(x70)	Nuance d'acier à haute résistance et faiblement allié
(RB14)	Acier à fer à béton.
(Q235)	Acier ordinaire en faible teneur en carbone de résistance au cisaillement minimale de 235 MPa.
XC52	Acier au carbone avec une teneur en carbone de 0.52% .
(XC 42)	Acier au carbone moyen, offrant une bonne résistance à la traction et une résistance modérée à l'usure.
(MS)	Acier doux/ Acier allié au carbone
(A60)	Acier non allié à usage courant
(TO)	Tung.
(SBO)	Soja.
(CCO)	Coco.
(EI%)	Efficacité inhibitrice.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

En raison de son faible coût et de ses caractéristiques mécaniques satisfaisantes, le béton armé est le béton le plus utilisé dans la construction des ouvrages en génie civil : bâtiments, ouvrages d'art et digue de barrage. L'exposition du béton à des charges modérées, aux intempéries et aux environnements acides ou salins peut entraîner d'importants dommages.

La durabilité des structures en béton armé est devenue une préoccupation majeure pour toutes étapes de construction : la conception, la réalisation et la maintenance de ces ouvrages. La durée de vie est en grande partie liée à la durabilité du matériau mis en œuvre, d'où le béton est estimé plus durable s'il résiste à la pénétration d'agents agressifs.

Lors du coulage du béton, l'acier corrodé superficiellement après stockage à l'air libre se trouve enrobé dans un milieu très basique (la solution interstitielle du béton), cela forme autour de l'armature une fine couche d'oxydes en surface appelée couche de passivation, adhérente et stable sur la surface de l'acier. Le béton durci constitue donc un environnement sain et protecteur à l'armature métallique (pH de l'ordre de 13). Une fois la couche de passivation est brisée suite à une baisse du pH, le risque d'amorçage et de propagation de la corrosion des armatures augmente.

La corrosion des armatures est l'un des principaux phénomènes déterminants pour la durée de vie de la structure, l'acier inoxydable est plus résistant qu'un acier ordinaire, mais son coût est très élevé. L'acier ordinaire est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé, il est capable de durer assez longtemps pour satisfaire une durée de service déterminée. D'autre part, la restauration et la réparation des structures en béton armé est presque aussi importante que de nouvelles constructions.

L'une des stratégies les plus efficaces pour prévenir la corrosion en environnements agressifs est l'utilisation d'inhibiteurs. Un inhibiteur de corrosion est un produit chimique qui, lorsqu'il est ajouté en faibles concentrations au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion du métal. Ces derniers sont ajoutés à l'eau de gâchage au cours du malaxage du béton ou être absorbé par le béton durci. Ces inhibiteurs de corrosion sont couramment utilisés dans diverses industries, telles que l'industrie pétrolière, l'industrie chimique, l'industrie maritime et la construction, pour protéger les équipements métalliques et les infrastructures exposés à des environnements corrosifs.

En général, le choix approprié des inhibiteurs de corrosion dépend de leur efficacité et des groupes actifs correspondants, de leur concentration effective, de leur toxicité, de leur coût et de leur disponibilité commerciale.

L'action des inhibiteurs de corrosion peut se manifester de différentes manières, notamment en formant un film protecteur sur la surface du métal, en bloquant l'accès des agents corrosifs, en modifiant la cinétique des réactions chimiques, ou en favorisant la formation d'une couche passive.

Il y a de nombreuses années, des inhibiteurs de corrosion efficaces, tels que les chromates et les phosphates synthétiques, étaient utilisés pour prévenir efficacement la corrosion de l'acier en milieux acides. Cependant, leur utilisation est actuellement presque abandonnée en raison de leur toxicité, de leur coût élevé et de leur impact négatif sur l'environnement, ils sont quelquefois connus sous le nom d'inhibiteurs gris. Beaucoup d'efforts ont été entrepris pour trouver des inhibiteurs de substitution plus respectueux des normes environnementales. De nombreuses tentatives ont été menées pour développer des inhibiteurs de corrosion verts, peu toxiques et très efficaces. A ce jour, plus de 4000 articles ont traité des extraits naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines), comme inhibiteurs de corrosion, des métaux et leurs alliages, dans différents milieux corrosifs. Très récemment de nombreuses alternatives écologiques inhibitrices de corrosion ont été développées, ceux-ci peuvent être des composés organiques, des acides aminés, des extraits de plantes ou des métaux des terres rares.

En général, certains inhibiteurs de corrosion verts peuvent afficher une efficacité de protection contre la corrosion allant jusqu'à 94 %, comparable à celle des inhibiteurs synthétiques courants. L'efficacité de protection contre la corrosion peut même être améliorée jusqu'à 99 % en extrayant le groupe fonctionnel de ces matériaux organiques verts.

L'inhibiteur de corrosion crée une couche protectrice sur la surface du métal, retardant les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal, dans le cas des inhibiteurs anodiques), soit les sites cathodiques (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide, dans le cas des inhibiteurs cathodiques). Les inhibiteurs mixtes agissent simultanément pour réduire la vitesse des réactions anodiques et cathodiques. Les couches passives sont des films extrêmement minces dont l'épaisseur est généralement de l'ordre de quelques nanomètres et

constitués d'oxydes et/ou d'hydroxydes métalliques. Leurs structures et leurs compositions sont souvent mal connues du fait de leur faible épaisseur qui rend difficile leur analyse.

Dans ce contexte s'inscrit cette étude bibliographique qui vise à assembler le maximum des travaux de recherches publiés dans cette filière et de sélectionner le plus efficace c'est-à-dire, celui qui minimise la vitesse de corrosion d'un métal sans altérer ses propriétés physico-chimiques, notamment sa résistance mécanique, être stable en présence d'autres constituants ou aux différentes températures utilisées, être efficace à faible concentration et dans les conditions d'utilisation, peu onéreux et il doit être aussi compatible avec les normes de non-toxicité et de protection de l'environnement.

Ce manuscrit se compose d'une introduction générale, de trois chapitres principaux et d'une conclusion générale : Le premier chapitre traite le matériau béton : constituants, types et caractéristiques. Le deuxième chapitre est consacré aux pathologies du béton et leurs influences sur la corrosion des armatures en acier doux à savoir la carbonatation, alcali-réaction, l'attaque des chlorures et des sulfates, suivi d'une revue bibliographique sur l'utilisation des extraits naturels de plantes pour prévenir la corrosion (chapitre trois) et clôturer d'une conclusion générale qui couronne l'étude menée dans ce travail de recherche.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE BETON

- ❖ Constituants du béton ; le ciment, les granulats, les adjuvants et l'eau de gâchage
- ❖ Types du béton et ses caractéristiques.

Chapitre 1 : Généralités sur le béton

1.1. Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Il est employé pour la réalisation des ouvrages de génie civil. Son exposition à des charges modérées, aux intempéries : à des températures élevées ou très basses engendre sa dégradation physico-chimiques ou mécaniques, il est donc indispensable de connaître le rôle de ces divers composants.

Dans ce chapitre, nous traitons le béton et ses composants (le ciment, les granulats, les adjuvants et l'eau de gâchage), les différents types du béton et ses caractéristiques.

1.2. Le béton

Le béton est un matériau hétérogène composé d'un mélange de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Il se caractérise 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. Le béton est constitué du [1]:

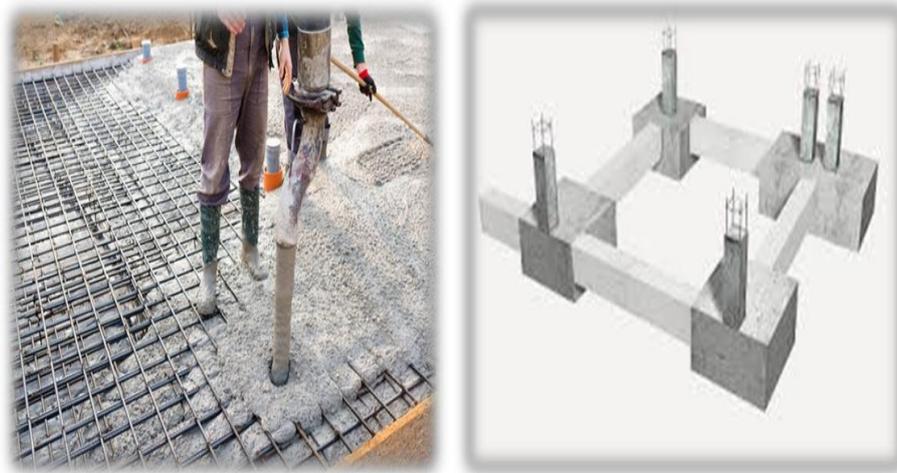


Figure 1.1: Le béton [2].

1.2.1. Le ciment

Selon La Rousse [Larousse, 2017], « un ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau, ou une solution saline, une pâte plastique liante, susceptible d'agglomérer, en durcissant, des substances variées »[3].

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que mélangé à l'eau, il forme une pâte qui fait prise et durcit (propriétés hydrauliques) à l'air comme sous l'eau. Il est utilisé sous forme de poudre pour confectionner du béton ou du mortier [4].



Figure 1.2: Le ciment [5].

1.2.1.1. Procèdes de fabrication du ciment

Le ciment est produit à partir de roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Ces dernières sont extraites de carrières situées généralement à proximité des cimenteries. Abattus à l'explosif, les rochers et blocs sont transportés vers des concasseurs afin de réduire leurs tailles et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Ces matières premières font l'objet d'une sélection rigoureuse. Leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées. Les minéraux concassés sont ensuite réduits en fines poudres dans la station de broyage pour être chimiquement plus réactives au cours de leurs cuissons dans le four. Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Ce dernier est rapidement refroidi. Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour refroidi rapidement et broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment et différents ajouts pour obtenir les différents types de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrage allant du plus courant au plus exigeant [6].

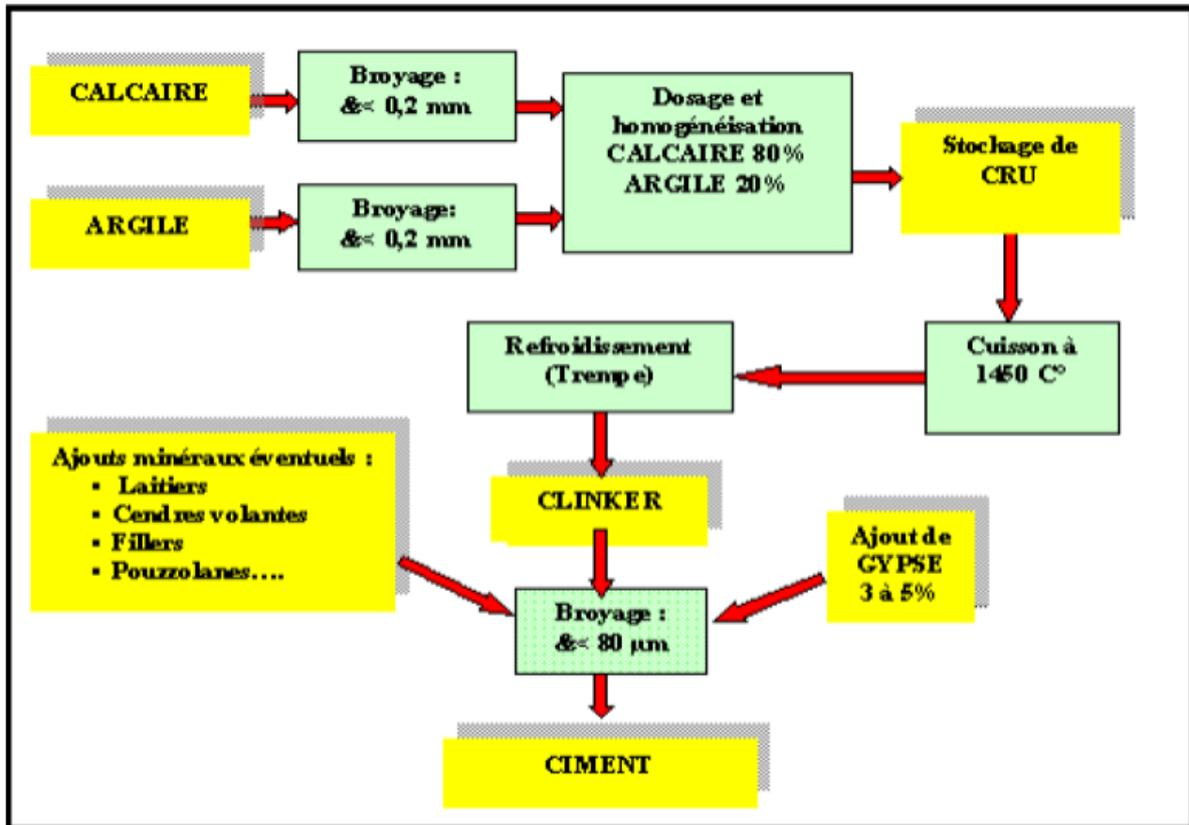


Figure 1.3: Procédé de fabrication du ciment [6].



Figure 1.4: Extraction la matière première [7].

1.2.1.2. Composants du ciment

Le ciment est composé de plusieurs constituants, les plus importants étant : [8]

a) Le clinker portland

Le clinker portland est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par calcination à environ 1450°C d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile [9].

Il se présente sous forme de nodules durs composés des silicate bicalcique C_2S , silicate tricalcique C_3S , L'aluminate tricalcique (C_3A) et Alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF). Le clinker formé doit répondre à certains critères de composition chimique qui sont reportés dans le tableau 1.1 et le tableau 1.2 [10].

Tableau 1.1: composition en oxyde du clinker [10].

Oxydes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃
Teneur limite (%)	60÷69	18÷24	4÷8	1÷8	< 5	< 2	< 3

L'association de ces oxydes dans le four donne la formation des quatre phases anhydres, phases présentées dans le tableau suivant [10]:

Tableau 1.2: phases anhydres du clinker [11].

Phases minéralogiques	Formule	Notation simplifiée	%
Silicate tricalcique	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	50 à 75
Silicate bicalcique	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	10 à 30
Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	2 à 15
Alumino-ferrite tétracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5 à 15



Figure 1.5: Le clinker [12].

b) Les additions minérales

Les additions sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substitués au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions peuvent être réactives ou inertes [13].

✓ Les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau (S) :

Le laitier vitrifié moulus de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est obtenu par trempe puis broyage du laitier (Les particules > 45µm ont de la difficulté à s'hydrater). C'est une addition à caractère hydraulique latent [13].

Tableau 1.3: composition chimique d'un laitier granulé [10].

Eléments	Pourcentage (%)
CaO	40 ÷ 50
SiO₂	26 ÷ 32
Al₂O₃	12 ÷ 20
MgO	2 ÷ 6

La composition du laitier granulé doit être constituée d'au moins deux tiers, en masse, de la somme (CaO, MgO, SiO₂) [10].

✓ **La fumée de silice (F)**

La fumée de silice provient de la réduction du quartz de grande pureté utilisés pour la production de silicium ou d'alliage de ferrosilicium par du charbon dans les fours à arc électrique [13] à la température de 2000°C [10].

Les fumées de silice utilisées dans l'industrie cimentière doivent satisfaire aux conditions suivantes [10] :

Tableau 1.4: Perte au feu et aire massique des fumées de silices [10].

Silice amorphe	SiO ₂ ≥ 85% en masse
Perte au feu	≤ 4% en masse
Aire massique (BET)	≥ 15m ² /g



Figure 1.6 : fumée de silice [14].

✓ **Les cendres volantes (C)**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles constituent un produit minéral pulvérulent, consécutif du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible en présence ou non de matériaux de co-combustibles, Ces cendres sont obtenues

par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières. En cimenterie, les cendres volantes sont utilisées pour la préparation de la matière première (le cru). Elles apportent essentiellement la silice, l'alumine et le fer. Elles peuvent être ajoutées lors du broyage final (avec le clinker, le gypse et les éventuels autres constituants secondaires). Leur passage dans le broyeur augmente le rendement de ce dernier (grâce aux imbrûlés) [15].

Du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent, selon la norme Américaine ASTM C-61894-a en deux classes, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO.

a- Classe F: Contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux,

b- Classe C: Contenant entre 15 et 35% de CaO produit de la combustion du lignite [10].

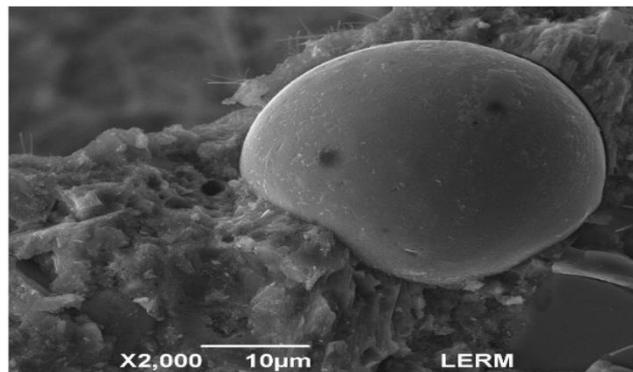


Figure 1.7 : Cendre volante [16].

✓ Le sulfate de calcium

Le gypse est une roche sédimentaire dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour régulariser la prise. Le sulfate de calcium peut se présenter sous forme de :

- Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou sulfate de calcium déshydraté.
- Héli hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).
- Anhydrite (CaSO_4) ou sulfate de calcium anhydre.
- Mélange de ces trois composants

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente. Il est composé de 92 à 94% de ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 2 à 3% de (CaCO_3), et 2 à 4% d'autres éléments tels que les (SiO_2 , MgO , R_2O) [11].



Figure 1.8 : Le sulfate de calcium [17].

✓ **Pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolanique [7].

Elle est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). La somme des trois oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit être supérieure à 70% selon la norme Américaine ASTM C-618 [10].

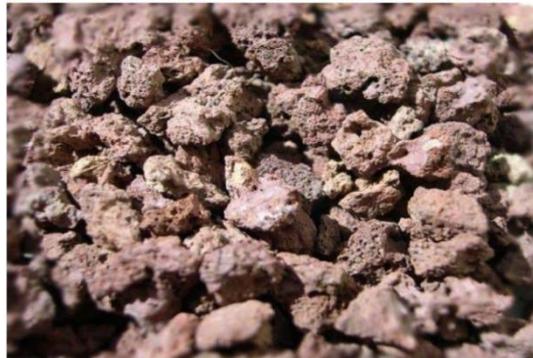


Figure 1.9: Grains de pouzzolane [7].

✓ **Pouzzolane artificielle**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composees de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries on distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées [7].

✓ **Fillers (F)**

Selon la norme NF EN 12620, les fillers sont des granulats de taille inférieure à 0,063mm. L'utilisation des fillers dans des dosages appropriés dans la formulation des bétons permet

d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durcis [18].

✓ **Les calcaires (L)**

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédent 5% en masse (constituant principal), le calcaire doit satisfaire aux exigences suivantes :

- teneur en calcaire: $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ en masse.
- teneur en argile: Adsorption de bleu de méthylène ≤ 1.20 g/100g.
- teneur en matières organiques: (TOC) $\leq 0.50\%$ en masse [19].

✓ **Schistes calcinés (T)**

Sont des schistes produits dans un four à 800°C, ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libre CaO, de sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantités plus importantes. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [19].

✓ **Constituants mineurs du ciment**

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont : MgO, Na₂O, K₂O et SO₃. L'oxyde de magnésium (MgO) provient de la dolomite, souvent présente avec le calcaire. Les oxydes alcalins K₂O et Na₂O proviennent en général, de l'argile et des feldspaths. L'anhydride sulfurique (SO₃) dans le clinker provient de la pyrite (FeS₂), du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz naturel [20].

1.2.1.3. Classification du ciment

✓ **En fonction de leur composition**

Les ciments constitués de clinker et d'ajouts cimentaires sont classés en fonction de leur composition, selon les normes Européenne ENV 197-1 et Algérienne NA 442, qui les divisent en cinq classes et notés « CEM » suivi d'un chiffre romain de 1 à 5 selon le tableau suivant [21] :

Tableau1.5 : Types de ciment et composition [22].

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	CS
						V	W			
portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
portland compose	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10-35		-	-	-	-	0-5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	0-5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0-5

✓ **En fonction de leur résistance normale**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous-classes «R» sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées, Ces classes sont notées classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.6 [22].

tableau1.6: Spécification mécaniques et physiques [22].

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours (µm/m)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	≥ 13,5	-					
42,5	≥ 12,5	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≤ 1000	≥ 60	
42,5R	≥ 20	-					
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

1.2.1.4. Hydratation du ciment portland

En présence d'eau, Les quatre phases majoritaires du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates (C_3A et C_4AF) et les silicates (C_3S et C_2S). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent. Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte [10].

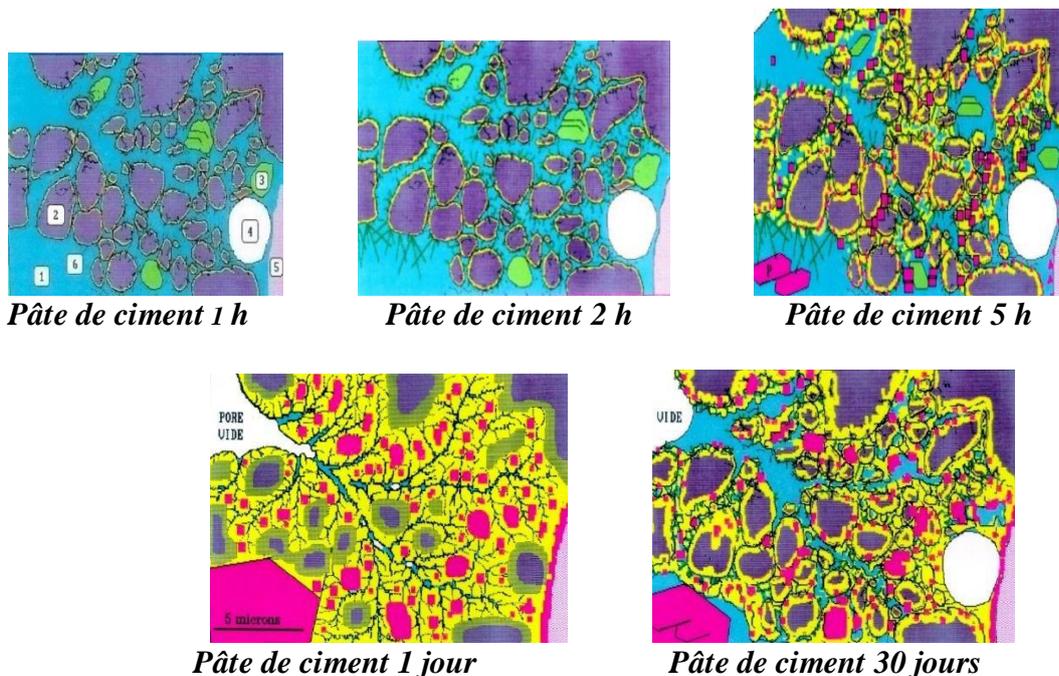
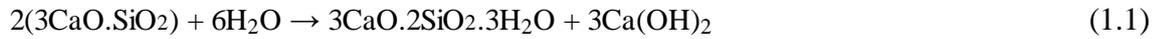


Figure 1.10 : Développement et hydratation d'une pâte de ciment [23].

1.2.1.4.1. Hydratation des silicates C₃S et C₂S

Lors de l'hydratation du ciment, la réaction chimique des deux silicates avec l'eau produit un gel de silice hydraté : l'hydroxyde de calcium C-S-H (Tobermorite) et portlandite Ca(OH)₂ notée (CH) selon les réactions suivantes [24] :



La majeure partie de l'hydratation du C₃S se passe dans les vingt-huit premiers jours suivant le contact avec l'eau. Elle participe à la prise initiale et contribue aux résistances initiale et finale de la pâte. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année voire plus.

L'hydratation du C₂S est beaucoup plus lente que celle du C₃S. Il participe aux résistances au-delà d'une semaine après le contact avec l'eau. La quantité de portlandite produite est plus faible d'un tiers que dans le cas du C₃S. La portlandite (figure 1.12) se cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales constituées d'un motif hexagonal en couche. Elle est précipitée à partir de la solution et représente 5 à 15% du ciment hydraté [25].

Le (C-S-H) est le composé majoritaire du ciment hydraté, il représente 50 à 70% de sa masse. Il est non stoechiométrique, mal cristallisé et de structure intermédiaire entre les cristaux et les gels (figure 1.11). Plus de trente phases cristallines de cet hydrate sont connues. Elles sont toutes nommées sous le terme générique de (C-S-H). Les tirets dans l'appellation traduisent un caractère non défini [25].

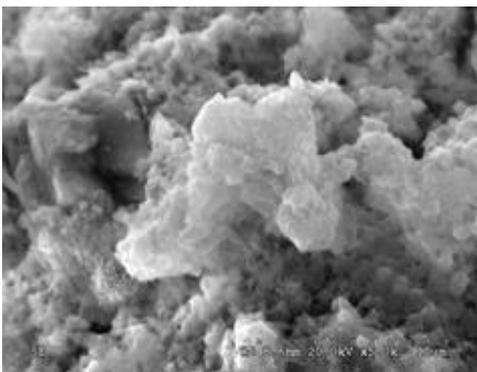


Figure 1.11: gel de C-S-H [25].

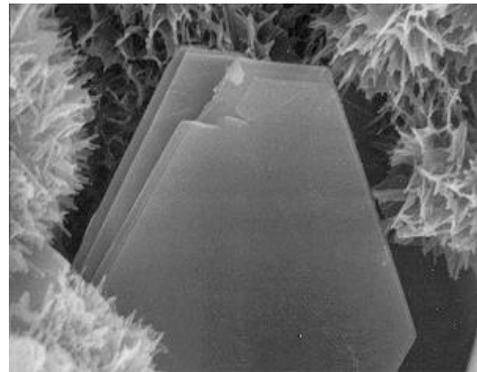


Figure 1.12: Ca(OH)₂ et CSH [23].

1.2.1.4.2. Hydratation de la phase aluminates

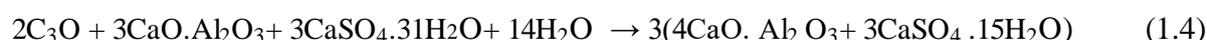
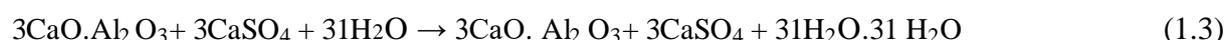
La phase aluminates composée de C₃A et C₄AF forme des hydrates, mais elle ne contribue que peu à la résistance de la pâte du ciment [11].

Le C_3A en présence du gypse se dissout les premiers lors de l'hydratation du ciment, hydratation conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) [10] (figure 1.13).

L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le C_3A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C_3A n'est pas complètement hydraté, l'ettringite se transforme en Monosulfoaluminate tétracalcique hydratés [26] (figure 1.14).

Qui se cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. L'ettringite et les Monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté.

Les réactions d'hydratation sont comme suit :



La phase ferrique C_4AF adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C_3A , les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau et du gypse. L'hydratation de C_4AF est plus efficacement retardée que celle du C_3A [26].

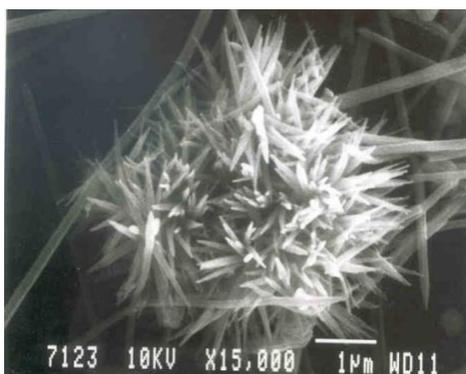


Figure 1.13 : Aiguilles d'ettringite [21]. **Figure 1.14:** monosulfoaluminate hydraté [10].

1.2.1.5. L'évolution des propriétés mécaniques du ciment portland

L'hydratation du ciment portland s'accompagne de la modification des propriétés mécaniques de la pâte. Les propriétés des liants hydrauliques résultent de la superposition de trois types de phénomènes ; un phénomène chimique (l'hydratation), un phénomène physique (la précipitation des solides) et un phénomène mécanique (la prise et le durcissement) [27].

1.2.1.5.1. Critères de choix du ciment

Les critères de choix peuvent être résumés en trois classes :

✓ Critère I : Choix de la classe de résistance du ciment :

En fonction de la résistance du béton à 28 jours, la relation de Bolomey permet de déterminer la résistance normale du ciment en fonction de la résistance de béton souhaitée.

$$R_{c28} = G \cdot R_{nc} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (1.5)$$

avec :

- R_{c28} : résistance souhaitée du béton à 28 jours (MPa)
- G : coefficient granulaire fonction de la nature du granulat et du D_{max} ($0,45 < G < 0,65$)
- R_{nc} : classe vraie (résistance nominale) du ciment à 28 jours exprimée en MPa
- C : dosage en liant équivalent (kg/m^3)
- E : quantité d'eau de gâchage exprimée en litres [20].

✓ Critère II : Impératifs de mise en œuvre :

- Un décoffrage rapide, une mise en précontrainte précoce orientent vers des ciments dont la classe de résistance au jeune âge est élevée. Mais une résistance qui augmente vite suppose des réactions d'hydratations rapides qui, parce qu'elles sont exothermiques, peuvent provoquer un échauffement notable des pièces en béton.
- Pour un bétonnage par temps froid, le béton reste plus longtemps mou et déformable, et le Développement des résistances est retardé, on cherchera à bénéficier de ce dégagement de chaleur en choisissant des ciments de classe. On raisonnera à l'inverse pour le bétonnage par temps chaud [20].

✓ Critère III : Environnement de l'ouvrage :

Le béton doit dans sa formulation et ses caractéristiques, être adapté à l'environnement.

La norme française NF18-011 classe l'environnement en 5 classes qui sont illustrées dans le tableau 1.7.

les recommandations pour le choix du liant sont les suivantes :

- Pour les classes 1, 2, tous les types de ciments conviennent.
- Pour la classe 3, tous les ciments conviennent, à moins qu'il y ait un risque de mise en contact avec des sels fondants contenant des sulfates. Dans ce cas, certains maîtres d'œuvre demandent un ciment à caractéristiques complémentaires.
- Pour la classe 4, il faut choisir un ciment à caractéristique «prise mer ».
- Pour l'environnement 5, cela dépend de l'agent agressif : Si ce sont les ions sulfate, il faut choisir un ciment de caractéristique complémentaire ; s'il s'agit d'eau douce ou acide, il faut choisir parmi les ciments courants, les (CHF-CEMIII/B) , les (CLK-CEMIII/C) et les (CLC-CEMV/A et B), soit parmi les autres, le ciment alumineux fondu et le ciment prompt naturel [20] .

Tableau 1.7 : Classes d'environnement selon la norme française NF18-011 [28].

Classe1	Les environnements secs
Classe2	Les environnements humides sans gel ou avec un gel faible ; Les environnements humides avec gel modéré ; Les environnements humides avec un gel sévère
Classe3	Les environnements humides avec gel modéré ou sévère et produits dégivrant.
Classe4	Les environnements marins immergés (sans gel ou avec un gel faible) ; Les environnements marins avec gel modéré ou sévère.
Classe5	Les environnements faiblement agressifs chimiquement ; Les environnements moyennement agressifs chimiquement ; Les environnements fortement agressifs chimiquement ;

1.2.2. Les granulats

Les granulats sont constitués d'un ensemble de grains minéraux de différentes dimensions (inférieurs ou égales à 125 mm) [29].

Les granulats sont des matériaux inertes qui, aggloméré par un liant, constituent le squelette du béton [30].

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme NA452 sont les suivantes [28]:

fillers 0/D où $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063mm ;

sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ avec moins de 70% de passant à 0,063mm ;

sables 0/D ou $1 < D \leq 6,3\text{mm}$;

graves 0/D où $D > 6,3\text{mm}$;

gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$;

ballasts d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$.

Généralement, les granulats (sable et graviers) occupent environ les trois quarts du volume totale du béton. Pour cela, il n'est pas étonnant que leurs propriétés affectent les performances du béton: ouvrabilité, résistance, durabilité,...etc [30].

1.2.2.1. Les différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée:

a) Les granulats naturels :

Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites

Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles : les roches calcaires, les Roches siliceuses et les silico-calcaires [2].



Figure 1.15: Photos des différents types de granulat [2].

- Les Granulats alluvionnaires:

Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière (et en mer éventuellement). Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, et criblés pour obtenir différentes classes de granulats [31].

- Les Granulats de carrières:

Les granulats sont obtenus par abatage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage...

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [32].

b) Les granulats artificiels :

Les granulats d'origine artificielle sont des matériaux expansés par action thermique d'argiles, schistes, laitiers, cendres volantes et verres. Leur forte porosité entraîne souvent une absorption d'eau (10 à 15 %) dont il faut toujours tenir compte pour cet usage.

Ces granulats ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants.

Les plus usuels sont le laitier, l'argile ou le schiste expansé, leurs masses volumiques varient entre 400 et 800 kg/ m³ selon le type et la granularité. Ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique [33].

c) Les granulats recyclés

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé.

Divers types de granulats artificiels ou recyclés s'avèrent en outre potentiellement utilisables, plus particulièrement en technique routière, sous réserve de résultats d'études préalables probants. La politique actuellement menée en matière d'environnement tend à favoriser le développement de leur emploi, dans le respect des règles environnementales et techniques visant à minimiser les risques de pollutions et de désordres [33].

1.2.2.2. Caractéristiques des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication. Le prélèvement d'un échantillon pour la caractérisation doit se faire conformément aux normes NF P 18-553 et EN 932-1 [34].

a) Caractéristiques physiques

On peut les classer en deux groupes, celles qui concernent le granulat lui-même, et celles qui concernent la teneur en substances étrangères et nocives.

- **Les masses volumiques** : Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [35].

- **La Masse Volumique Apparente (en vrac)** : C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores intergranulaires [32].

- **La Masse Volumique Absolue** : C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores) [32].

- **La porosité (p):** C'est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de granulats. La mesure de la porosité se fait selon les normes NF P18 554, EN 1097-3. [36].

La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [32].

•**Teneur en eau (W %):**La teneur en eau est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon [37].

•**Taux d'absorption d'eau (AB %):** L'absorption d'eau par définition est le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse. Les granulats sont plus ou moins dangereux selon leur degré de saturation en eau au moment où intervient le gel [32].

1.2.2.3. Les granulats courant pour béton

a) **Sable :** les sables sont les matériaux granulaires inertes résultent soit :

- de la désagrégation naturelle de roches généralement siliceuses; ce sont les sables ronds.
- soit du concassage de roches ou de gravier ce sont les sables de concassage.
- soit du mélange de sables ronds et de concassage ce sont les sables mixtes.

Les sables artificiels sont des sables provenant du recyclage de résidus industriels ou de matériaux de construction [30].

Dans le béton le sable occupe presque $\frac{1}{4}$ de son volume par conséquent la qualité du sable influant considérablement sur la qualité du béton [38].

1) Classification des sables

✓ Suivant leurs grosseurs, les sables sont classés en trois types :

- a) sable fin : 0,08 à 0,315 mm
- b) sable moyen : 0,315 à 2,00 mm
- c) sable gros : 2,00 à 5,00 mm

✓ suivant leur provenance:

- sable de rivière: absence de grains fins.
- sable de dunes: uniformité et prédominance de grains fins.
- sable de plaines ou d'alluvions: absence de gros grains.
- sable résidus de concassage: prédominance de gros grains et présence de fines ou fillers.
- sable de mer [38].

2) Caractéristiques des sables destinés à la fabrication du béton

Les propriétés du sable destiné à la fabrication du béton sont évaluées selon plusieurs méthodes, dont l'essai de l'équivalent de sable (Es). L'utilisation d'un sable impur peut réduire la résistance du béton et accentuer son retrait.

La dureté des grains joue un rôle déterminant dans la qualité du béton. Les sables siliceux sont les plus appropriés, tandis que les sables calcaires, souvent trop tendres, ne garantissent pas une résistance suffisante.

De plus, le sable peut contenir une quantité importante d'eau, pouvant dépasser 200 litres par mètre cube. Il est donc essentiel d'en tenir compte lors du dosage en eau, soit en ajustant la quantité d'eau ajoutée, soit en procédant à un séchage préalable, par étuvage ou naturellement [38].

b) Gravier

Notons que le gravier peut provenir de roches variées: le calcaire, le granite, le basalte, le grès, les diorites, le quartz ou encore le silex. Aussi, le gravier offre un large choix de couleurs noir, blanc, rose, beige, vert, gris ou encore, bleu. Cette couleur est mise en avant dans le béton décoratif, et tout particulièrement le béton désactivé ou encore le béton coloré. Le gravier se caractérise par: sa couleur, sa forme, sa texture et son calibre [30].

1) Propriétés mécaniques du gravier

La première propriété mécanique des granulats est la dureté qui est définie comme étant la résistance d'un échantillon de roche à se briser sous un choc. On distingue :

- **L'essai Micro Deval (NA 457):** L'essai se pratique sur des gravillons 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/14. 500 grammes de gravillon sont placés avec une charge de 2 à 5kg de billes d'acier de 10mm de diamètre dans une jarre cylindrique remplie d'eau. On fait tourner 15 minutes et on récupère le passant au tamis de 2mm. Le coefficient micro Deval est défini par :

$$\text{MDE} = 100(500/P) \quad (1.6)$$

P : le passant au tamis de 2mm.

Le coefficient micro Deval est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon [28].

- **Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation):** Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat [35]. Il se pratique sur les classes granulaires [(4/ 6.3); (6.3/10); (10/14)] Le tambour de la machine (figure 1.17) est entraîné

en rotation, à une vitesse entre 31 et 33 tr/min, par un moteur électrique e. La machine est équipée d'un compteur de tours permettant l'arrêt automatique du moteur une fois le nombre de tours requis (500 tours pour les granulats) effectué La charge est constituée de 7 à 11 boulets en acier de 417grammes. Les modèles récents sont équipés d'une cabine de protection et d'isolation [20].



Figure 1.16. Appareil micro-Deval [20].

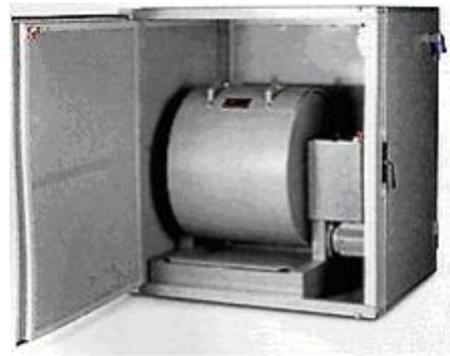


Figure 1.17 : Photo du Los Angeles [20].

Pour un granulat donné, cette résistance est mesurée par le coefficient Los Angeles (LA), rapport de la masse des fragments passant au tamis de 1,6 mm mesurée en fin d'essai à la masse de l'échantillon.

$$LA = 100 \left(\frac{\text{passant de tamis de 1.6mm}}{\text{masse de l'échantillon}} \right) \quad (1.7)$$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. La norme limite ce coefficient à 40% (cette valeur est réduite à 25% dans certains cas particuliers) [20].

1.2.3. L'eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue En réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau [36].

Pour accorder à la confection de béton ou mortier, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures. En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient

défavorablement le durcissement (matières organiques telles que huiles, graisses, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...) [30].

L'eau de mer, même si elle est agressive vis-à-vis du ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication d'un béton non armé [20].

L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir. On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnantes odoriférantes. Le rapport E/C de résistance finale d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation) [30].

Pour hydrater 100 kg de ciment, seulement 25 L d'eau sont nécessaires. Ajoutée sans maîtrise et en excès dans le béton, elle provoque les phénomènes suivants [49] :

- Des déformations : Retrait, gonflement.
- Elle favorise les réactions électrochimiques (carbonatation, corrosion, alcali réaction).
- Elle rend le béton sensible au gel : expansion lorsque transformation en glace.
- Création de réseaux capillaires augmentation de la porosité, baisse de la compacité et ségrégation.
- Augmentation de la perméabilité (plus grande pénétration des agents extérieurs [20]).

1.2.3.1. Exigences requises pour les eaux de gâchage : NF EN 1008

- Eau potable : aucun essai
- Eaux usées : non
- Eau récupérée de la fabrication des bétons
- Eaux d'origine souterraine
- Eaux naturelles de surface ou de rejets industrielles
- Eau de mer : peut être utilisée pour la production de béton non armé mais pas pour le béton armé (BA) ou le béton précontraint (BP) [20].

1.2.3.2. La norme préconise 3 types d'exigences :

- Exigences sensoriels :
 - traces visibles d'huile, de mousse, (les organiques en général réduisent la résistance des bétons).
 - matières en suspension importantes,
 - couleur,
 - odeur.
- Exigences chimiques :
 - Teneurs limitées pour certains éléments indésirables :

- les chlorures (incompatibles avec la confection de BA car amorce la corrosion des armatures),
- les sulfates (risque de formation d'ettringite secondaire gonflante),
- les alcalins (risques d'alcali-réaction)
- les sels de plomb et de zinc,
- les phosphates et les nitrates.

➤ Exigences mécaniques :

- Temps de début de prise : ne doit pas être < de 1h et ne doit pas s'écarter de + de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Temps de fin de prise : ne doit pas être > de 12h et ne doit pas s'écarter de + de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Résistance en compression à 7j (béton ou mortier): doit atteindre au moins 90% des résistances obtenues avec de l'eau distillée [20].



Figure 1.18 : Eau de gâchage [40].

1.2.4. Adjuvants

Les adjuvants se présentent sous forme de liquide ou de poudre. Ils sont incorporés en faible quantité (moins de 10 kg/m^3) afin d'ajuster les propriétés des matériaux cimentaires, Les adjuvants peuvent modifier les propriétés du béton à l'état frais et l'état durci [8].

1.2.4.1. Classification des adjuvants: La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- **ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton:** plastifiants-réducteurs d'eau, super-plastifiants (Anciennement fluidifiants),

- **ceux qui modifient la prise et le durcissement** : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise,
- **ceux qui modifient certaines propriétés particulières** : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse [33].

a) Adjuvants modifient l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité. Ils augmentent la maniabilité tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage, ce qui facilite la mise en place des bétons. Ils permettent d'augmenter la compacité du mélange, ce qui se traduit par une amélioration des résistances [41].

✓ **Les plastifiants-réducteurs d'eau :**

Adjuvant qui sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui; sans modifier la teneur en eau du béton, en augmentent l'affaissement l'étalement, ou qui produisent les deux effets à la fois[42].

✓ **Les super plastifiants :**

Des adjuvants les plus importants pour le béton moderne. Les réducteurs d'eau à haute efficacité se présentant sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules de masse élevée. Leur capacité d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton et de lui conférer un meilleur comportement mécanique en diminuant le rapport E/C. Ils permettent, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante [43].

✓ **Mode d'action des super plastifiants:** Lors du gâchage du béton, sous l'effet des forces attractives de l'eau, les particules de ciment forment des agglomérats piégeant une bonne partie d'eau libre à l'intérieur « floculation ». L'eau disponible pour fluidifier le béton est ainsi limitée, et le béton présente une certaine fermeté. Le plastifiant (superplastifiant) s'adsorbe à la surface des particules de ciment. Une fois adsorbé, il agit par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres (Figure 1.19). L'eau initialement piégée entre les floculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [44].

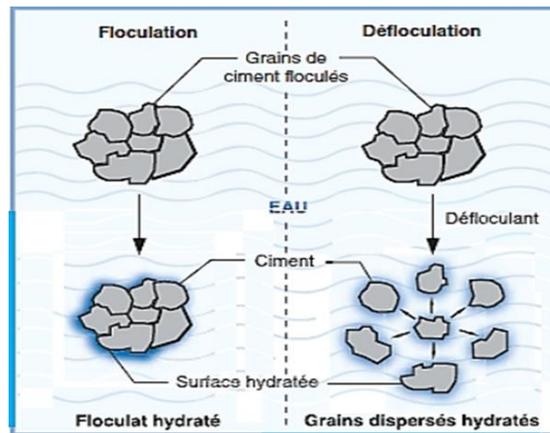


Figure 1.19: Défloculation du ciment par l'action dispersante des super plastifiants [44].

Ce processus permet:

- ❖ D'améliorer la maniabilité sans augmenter le dosage en eau : dans ce cas la quantité d'eau de la formule initiale de béton n'est pas modifiée, mais son ouvrabilité évolue avec le changement du pourcentage en superplastifiant ; quant à la résistance mécanique, elle reste quasi constante ; cette catégorie d'adjuvants regroupe les fluidifiants appelés aussi plastifiants, les superfluidifiants appelés superplastifiants.
- ❖ D'améliorer les performances mécaniques du béton; de réduire le rapport E/C, dans Ce cas la quantité d'eau du béton est réduite pour une même maniabilité, et la résistance mécanique augmente. Ce sont les réducteurs d'eau.

En réalité, un fluidifiant est aussi un réducteur d'eau ; cela dépend de l'objectif visé dans son utilisation [44].

Tableau 1.8: Effets des plastifiants sur le béton frais et durci.

Adjuvantes	Effets sur le béton frais	Effets sur le béton durci
Plastifiants- réducteurs d'eau	-Diminution de la ségrégation, -Amélioration de la pompabilité des bétons, -Réduction du retrait hydraulique [42]. -Amélioration de la maniabilité et maintien de l'ouvrabilité sans modifier la teneur en eau, -Facilité de mise en œuvre des bétons, -Réduction de la teneur en eau sans modifier la consistance [41].	-Amélioration des performances mécaniques à court et à long terme, -Diminution de la porosité, -Augmentation de la durabilité, -Amélioration de la cohésion ciment/granulats, -Amélioration de l'adhérence acier/béton [42].
Superplastifiants	-Diminution de la teneur eau sans modifier la consistance, -Amélioration de la consistance et de la maniabilité sans modifier la teneur en eau, -Maintien de l'ouvrabilité dans le temps (jusqu'à 2h30-3h00 à 20°C), -Diminution de la contrainte, -Diminution de la ségrégation, -Amélioration de la pompabilité des bétons [41].	-Amélioration des résistances mécaniques à court et à long terme, -Diminution du retrait (due à la réduction du rapport E/C et à l'augmentation du rapport granulats/liant), - Amélioration de la liaison béton/armatures, -Amélioration de la compacité -Diminution du coefficient de perméabilité, -Accroissement de la durabilité, -Diminution du fluage, -Réduction du retrait hydraulique [41].

b) Les Adjuvants modifient la prise et le durcissement

✓ **Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il diminue le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton.

L'accélérateur de durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons. Les constituants de ces adjuvants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque.

Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc [44].

✓ **Les retardateurs de prise**

Les retardateurs peuvent agir en diminuant la vitesse d'hydratation de certains constituants anhydrides des ciments.

Les retardateurs sont utilisés :

- Par temps chaud ;
- En cas de transport du béton sur de longues distances ;

-En cas de bétonnage partiel (reprise de bétonnage) [45].

c) Les Adjuvants modifient certaines propriétés particulières

✓ **Hydrofuges de masse** : Ils permettent d'imperméabiliser le béton en arrêtant l'absorption capillaire, Ils sont plutôt à utiliser dans les enduits de revêtement plutôt que dans la totalité du béton. Ils sont de deux sortes : l'hydrofuge de masse qui est incorporé au mélange lors du malaxage du béton ou l'hydrofuge de surface qui est appliqué sur le béton durci, Dans ce dernier cas, l'hydrofuge n'est plus vraiment un adjuvant.

Certains hydrofuges peuvent provoquer une baisse sensible de la résistance du béton, ou une augmentation de retrait [46].

✓ **Entraîneurs d'air** : Ce sont des produits tensioactifs, ils facilitent la formation de microscopiques bulles d'air dans la masse du béton frais. Ces bulles tout le diamètre $< 100 \mu\text{m}$, jouent le rôle de billes très fines et rendent ainsi le béton plus maniable, ce qui permet de réduire la quantité d'eau de gâchage en même temps qu'elles s'intercalent dans les réseaux capillaires en créant des tensions qui augmentent la cohésion du béton frais, diminuant ainsi le risque de ségrégation au cours de transport et une meilleure cohésion du béton (coffrage en pente, décoffrage rapide). Ils lui permettent de mieux résister au gel et surtout aux cycles gel/dégel [47] création d'un réseau de bulle de petite dimension et bien répartie, la figure 1.6 explique le mécanisme du travail. Ce type d'adjuvant a un double rôle qui s'agit de fractionner les grosses bulles en d'autres de faibles dimensions d'une part et d'autre part de maintenir le pourcentage d'air de l'ordre 3 à 8 % du volume de béton[48].

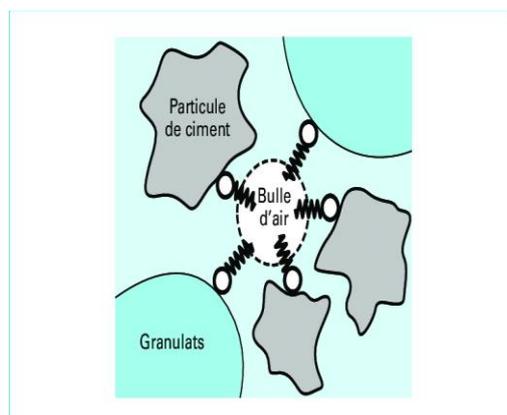


Figure 1.20 : Mécanisme d'un entraîneur d'air dans le béton [47].

Les entraîneurs d'air sont en général à base de résines ou d'huiles et se présentent sous forme de poudre ou de solutions à mélanger à l'eau de gâchage. Le dosage à employer est faible et se situe entre 0,1 et 0,5% du poids du ciment [46].

✓ **Inhibiteurs de corrosion** : Ce sont des composés qui ralentissent le processus d'oxydation d'un métal ferreux. Il stoppe ainsi le développement de la rouille dans un environnement corrosif. Cette notion désigne généralement un produit liquide ou visqueux. On l'appelle encore additif, agent, neutralisant ou catalyseur de la rouille.

Cet additif préserve une structure, un ouvrage, une charpente ou une surface de l'oxydation. Il peut également protéger un contenant, une pièce ou un objet face à la corrosion. La rouille provient souvent de l'humidité, des pluies ou des intempéries. Elle peut aussi être due à un contact avec un liquide, un produit visqueux ou granulaire.

Un inhibiteur de corrosion agit le plus souvent sur la surface métallique elle-même. Il neutralise le matériau en le privant de l'humidité et de l'oxygène de l'air. Pour plus d'efficacité, on emploie une peinture ou un vernis par exemple. On a alors incorporé un additif de neutralisation de la rouille dans la formulation auparavant. Cet additif anti-rouille empêche aux éléments extérieurs de détruire le métal. Cependant, il n'altère pas les caractéristiques structurelles d'un matériau. Ce neutralisant demeure efficace même en basse concentration. En effet, il s'ajoute toujours à très faible dose dans le produit. Il est facilement miscible à une peinture, un vernis ou un autre liquide. Il reste également parfaitement stable face aux différents agents atmosphériques [48].



Figure 1.21: Inhibiteur de corrosion (Application externe).

Tableau 1.9: Synoptique des principaux adjuvants [42].

Adjuvants	Utilisation
Accélérateur	Décoffrage rapide ; Temps froid ; Préfabrication ; Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer ; Réparations rapides, pistes d'aérodromes, routes, scellements
Retardateur	Temps chaud ; Injection à grande profondeur ; Voile d'étanchéité ; Transport de béton sur grande distance ; Reprise de bétonnage – confection de béton avec granulats apparents ; Parois moulées dans le sol. Plastifiant
Plastifiant	Transports pneumatique du béton ; Béton coule sous l'eau, Béton maigre ; Sables manquant de fines ; Béton très ferraille ; Injection
Antigel	Bétonnage jusqu' a (10°C) sous réserve de précautions particulières
Hydrofuge	Mortiers d'enduit, Enduit et chapes d'étanchéité pour cuvelage – citernes – réservoirs – piscines – Galeries – tunnels – travaux souterrains et maritimes. Toitures, terrasses.
Fluidifiant	Nécessite d'une bonne ouvrabilité ; Préfabrication ; Bétons à haute résistance.

1.2.5. Propriétés essentielles d'un béton

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci [49].

1.2.5.1. Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage.

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.

- la granulométrie.
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité [50].

a) Test au cône d'Abrams :

Ce test consiste simplement à déposer dans un cône en métal de dimension (10 x 20 x 30) cm³ le béton frais puis de le renverser pour démouler le béton et ainsi mesurer l'affaissement du béton. L'affaissement du béton donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 3 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche [51].

Tableau 1.10: Classe de consistance [52].

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très plastique TP	10 à 15	3
Fluide FL	>16	

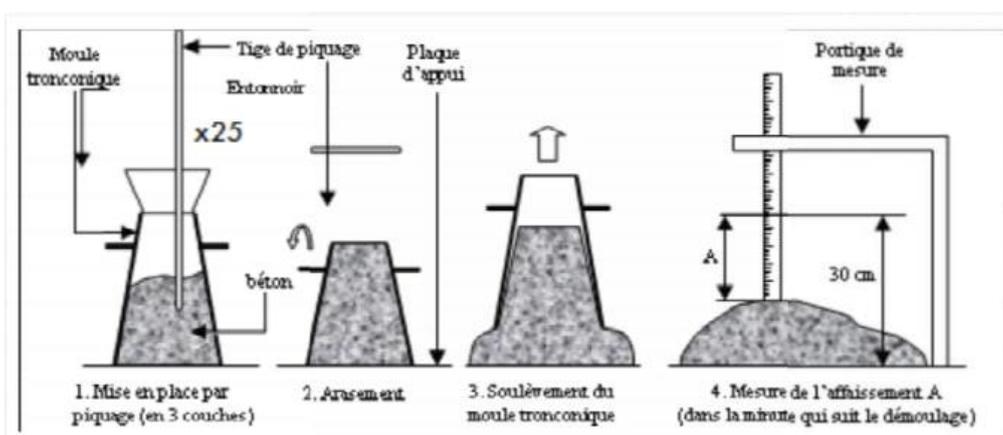


Figure 1.22 : Essai d'ouvrabilité du béton [53].

b) Essai au maniabilimètre LCPL

Il s'agit d'une méthode de remoulage utilisant le maniabilimètre Les âge mis au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Son principe est très simple et veut simuler l'écoulement du béton dans coffrage sous l'effet de vibrations. Cette aptitude à l'écoulement est repérée par le temps que met le béton pour atteindre un certain niveau.

L'appareil est constitué d'un moule en forme de parallélépipède, ouvert sur sa face supérieure, et portant un vibreur sur son petit côté.

Ce moule repose sur 4 amortisseurs. Son poids, vibreur compris, est d'environ 117kg. Le moule reçoit une paroi inclinée et amovible [20].



Figure 1.23 : Photo d'un maniabilimètre LCPL [20].

1.2.5.2. Propriétés du béton durci

Le béton durci se caractérise essentiellement par sa résistance mécanique. Propriété est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

a) La résistance à la compression à l'âge de 28 jours

Le béton est un matériau qui résiste bien à la compression. Elle est mesurée par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm. Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs et les vibrations pendant un minimum de 16 heures et un maximum de 3 jours, Après démoulage, les éprouvettes doivent généralement être entreposées dans l'eau jusqu'au le moment de l'essai à une température de 20°C et une hygrométrie relative $\geq 95\%$. L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [NF EN 12390-3/4] [52].

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 :

$$F_C = F/A_C \quad (1.8)$$

Où :

- 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 est exprimée en MPa (N/mm^2) [35].



Figure 1.24: Machine de l'essai la compression [52].

b) Résistance à la traction

- **Traction directe** : C'est un essai très délicat à réaliser car il consiste en la mise en traction du cylindre en béton après collage des têtes de traction sur les deux faces. La difficulté rencontrée est le centrage de ces têtes. L'opération doit être réalisée sans efforts de flexion [54].

- **Traction par fendage** : (essai brésilien) L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. Si « p » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre, « D » le diamètre nominal de l'éprouvette et « L » la longueur du cylindre, la résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante [52] :

$$R_{ft} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1.9)$$



Figure 1.25: Traction directe [52].

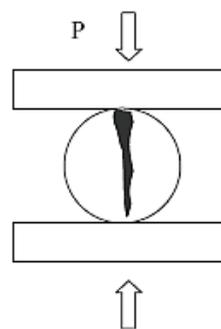


Figure 1.26: Traction par fendage [52].

- Traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm³ 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 NF P 18-407 (NA 428), 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 :

$$M = P \times a / 2 \quad (1.10)$$

La contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est :

$$F_{tj} = 6M / a^3 \quad (1.11)$$

La relation suivante permet de calculer la résistance [50] :

$$F_{tj} = 1.8 P / a^2 \quad (1.12)$$

c) La porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité (rapport du volume des vides au volume total). Les études de Féret (début du XXe siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton [55].

d) Retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement. C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. En fonction des conditions climatiques, les valeurs moyennes de retrait en mm/m sont [55]:

- 1,5 x 10 dans mes climats très humides,
- 2 x 10 en climat humide.
- 3 x 10 en climat tempéré sec,
- 4 x 10 en climat chaud et sec
- 5 x 10 en climat très sec ou désertique.

Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une

époque où le béton très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurerait facilement sous l'effet du retrait.

1.2.6. Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du béton

1.2.6.1. Les avantages du béton

- Se moule, épouse toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.
- Peu coûteux, facile à fabriquer, peu d'entretien.
- Devient solide comme de la pierre.
- Résiste bien au feu et aux actions mécaniques habituelles.
- Associé à l'acier, il offre des possibilités de constructions très vastes [56].

1.2.6.2. Les inconvénients du béton

- Faible résistance à la traction.
- Faible isolation thermique.
- Coffrages nécessaires pour sa mise en œuvre.
- Sa destruction entraîne un coût élevé (en cas de démolition) et n'est pas ou peu recyclable [56].

1.2.7. Différents types de bétons

1.2.7.1. Béton ordinaire

Le béton est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2 500 Kg/m³, Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints [57].



Figure 1.27: Béton ordinaire.

1.2.7.2. Béton armé

Le béton armé est l'assemblage judicieux et intime d'armatures métalliques, habituellement en acier doux, et de béton (figure 1.28) afin de compenser la mauvaise tenue de ce dernier à la

traction. Cet assemblage est rendu possible grâce au coefficient de dilatation thermique identique de ces différents matériaux. Le béton fournit aux barres d'acier une protection à la fois physique et chimique. La protection physique est assurée par la densité et la relative imperméabilité de sa structure. La protection chimique, quant à elle, provient de l'alcalinité très élevée ($\text{pH} > 12,5$) de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton [8].



Figure 1.28: Béton armé.

1.2.7.3. Béton fibré

Le béton fibré a le même objectif que le béton armé : renforcer la solidité générale de la fondation réalisée. La fibre a le même principe actif que l'armature utilisée sur le béton armé elle limite les risques de fissuration du béton et améliore sa résistance sur le long terme.

L'avantage de la fibre, c'est également sa grande facilité de mise en œuvre sur chantier, assurant un gain de temps certain lors du coulage [2].

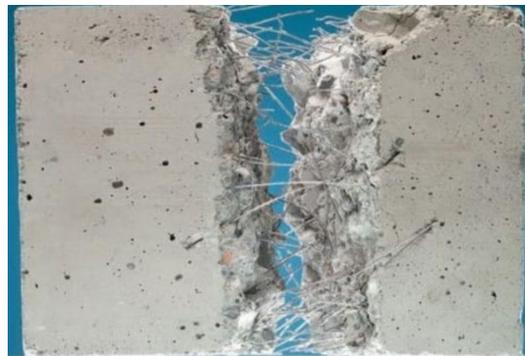


Figure 1.29: Béton fibré [58].

1.2.7.4. Béton lourd

Le béton lourd dispose de granulats très lourds, ce qui permet de répondre à des besoins très précis tels que les ouvrages des centrales nucléaires. L'emploi de ce béton permet de ne laisser passer aucune trace de radiation et de répondre à des normes très strictes de sécurité [2].

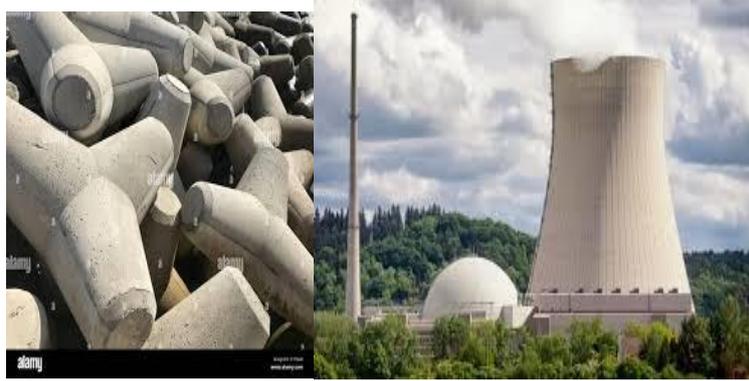


Figure 1.30: Béton lourd.

1.2.7.5. Béton léger

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m^3 , tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m^3 [59].



Figure 1.31: Béton léger [60].

1.2.7.6. Béton prêt à l'emploi

Les bétons prêts à l'emploi sont des bétons directement conçus par les industriels dans leurs centrales à béton. Il est ensuite transporté à l'aide d'un camion toupie et directement transféré sur les chantiers clients. Une fois sur place, le béton prêt à l'emploi est appliqué par le camion toupie, soit par la pompe à béton, soit par la goulotte [2].

1.2.7.7. 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 [1].



Figure 1.32: Béton de haute performance.

1.2.7.8. Le Béton auto plaçant (BAP)

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

Le béton auto plaçant(BAP) 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, se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes [61].

Une fois le béton solidifié, sa qualité reste la même que sur un béton traditionnel [2].



Figure 1.33: Béton auto plaçant [62].

1.2.7.9. Béton préfabriqué

La technique du béton préfabriqué ou du béton manufacturé permet d'accélérer la vitesse de construction. Elle consiste à mouler et préparer des pièces de béton en atelier ou à proximité du chantier et à les acheminer ensuite sur le chantier.

Les bétons préfabriqués peuvent être standards ou sur-mesure. Conception et fabrication peuvent concerner des éléments d'un futur bâtiment ou le bâtiment dans son ensemble. On trouve ainsi des dalles, des parpaings, des blocs de coffrages et des escaliers ou balustrades en béton préfabriqué. Cette technique consiste ensuite à assembler sur le chantier les éléments préconstruits. Le béton préfabriqué peut donner lieu à de multiples variations. Matériau de construction composite, ses qualités techniques diffèrent selon les dosages. Il est aussi un matériau d'expression architecturale, car on peut jouer sur son relief, sa teinte, son état de surface et sa texture [2].



Figure 1.34: Béton préfabriqué [2].

1.2.7.10. Le béton précontraint

Consiste à mettre en tension des câbles en acier avant la prise, ce qui va comprimer le béton une fois solidifié [51].



Figure 1.35: Béton précontraint.

1.2.7.11. Béton projeté

Propulsé à grande vitesse sur une surface sans coffrage, ce béton est surtout utilisé pour les parois, les barrages et les tunnels de mine [63].



Figure 1.36: Béton projeté [63].

1.2.8. Conclusion

Le béton est un matériau constitué de plusieurs matières, son comportement dépend des caractéristiques de chaque constituant. Les types aussi du béton sont issus des modifications des quantités et des propriétés de ses constituants.

Références Bibliographiques du Chapitre 1

- [1] Graine Ikram, Nour El Houda, Soucha Nesrine, « Etude bibliographique sur la durabilité des bétons dans les stations d'épurations », Mémoire de master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2020.
- [2] Bouaicha Nour El Islame, « Recyclage des déchets de construction et de démolition pour la production du béton préfabriqué », mémoire de master, Université Mohamed khider – Biskra, 2022.
- [3] Meziani S, Yousfi N, « l'évaluation d'impact de l'industrie du ciment sur l'environnement a l'aide de l'analyse de cycle de vie (acv) : cas de la cimenterie de Hdjer-Soud (schs) à Skikda », Université Mouloud Mammeri Tizi – Ouzou, Mémoire de master, 2017.
- [4] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/> (Consulté le 15/02/2025).
- [5] <https://travauxbeton.fr/faire-ciment/>, (Consulté le 16/02/2025).
- [6] https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs8.html, (Consulté le 16/02/2025).
- [7] Djebbari Oussama Charaf Eddine, « Influence des Eléments Mineurs et Majeurs Sur la Réactivité du Clinker », Université Mohamed Khider de Biskra, mémoire de master, 2020.
- [8] Chakri Sara, « compréhension des mécanismes d'ingibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique », thèse de doctorat », Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2015.
- [9] <https://www.infociments.fr/glossaire/clinker> (Consulté le 14/02/2025).
- [10] Nigri G, « nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, thèse de doctorant », Université 8Mai 194, Guelma, Algérie, 2018.
- [11] Sellaoui Charaf Eddine, « Etude comparative des propriétés rhéologiques des pâtes de ciments », mémoire de master, Université 8Mai 1945, Guelma, Algérie, 2023.
- [12] <http://www.ciment.wikibis.com/clinker.php1>, (Consulté le 14/02/2025).
- [13] <https://www.infociments.fr/betons/les-additions-minerales-pour-beton> (Consulté le 15/02/2025).
- [14] https://fr.made-in-china.com/amp/co_laoyingwendi/product_Fumed-Silica-White-Carbon-Black-Made-From-Factory_uonrhhnury.html (Consulté le 15/02/2025).
- [15] <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/>, (Consulté le 15/02/2025).
- [16] <http://doc.lerm.fr/lerm-info-n-26-les-cendres-volantes/> (Consulté le 15/02/2025).
- [17] <https://lefermenteur.fr/products/sulfate-de-calcium>, (Consulté le 17/02/2025).

- [18] NF EN (12620) Critères de qualité pour les granulats à béton.
- [19] Nigri G, « Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment », mémoire de magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2005.
- [20] Nigri Ghania, « cours Technologie du béton », Université 8 Mai 1945, Guelma, 2020.
- [21] Sayad Youcef, « Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra) », Thèse Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra.2021.
- [22] NA 442 : Norme Algérienne : Composition, Spécifications et Critères des Ciments Courants, Edition IANOR, version 2000.
- [23] Defosse C, « Chimie du ciment (Valorisation des déchets en cimenterie) », Université libre de Bruxelles, 2004.
- [24] Redadaa F, Mahamdi S, « Caractérisation physiques et de durabilité des ciments composés à base de brique », mémoire de master, Université 8 mai 1945, Guelma, 2018.
- [25] Goto T, « Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex ». Thèse de doctorat, Université Paris vi - Pierre et Marie Curie, Paris vi, France, (2006).
- [26] Sayoud Achraf, « Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre », mémoire de master, Université 8 mai 1945, Guelma, 2021.
- [27] Delair. S, « Etude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen des produits pouzzolaniques », thèse de doctorat, Ecole supérieure de Saint-Étienne, France, 2008.
- [28] Cherait. Y, Nafa. Z, « Eléments de matériaux de construction », Editions Direction des publications Universitaires de Guelma DPUG, 2007.
- [29] <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G10.30-41.pdf> (consulté le 5/3/2025).
- [30] Belaid Ibtissam, Benhaddou Amira, « Utilisation de déchets de poudre de verre comme un remplaçant partiel du ciment pour la préparation du béton et sable de dune sous un climat aride », mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018.
- [31] Baron. J, Sautrey. R, « Le béton hydraulique », Presse de L'Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p, 1982.

[32] Daoudi Djillali, Fatmi Brahim, « Caractérisation des granulats pour la formulation d'un béton », mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021.

[33] Bouaka Wafa, « influence de la poudrette de caoutchouc sur les performances des bétons hydrauliques à base de graviers roulés », thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.

[34] Berredjem Layachi, « Le recyclage des bétons de démolition, Solution pour le développement durable, Formulation et comportements physiques et mécaniques des bétons à base de ces recyclés », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.

[35] Senouci Sabrine, « Influence des taux élevés des fines calcaires sur les comportements mécaniques et rhéologiques des bétons à base du sable de carrière », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.

[36] NF P 18 554, Norme Française « Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux », 1990.

[37] Maillot. R, « Mémento technique des Granulat », les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p, 2001.

[38] Djekrif Daoud, Benchikh Abd Elouahab, « étude de comportement physique et mécanique du mortier et béton a base des ciments ternaires », mémoire de master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2013.

[39] https://blog.teralta-audemard.com/ajouter-eau-beton-reunion?hs_amp=true (consulté 4/3/2025).

[40] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/construction-maison-preparer-bon-mortier-hourdage-1023/page/5/> (consulté 4/3/2025).

[41] Solutions béton ; Les adjuvants pour des bétons à l'épreuve des chantiers et du temps Construction Moderne/Annuel Ouvrages d'art 2014 – 15
<https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/SB-OA-2014-2.pdf>

[42] Labadlia Khawla, Zaïdi Sara, « l'influence des adjuvants sur la composition des bétons autoplaçant », mémoire de master, Université du 8 Mai 1945 Guelma, 2015.

[43] Benhamida Selma, Dokhane Rayane, « Effet de l'incorporation des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) », mémoire de master, l'Université du 8 Mai 1945 Guelma, Juin 2022.

[44] Haddad Malek, Taleb Karina, Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers, Université Mouloud Mommeri, Tizi Ouzou, 2016.

[45] Chapitre II, Etude générale sur les adjuvants du béton, Université de Tiaret, 2016,
<http://dspace.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11690/6/CHAPITRE02%20SAA%20BGH.pdf>, (consulté le 11mars 2025).

[46] Les adjuvants, Université Badji Mokhtar Annaba, https://elearning-facscet.univ-annaba.dz/pluginfile.php/3931/mod_resource/content/2/Les%20adjuvants.pdf, (consulté le 11mars 2025).

[47] Hamed Aboul kacem Moutie, « Diagnostic des ouvrages en béton armé : Cas du centre intensif des langues à l'université de Biskra », mémoire de master, Université Mohamed khider, Biskra, 2020.

[48] https://www.metaltop.fr/content/527-definition-inhibiteur-corrosion?srsId=AfmBOoqmi_1qFcTgB5kCsIyFsbixpjB7zxQ0P3P4d9uMG1e04rRB4IL, (consulté le 11mars 2025).

[49] Sidi Mohammed EL Amine, Boukli Hacene, « contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2009.

[50] Boufedah Badissi Ahmed, « Influence de la granularité (classe granulaire 4/22,4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires », mémoire de Magister Université Mentouri, Constantine, 2011.

[51] Thabti Maha, « Mesure des caractéristiques des mortiers et bétons par les Ultrasons », mémoire de magister, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2021.

[52] Ayad Mohamed, « Barka Yassine, Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences », Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.

[53] <https://www.facebook.com/1350610724999887/posts/pfbid021PN3nQogrC7RcSZFM8EC7MoK3ofComqkTL9hM3ToNM2NwmXgfW49PGEfGuiZqWDEI/?app=fbl> (consulté 5/3/2025).

[54] Dreux G, FESTA J, « Nouveau guide du béton et ses constituants », Editions Eyrolles, Paris, 409 p, 1998.

[55] Kechkar Chiraz, « Polycopié de cours, bétons innovants 1 », 2021.

[56] Bechir Oussama, « étude de la durabilité d'un béton a base du granulat recycle », Mémoire de master, l'Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.

[57] Ayache Brahim, Rahal Ilyes, Benmansour Walid, « caractérisation des différents types de béton à base de copeaux de bois (Béton Ordinaire – Béton Autoplaçant – Béton A Haute Performance) », mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[58] <https://bronzoperasso.fr/produit/beton-fibre/>, (consulté le 11/3/2025).

[59] Hammou Meriem, « étude comparative sur les caractéristiques de déférents types de bétons légers », mémoire de master, Université Mohamed khider, Biskra, 2019.

[60] <https://betonestampe.fr/beton-leger/>, (consulté le 11/3/2025).

[61] Bouaziz Mohamed Hamza, « Formulation d'un BAP: influence du rapport G/S et de la fibre de palmier dattier de 30 mm de longueur », mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba. 2019

[62] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-beton-autoplaçant-avantages-utilisations-pose/>, (consulté le 11/3/2025).

[63] Belmedjadji kouider, Badji Badji, « Étude du comportement mécanique des granulats recyclés (granulats de briques) », mémoire de master, Université Belhadj Bouchaïb, Ain Temouchent, 2022.

Liste des normes

Concrete - Definition and classification of chemically aggressive environments- Recommendations for concrete mix design, 2016.

NF P18-553: Granulats - Préparation d'un échantillon pour essai.

NF P18-554 : Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

NFP18-555:Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.

NF P18-558:Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines.

NF EN 932-1 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats Partie 1 : méthodes d'échantillonnage.

NF EN 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire.

NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NF EN 12390-3/4: Standard Current, Testing hardened concrete - Part 3 : compressive strength of test specimens, June 2019

NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour bétons. Définitions et exigences.

ASTM C-618: American standard: Standard specification for coal fly ash and natural pozzolans for use in concrete, 2023.

NF EN 12620 : Norme Européenne, Granulats pour béton.

ENV 197-1: European prestandard that specifies the properties of common cements, including their constituents, proportions, and requirements for mechanical, physical, and chemical properties.

NF P 18-407 (NA 428) : Béton, détermination de la résistance à la flexion.

NA 442 : Liants hydrauliques- ciments courants : Composition, spécifications et critères de conformité. 2ème Edition. Institut Algérien de la normalisation.

NA452 : Granulats - Eléments pour identification des granulats. Editions institut Algérien de la normalisation.

CHAPITRE 2

PATHOLOGIES DU BETON

- ❖ **Dégradations mécaniques**
 - Les Chocs
 - Surcharge
- ❖ **Dégradations physiques**
 - Retrait
 - Gel-dégel
 - Sels de déverglaçage
- ❖ **Dégradations Chimiques**
 - Carbonatation
 - Alcali-réaction ou réaction alcali-granulats (RAG)
- ❖ **Attaques chimiques**
- ❖ **Attaques Bactériennes**
- ❖ **Dégradation des armatures (Corrosion)**

Chapitre 2 : Pathologies du béton.

2.1. Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, les armatures sont des éléments constitutifs de matériaux de construction pour augmenter leur résistance aux efforts de traction. L'exposition du béton à des charges modérées, aux intempéries : à des températures élevées ou très basses engendre sa dégradation physico-chimique ou mécanique. Les dégradations qui affectent les constructions, peuvent survenir à n'importe quel moment, c'est-à-dire durant la réalisation ou même quelques minutes après, comme elles peuvent se manifester à long terme.

Lorsque les aciers sont introduits dans le béton frais, il se produit une oxydation de la surface de l'armature grâce au caractère alcalin de la matrice cimentaire. Une fine couche d'oxyde est formée à la surface de l'armature et va dans un premier temps protéger cette dernière de la corrosion ou du moins limiter la vitesse de corrosion à quelques microns par ans. Ce phénomène est appelé la passivation de l'armature. Cependant, au cours du temps des espèces agressives comme les ions chlorure ou le dioxyde de carbone pénètrent dans la matrice cimentaire jusqu'aux aciers et le film passif altéré et certaines conditions réunies (humidité relative suffisante et présence d'oxygène) la corrosion peut s'initier et les produits de corrosion vont proliférer et migrer dans la matrice cimentaire. La corrosion des armatures se manifeste par des éclats du béton d'enrobage, des épaufrures locales ou la présence de taches de rouille sur le parement. Elle engendre une perte de section de l'acier pouvant entraîner sa rupture fragile et une altération de la capacité portante de la structure. Les principales conséquences résident dans la perte de fonction de la structure en termes d'esthétisme ou de sécurité pour les usagers [1].

Ces dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. Devant cet état de cause, les travaux doivent être menés pour déterminer en première urgence les différents types de dégradations et les pathologies correspondantes [2].



Figure 2.1 : Dégradation du béton [3].

2.2. Pathologies et causes de dégradations du béton armé

Les facteurs de dégradation du béton peuvent être déclinés en trois principaux types de défauts et dégradations présentés dans l'organigramme illustré sur la figure suivante [2] :

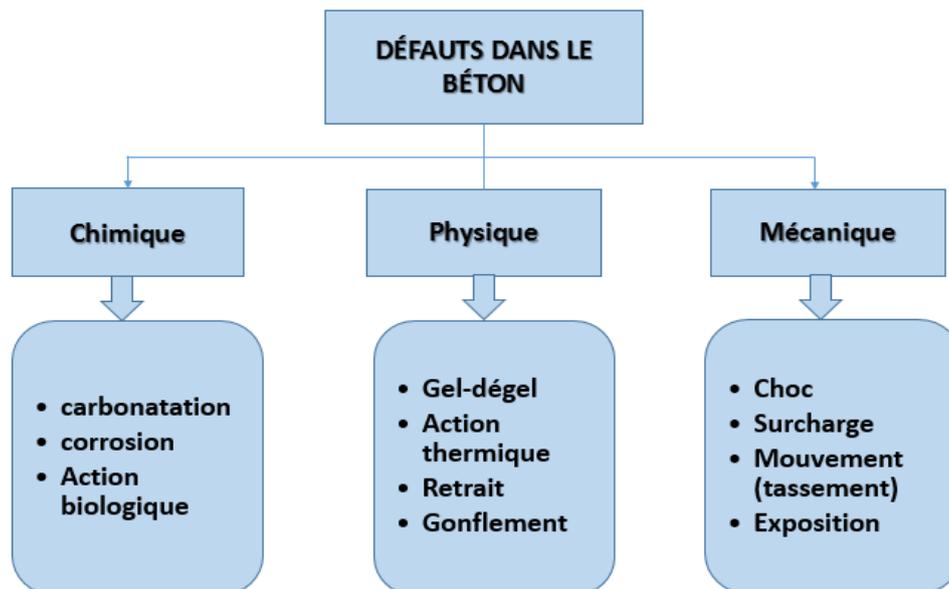


Figure 2.2 : Les dégradations et les défauts du béton armé [2].

2.2.1. 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 [4].

2.2.1.1. Les Chocs

Il s'agit le plus souvent d'une attaque mécanique concrétisé par des chocs, dont les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, chocs de bateaux ou d'objets flottant contre les piles en rivière ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenu constituent une autre source de chocs non négligeable Figure 2.3.

Un dommage dû aux ondes de choc est caractéristique, les éléments du béton sont épaufrés et laissent généralement à nu le cadre d'armatures, les cassures sont fraîches et non altérées, les armatures ne sont pas corrodées, en plus, les épaufrures résultant sont profond et ils n'ont pas l'aspect d'un écaillage [5].



Figure 2.3 : Les différentes dégradations causées par le choc [5].

2.2.1.2. Surcharge

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton [6].

2.2.2. Dégradations physiques

2.2.2.1. 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.

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 [6].

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 [4].



Figure 2.4 : Fissuration du béton due au Retrait [3].

2.2.2.2. Gel-dégel

Les cycles de gel-dégel provoquent une expansion de la masse du béton jusqu'à fissurer le matériau s'il est de mauvaise qualité. Car la transformation de l'eau en glace se traduit par une augmentation de volume de 9 % qui provoque une expulsion de l'eau hors des capillaires [7].

L'eau qui y pénètre à l'intérieur des pores de béton ou pâte de ciment en plus des sels de dévers-glaçage versés en surface se gèle est donc augmente de volume générant ainsi des tensions à l'intérieur du béton qui provoquent des fissurations et écailllements du béton

(Figure 2.5), Le volume d'air occlus est d'environ 1 à 2%, teneur non suffisante pour faire face au volume d'eau qui gèle. Pour résister à ce phénomène, il faut augmenter le volume d'air en entraînant une certaine quantité à l'aide d'un adjuvant chimique (agent entraîneur d'air). La norme BNQ recommande une teneur en air variant de 4 à 8% dépendamment des conditions d'exposition du béton, de la grosseur des granulats [8].

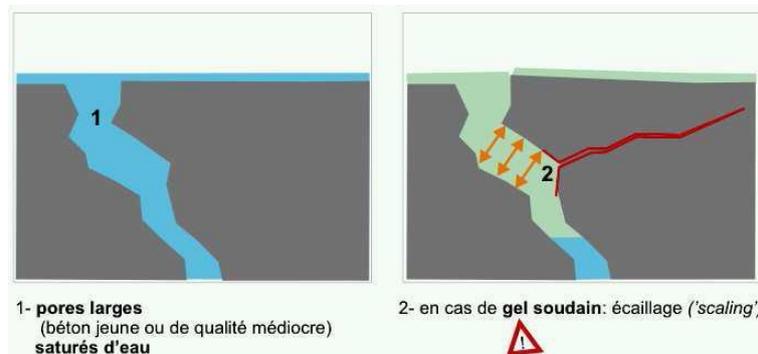


Figure 2.5 : Mécanisme de dégradation par le gel dégel [9].

2.2.2.3. 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 [10].

2.2.3. Dégradations Chimiques

2.2.3.1. Carbonatation

La carbonatation est un phénomène de vieillissement du béton, est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère, et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone comme les tunnels routiers, les ouvrages urbains, les parkings souterrains, etc.

La carbonatation correspond à la réaction des produits hydratés du ciment [11] telle que : La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, les silicates de calcium hydratés(C-S-H), les chloroaluminates et les sulfoaluminates [5] avec le CO_2 atmosphérique dissous dans la solution interstitielle. Ce qui engendre une diminution du pH (jusqu'à 9 environ).

La dépassivation de la couche protectrice des armatures se produit lorsque le pH est inférieur 9,5. La carbonatation provoque une destruction du film passif et la diminution de la porosité du béton (les produits des réactions de carbonatation ont des volumes supérieurs à ceux des Réactifs) [11].

a) Mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04% de CO_2 , cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO_2 atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 % [12].



Figure 2.6 : Phénomène de la carbonatation [12].

b) Les paramètres influençant la carbonatation

- **Rapport eau/ciment (E/C) :** Toutes les études réalisées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation s'accordent à conclure que plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible. En effet, la porosité d'un béton dépend en grande partie du rapport E/C. Plus il est élevé, plus la quantité d'eau libre évaporable est grande. En s'évaporant, cette eau laisse des vides qui favorisent la diffusion du CO_2 [13].

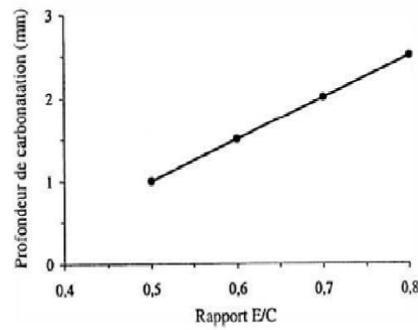


Figure 2.7 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment [13].

- **Le dosage en ciment :** Le dosage en ciment est responsable de la quantité de matière susceptible de se carbonater.

Plus le dosage en ciment est élevé, plus il y a de matière pour la carbonatation. Et puisque la carbonatation provoque une diminution de la porosité, il y aura un freinage de la vitesse de pénétration du gaz carbonique [10], c'est-à-dire l'augmentation du dosage du béton à un effet ralentisseur sur la propagation de la carbonatation [11].

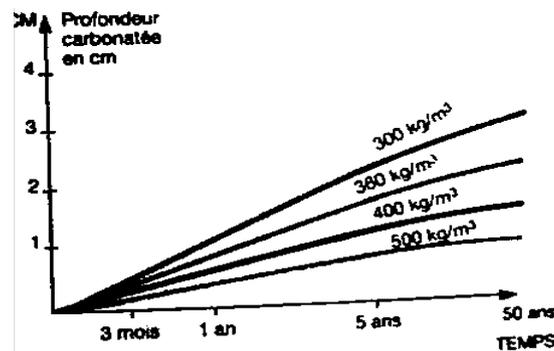


Figure 2.8 : Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment [11].

- **La nature de ciment :** La substitution d'une partie du clinker par des additions minérales avec des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques latentes (laitiers de haut fourneau, fumée de silice ou cendres volantes) va fixer une partie de la Portlandite et les alcalins. Cela entraînera une chute de l'alcalinité et favorisera les réactions de neutralisation entre CO_2 dissous et hydrates [14].

- **La température :** L'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est très discutable. D'une part, une élévation de la température accélère les réactions chimiques (thermo activation selon la loi d'Arrhenius). D'autre part, une augmentation de la température diminue la solubilité du CO_2 et diminue sa concentration dans la phase gazeuse [15]

Néanmoins, il est généralement admis qu'une élévation de la température engendre une accélération de la carbonatation [16].

- **La résistance à la compression** : La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît. Cependant, deux bétons de même résistance mécanique peuvent avoir deux rapports E/C distincts et donc deux comportements différents vis-à-vis de la carbonatation. Les valeurs qui figurent entre parenthèses sont obtenues avec l'équation [13] :

$$e = 125 \exp(-0,05f_{c28}) \quad (2.2)$$

Tableau 2.1 : Profondeurs de carbonatation en fonction du temps [13].

Temps d'exposition (années)	Profondeur de carbonatation (mm)		
	fc28 = 25 MPa	fc28 = 35 MPa	fc28 = 50 MPa
2	9	5	2
5	15	9	3
10	21	12	4
20	29	17	6
30	37 (36)	21 (21)	8 (10)
50	48	28	10

- **Humidité relative** : La vitesse de progression du front de carbonatation dépend des caractéristiques du matériau (porosité, nature du ciment, etc...). L'humidité relative du milieu environnant, qui détermine la teneur en eau du béton, est également un paramètre fondamental. Quand l'humidité relative augmente en dessus de 70 %, la fraction de pores remplis d'eau augmente également et gêne ainsi la diffusion du gaz CO₂. De même, une faible humidité relative en dessous de 60 % ralentit la dissolution du CO₂ par manque d'humidité et par conséquent le processus de carbonatation. Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du CO₂ gazeux et suffisamment élevée pour que la réaction de carbonatation proprement dite puisse avoir lieu en phase aqueuse. En effet, la carbonatation de la portlandite passe inévitablement par la rencontre des cations Ca²⁺, provenant de la dissolution de la portlandite en phase aqueuse, et des anions CO₃²⁻ provenant de la dissolution du CO₂ dans l'eau [17].

- **La concentration en dioxyde de carbone** : L'augmentation de la concentration en CO_2 induit un accroissement de la vitesse de carbonatation dans des endroits où la teneur en CO_2 est élevée (tunnels, garages, cheminées,...). Cependant, les variations de la teneur en CO_2 de l'air ont une influence sur les bétons de résistance modérée (≤ 30 MPa environ). Au-delà, la teneur en CO_2 n'a plus d'influence sur la carbonatation [18].

- **La 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) [19].

c) Conséquence de la carbonatation sur le béton

- **Chute du pH de la solution interstitielle et corrosion des armatures** : L'alcalinité du béton ($\text{pH} > 13$) assure la passivation des aciers d'armatures. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH favorisant leurs corrosions. Lors du phénomène de corrosion. Dans la zone anodique il y aura une diminution progressive de la surface d'armature et dans la zone cathodique la formation d'une rouille expansive qui exercera une pression sur le béton qui entoure les armatures et provoqué l'éclatement du béton d'enrobage [18].

- **Evolution des propriétés de transfert** : L'évolution de la microstructure, qui accompagne la carbonatation, influence sur la propriété de transfert des matériaux cimentaires : coefficients effectifs de diffusion aux ions et aux gaz et perméabilité aux gaz et à l'eau liquide.

Le coefficient effectif de diffusion aux gaz (oxygène ou hydrogène) est diminué après la carbonatation de matériaux à base de ciment CEM I. Cependant, le coefficient de diffusion effectif des ions (chlorures par exemple) est augmenté à l'issue de la carbonatation de matériaux à base de ciment, ce phénomène pouvant être attribué aux grandes modifications de la structure des (C-S-H) après la carbonatation.

La carbonatation provoque un accroissement de la perméabilité intrinsèque aux gaz et à l'eau liquide d'un béton assez poreux ($E/C > 0,45$), et une réduction pour un béton de porosité et

une réduction pour un béton de porosité modérée. Son effet sur la perméabilité intrinsèque des bétons les moins poreux est négligeable [11].

- **Retrait de carbonatation** : La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume des solides de 3% à 19% selon le produit de réaction obtenu (Valérite, Calcite ou Aragonite), ce qui nous amène à penser qu'il s'agit d'un gonflement et non d'un retrait. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un (retrait). Ce phénomène peut être attribué à la perte d'eau provoquée par la réaction, du fait de l'observation que la quantité d'eau libérée lors de cette réaction s'accompagne d'un retrait qui est du même ordre de grandeur qu'un retrait infligé par le départ de la même quantité d'eau sans carbonatation. Plusieurs autres hypothèses ont été avancées dans le but d'expliquer le retrait de carbonatation qui est un phénomène assez complexe. Ces hypothèses ont permis de mieux comprendre ce phénomène mais pas d'aboutir à une conclusion déterminée et générale [18].

- **Augmentation locale de la teneur en eau** : La réaction de carbonatation de la portlandite entraîne la production d'eau libre ce qui conduit à l'accumulation d'humidité dans les pores. Plusieurs auteurs ont mesuré une augmentation de la teneur en eau évaporable par séchage à 105°C sur matériaux carbonatés. D'autres auteurs ont montré aussi l'évolution de teneur en eau locale en cours de carbonatation avec différentes techniques. L'eau relarguée va modifier le degré de saturation en eau du matériau, ce qui aura pour effet de limiter la diffusion du CO₂ gazeux. Inversement, cette augmentation de teneur en eau pourra aussi favoriser la carbonatation en offrant plus d'eau disponible pour la dissolution du CO₂ [14].

- **Diminution de la porosité** : La réduction de porosité liée à la carbonatation entraîne corrélativement une augmentation de résistance mécanique. La calcite qui s'est formée consolide la microstructure. Il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant : c'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux. La résistance à la compression et à la flexion de bétons à base de ciment CEMI conservés dans une atmosphère de dioxyde de carbone peut augmenter de 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO₂. L'augmentation de résistance est d'autant plus marquée que le rapport E/C du matériau est bas [13].

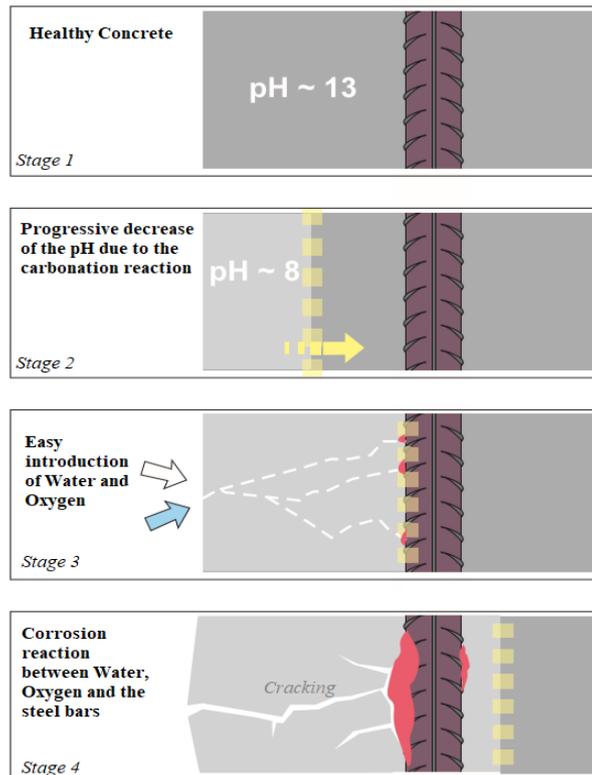


Figure 2.9 : Corrosion des armatures due à la carbonatation [20].

2.2.3.2. Alkali-réaction ou réaction alcali-granulats (RAG)

L'alcali-réaction est une réaction chimique entre certaines formes de silice et de silicate pouvant être présentes dans les granulats, et les alcalins de la solution interstitielle du béton (Provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...). Elle correspond à une attaque du granulat par la solution basique du béton et provoque la formation d'un produit expansif et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent sous certaines conditions, un ensemble de désordres.

En générale, ces réactions constituent une réponse des minéraux constitutifs des granulats (qui se trouvaient avant leur extraction dans un environnement de pH voisin de 7) à un déséquilibre avec le milieu du béton dans lequel règne un pH souvent supérieur à 13 [21].

La réaction se produit lorsque trois conditions sont réunies, à savoir :

- 1- Des granulats potentiellement réactifs (selon la norme NF EN 206) : le granite, le grès, ...
- 2- Une teneur élevée en alcalins apportés par le ciment. Ce sont les alcalins dissous dans l'eau de gâchage qui n'ont pas réagi à la prise du béton.
- 3- Un environnement humide (humidité relative d'au moins 80 %) [22].



Figure 2.10 : Phénomène de la RAG [23] [12] [24].

a) 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 [19].

b) Types de Réactions Alcalis-Granulats : On distingue trois principales réactions alcalis-granulats, en fonction de la nature des phases réactives des granulats [25] :

✓ Réaction Alcalis-Silice (RAS) :

La réaction alcalis-silice (RAS) est la plus courante des réactions alcalis-granulats. Les formes de silice réactive susceptibles de donner lieu à la RAG peuvent se trouver dans une grande variété de roches employées pour l'élaboration de granulats : granites, gneiss, roches volcaniques, tufs et calcaires siliceux. Il se produit un gel qui absorbe de l'eau et augmente de volume. La pression exercée par le gel fracture les granulats et provoque la formation et la propagation des fissures dans le béton environnant. Généralement, cette réaction entraîne une fissuration en faïençage.

Cette réaction se déroule en deux séquences.

1) Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation. Dans un premier temps, les alcalins du béton sous forme d'hydroxydes alcalins

NaOH, KOH ; qui migrent en solution interstitielle à travers les pores du béton, et entrent en contact avec des particules de silice réactive qui peut se trouver en surface ou dans les fissures des granulats. Il se forme un gel sous forme de silicate-alcalin.

2) Dans un second temps, le gel de silicate-alcalin se combine ensuite avec le calcium provenant de la pâte du ciment, surtout de la portlandite (Ca(OH)_2) pour donner lieu à la formation d'un gel silico-calco-alcalin : gel silicate-alcalin + portlandite \Rightarrow gel silico-calco-alcalin . Ce gel absorbe une grande quantité d'eau, ce qui provoque l'expansion du béton durci. Ces gels peuvent fixer de l'eau jusqu'à 3 fois leur poids en eau, si l'humidité relative est très élevée (> 95%).

La poursuite de cette réaction augmente la pression intérieure (6-7 MPa), engendrant une fissuration et un écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

La cinétique de la RAS est fonction de la perméabilité de la pâte de ciment, la réactivité de la silice, la taille des granulats (dimension réduite, réactivité élevée)... Les produits de réaction se déposent autour et dans les fissures des grains, dans les pores et fissures de la pâte de ciment [25].

✓ Réaction alcali-silicate

Les roches polyminérales à base de silicate tel le granite, le grès, les argiles sont en cause dans cette réaction selon Gillot qui a étudié et mis en évidence la réaction alcali-silicate. Ce type de réaction est très lent dans les conditions atmosphériques normales, apparaît habituellement à des âges importants, souvent autour de 30 ans, en revanche celle de l'alcali-silice peut aller de 20 à 25 ans. Les dégradations observées dans les ouvrages contenant des granulats de roches silicatées ont suscité des études plus récentes que pour les autres types de réactions. montre que la cinétique lente de la réaction est due à la dispersion des minéraux réactifs dans la partie liante du béton. L'expansion constatée au cours des réactions est due à la présence de silicates et d'argile d'altération.

Ce phénomène a été clairement mis en évidence dans les laboratoires des Ponts et Chaussées LCPC. Les produits de la réaction se présentent sous forme d'un gel silico- alcalin créant une expansion dans le béton. L'extension du phénomène se traduit par une fissuration et quelquefois une exsudation du gel en surface [26].

✓ Réaction alcali-carbonate (ACR)

Contrairement aux autres réactions alcali-granulaire, l'alcali-carbonate ne peut pas produire un gel expansif. Elle est moins importante que celles dues aux réactions alcali-silice ou alcali silicate sauf si le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses.

Les particules grossières soumis à une expansion globale due à des hydroxy des alcalins réagissent avec des petits cristaux de dolomite dans une matrice d'argile, entraînant une réaction de dolomitisation. Ce type d'RAG est limitée à l'argile contenant du carbonate global, tels que certains argiles dolomies calcite, qui provoque l'expansion et à la fissuration étendue [5].

2.2.3.3. Attaques chimiques

a) Réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) est une réaction pathogène qui est due à la présence d'un hydrate expansif, l'ettringite, dont la formation dans un béton durci peut provoquer des contraintes importantes se traduisant par une expansion du béton. L'ettringite peut se former à différentes échéances dans une matrice cimentaire et présenter des faciès variés. De plus, l'origine des constituants entrant dans sa composition peut elle aussi changer. Cela se traduit par l'existence de plusieurs types d'ettringite. Le phénomène de réaction sulfatique interne (RSI) résulte de la formation différée d'ettringite et de formule chimique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Elles se différencient essentiellement par les conditions de leur formation :

➤ **L'ettringite de formation primaire (1)** : l'ettringite est un produit de l'hydratation du ciment portland. En effet, le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker et de gypse qui en contact avec de l'eau produit, entre autres, des silicates de calcium hydratés, de l'hydroxyde de calcium (ou portlandite) et de l'ettringite (tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté). Cette ettringite ne provoque pas d'expansion,

➤ **L'ettringite de formation secondaire (2)** : Correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci qui peut provoquer une expansion.

➤ **L'ettringite de formation différée (3)** : consécutive à une élévation de température subie par le béton au jeune âge, qui peut aussi provoquer une expansion dans les bétons. (échauffement supérieur à 65°). L'expansion est provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite qui se traduit par une fissuration et un éclatement superficiel du béton. Ces

fissures facilitent la pénétration des agents agressifs et accélère le processus de dégradation du béton [2].

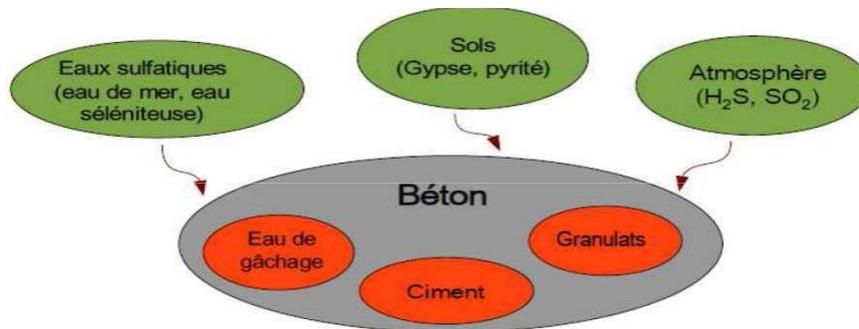


Figure 2.11: Sources de sulfates interne et externe [27].

Réaction sulfatique :

Etape 1 : Sulfate de calcium + Portlandite => Gypse secondaire.

Etape 2 : Gypse secondaire + Aluminate de calcium => Ettringite

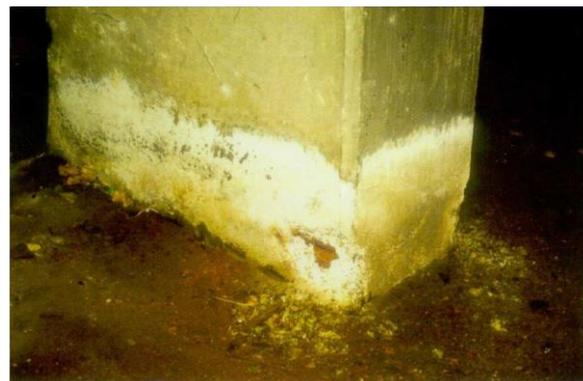


Figure 2.12 : Attaque sulfatique [27].

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons [28].

On oublie souvent les réactions chimiques qui se produisent au sein de la structure en béton et qui contribuent à sa fragilisation, à l'apparition de fissures ouvrant le champ à la pénétration des ions chlorure, sulfate et du dioxyde de carbone (carbonatation induisant ainsi une diminution drastique du pH de la solution interstitielle) La dégradation du béton se fait à partir de différentes attaques chimiques résultant de diverses réactions [24].

b) Chlorures

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés ou parfois de certains adjuvants. Soit ils proviennent le plus souvent de l'environnement extérieur : atmosphère marine ou sels de déverglaçage, qui diffusent dans le béton. Les chlorures existent sous deux formes dans le béton. Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle et les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment ou adsorbés sur les parois des pores. Cependant les chlorures qui ne sont pas fixés aux hydrates c'est-à-dire les chlorures libres peuvent migrer à travers la structure poreuse du béton, sous l'effet des variations d'humidité consécutives aux alternances de cycle de séchage/mouillage ou sous l'effet de gradients de concentration entre la structure interne du matériau et l'eau de mer, par exemple [29].

Le transport des ions chlorures libres s'effectue par deux mécanismes distincts :

- par la convection : les ions chlorures sont entraînés par les mouvements de l'eau ;
- par la diffusion : les ions chlorures se dissolvent dans l'eau pour égaliser le gradient de concentration [30].

En conséquence, ce sont les ions libres qui sont les plus nocifs en ce qui concerne la corrosion des armatures. Ainsi la cinétique de pénétration ou plutôt de migration de ces ions est relié à la perméabilité du béton. Elle décroît avec le rapport E/C et en fonction de la concentration en sels de la solution interstitielle [29].

✓ Les conséquences de l'attaque des Chlorures

L'attaque des chlorures se distingue par l'entraînement de la corrosion des armatures avec une présence suffisante d'O₂ et H₂O pour soutenir la réaction.

Les chlorures ayant atteint l'armature attaquent l'acier, initialement passivé, en certains points localisés. Le film passif est alors détruit localement et laisse apparaître des zones anodiques où l'acier est dissout, le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques Figure 2.14.

La surface des zones cathodiques étant bien plus importante que celle des zones anodiques, la dissolution de l'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface de l'acier, formant ainsi des piqûres ou des cavernes [5].

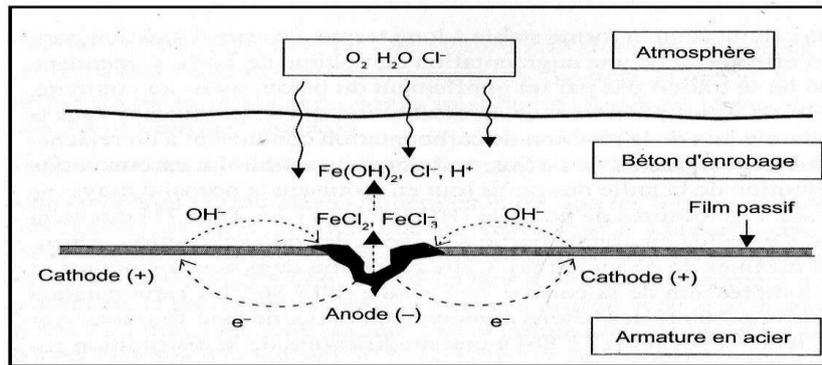


Figure 2.13 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence des chlorures [31].



Figure 2.14 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure [5].

c) Attaque des 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 [19].



Figure 2.15 : Attaques acides [12].

✓ **Les différents types des acides**

- ❖ Les pluies acides (cas extrême des eaux douces)
- ❖ Les acides minéraux
- ❖ Les acides organiques [32].

✓ **Action des acides**

L'action des acides (comme la substance agressive) sur le béton durci (Comme la substance réactive) traduit par la transmutation des composés de calcium (Hydroxyde de calcium hydraté de calcium, le silicate et d'aluminat de calcium hydraté) aux sels de calcium.

- L'action de l'acide chlorhydrique conduit à la formation de chlorure de calcium, qui est très soluble selon la réaction suivante:



- L'acide sulfurique donne du sulfate de calcium, qui précipite sous forme de gypse ;

- d'acide nitrique donne nitrate de calcium, qui est très soluble.

Avec des acides organiques, le résultat est le même

- l'action de l'acide lactique conduit à des lactates de calcium,

- acide acétique donne l'acétate de calcium, et ainsi de suite.



Acide acétique Hydroxyde de calcium Acétate de calcium [5].

d) Attaques Bactériennes

L'attaque bactérienne du béton, aussi appelée corrosion microbiologiquement induite, est un processus de dégradation. Des bactéries, comme les Thiobacillus, métabolisent le gaz sulfureux d'hydrogène (H_2S) présent dans les égouts, produisant de l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui corrode le béton. Cette attaque chimique affaiblit la structure du béton.

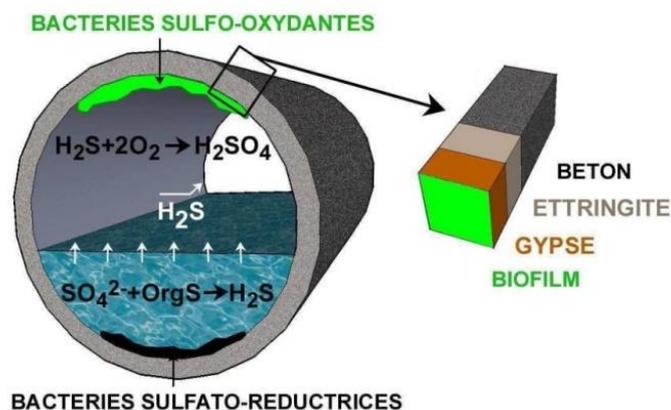


Figure 2.16 : Cycle du soufre dans les réseaux d'assainissement [34].

2.2.3.4. Dégradation des armatures (Corrosion)

Selon la norme ISO 7539-3 : (1989), la définition officielle de la corrosion, est la suivante : « Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs » [33].



Figure 2.17 : Corrosion des armatures dans le béton [34].

a) Origine de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. Les différents paramètres qui favorisent la corrosion d'un matériau sont :

- Composition chimique et microstructure du métal,
- Composition chimique de l'environnement,
- Paramètres physiques (température, irradiation, etc.)
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottement, etc.).

Donc on peut dire que les phénomènes de corrosion dépendent du matériau et du milieu environnant [35].

b) Les types de corrosion

D'une façon générale, la corrosion peut être de trois types : corrosion chimique, électrochimique et la corrosion biochimique (Bactérienne) [36].

✓ Corrosion chimique (sèche) :

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de Corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazeux (d'O₂, H₂ et CO₂). Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : Corrosion sèche ou corrosion à haute température.

La réaction qui se produit est de la forme :

A solide + B gaz \rightarrow AB solide [35].

✓ **Corrosion Biochimique (Bactérienne) :**

C'est l'attaque bactérienne des matériaux métalliques, en particulier dans les canalisations enterrées et les réservoirs. En effet, le métabolisme du développement de certaines bactéries provoque la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal [37].

✓ **Corrosion électrochimique (humide) :**

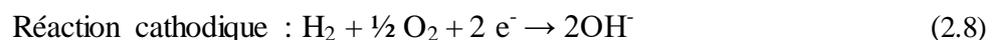
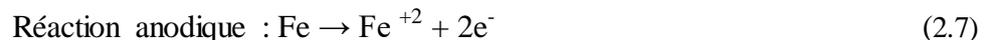
La corrosion correspond au passage des atomes métalliques sous forme d'ions en solution (dissolution métallique); le cation dissous peut alors se présenter sous différentes formes: hydratée, hydrolysée ou bien encore il forme des liaisons plus complexes.



Ces réactions sont constituées de deux demi réactions respectivement dites :

Réaction anodique (réaction d'oxydation) et réaction cathodique (réaction de réduction). Par

Exemple, dans le cas de la réaction :



Ces réactions sont dites électrochimiques car elles impliquent des transferts de charge entre un conducteur électronique (le matériau métallique) souvent appelé électrode, et un conducteur ionique, électrolyte liquide ou solide. Il existe plusieurs types de corrosion électrochimique à savoir [38] :

❖ **Corrosion uniforme ou généralisée**

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du Métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement) [39].



Figure 2.18 : Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [39].

❖ **Corrosion localisée**

La corrosion localisée découle toujours de la corrosion uniforme, par couplage galvanique entre les zones hétérogènes. Il suffit alors d'une petite anode et d'une grande cathode pour générer des vitesses de pénétration locales très importantes. Ces hétérogénéités locales peuvent être préexistantes dans le métal ou dans le milieu corrosif. Contrairement à la corrosion uniforme, on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques. Ce type de corrosion ne peut être mesuré par la perte de poids ou de la diminution de l'épaisseur. Pour se faire on doit réaliser des observations métallographiques, et des mesures électrochimiques [40].

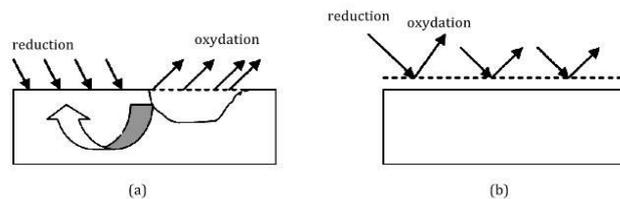


Figure 2.19 : Types de corrosion (a) corrosion localisée et (b) corrosion uniforme [40].

Pour la corrosion localisée, nous distinguons plusieurs types que nous pouvons schématiser comme suit [41] :

Macroscopique

- Corrosion galvanique
- Corrosion par piqûres
- Corrosion-érosion
- Corrosion cavitation
- Corrosion par crevasse
- Corrosion filiforme
- Frottement – corrosion

Microscopique

- Corrosion inter-cristalline
- Corrosion sélective
- Corrosion sous contrainte
- Corrosion sous fatigue
- Fragilisation par l'hydrogène

a. Corrosion par piqûres : La corrosion par piqûres se traduit par la formation, sur la surface du métal, de cavités aux formes irrégulières dont le diamètre et la profondeur varient suivant plusieurs paramètres propres au métal, au milieu et conditions de service (Figure 2.20). Elle est produite généralement par la présence d'anions agressifs notamment les halogénures et plus particulièrement les chlorures, sur des métaux protégés par des films d'oxyde très minces. Le phénomène de piqûration, de nature stochastique, est souvent

difficile à prédire. Sa cinétique peut être élevée. La corrosion par piqûre représente donc un danger important pour le métal et sa fonctionnalité, d'où le grand nombre d'études qui lui sont consacrées [42].

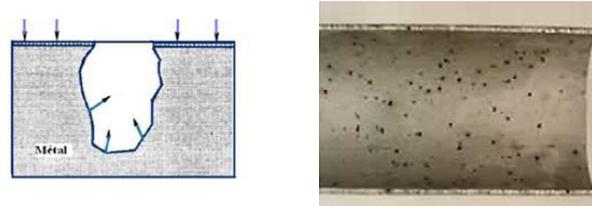


Figure 2.20 : Corrosion par piqûres [42].

Une piqûre peut avoir des formes différentes selon les conditions expérimentales. Ces formes sont représentées de façon schématique sur la Figure 2.20, Il existe des formes étroites et profondes (Figure 2.21(a)), des piqûres cavernieuses (Figure 2.21(b)) ou des formes hémisphériques (Figure 2.21(c)), souvent décrites dans la littérature [42].



Figure 2.21 : Formes de piqûres (a) cavité profonde (b) cavité cavernieuse (c) hémisphérique. [42].

b. Corrosion galvanique : La corrosion galvanique c'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte.

Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physicochimiques à l'interface [39].



Figure 2.22 : Corrosion galvanique [43].

c. Corrosion par crevasses (caverneuse) : Est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres (figure 2.23) [18].



Figure 2.23 : Corrosion par crevasses [18].

La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion caverneuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices, soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux [18].

d. Corrosion sélective : Corrosion sélective Elle est très dangereuse parce qu'elle est indétectable. Elle consiste en la dissolution sélective d'un élément d'alliage, les autres éléments restent non attaqués. Le métal devient poreux et perd sa résistance [44].



Figure 2.24 : Corrosion sélective [11].

e. Corrosion sous contrainte : C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action conjointe d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par les fissures inter ou Trans granulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte [35].



Figure 2.25 : Fissures de la corrosion sous contrainte CSC [35].

f. Corrosion-frottement : Ici encore le dommage est essentiellement d'origine mécanique, le processus de corrosion n'intervenant que dans une deuxième étape.

Cette forme de corrosion intervient lorsque deux surfaces métalliques en contact sont sujettes à un déplacement rapide périodique (vibration). En générale, le phénomène se rencontre en phase gazeuse (gaz, atmosphère) ; il est en particulier fréquent lors des transports de pièces métalliques (voir figure 2.26). Dans un premier temps, il y a formation de débris (les aspérités

sont arrachées) de petites tailles (10 à 50nm) qui s'oxydent rapidement. La présence de ces produits de corrosion contribue à dégrader mécaniquement l'interface dont l'aspect est alors modifié : rugosité importante avec des piqûres plus ou moins ouvertes et présence de produits de corrosion, bruns-rouges pour le fer, noirs pour l'aluminium et la plupart des autres métaux. Les remèdes consistent naturellement à éviter le mouvement relatif des pièces ou à interposer des isolants ou des lubrifiants [45].



Figure 2.26 : Corrosion par frottement d'une pièce [45].

g. Fragilisation par l'hydrogène : L'hydrogène peut pénétrer dans le métal quand il est produit à l'interface métal/film d'oxyde lors d'une réduction liée à la corrosion. En fond de fissure, le métal est nu. Il réagit avec l'eau et libère de l'hydrogène naissant qui se concentre aux joints de grains et facilite une décohésion inter cristalline [40].

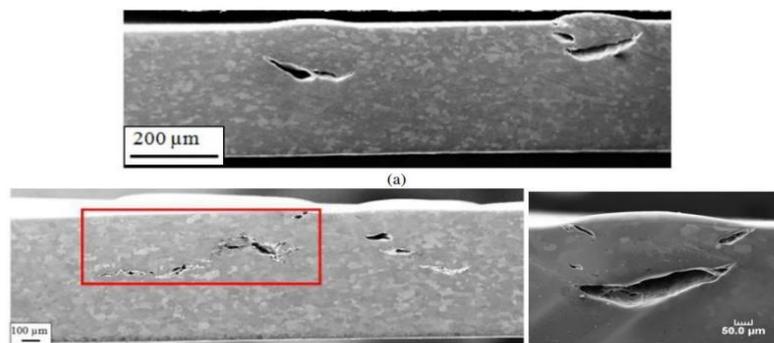


Figure 2.27 : Fragilisation par l'hydrogène [46].

h. Corrosion érosion/abrasion/cavitation : Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important et les phénomènes de frottement et d'usure peuvent intervenir. On a apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous..., ayant un aspect directionnel caractérisé (queue de comète, sabot d'un cheval...). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier

les métaux mous (cuivre, plomb...) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables) [47].



Figure 2.28 : Corrosion-érosion due à de fortes vitesses de circulation du fluide corrosif [45].

c) Les principaux facteurs de corrosion

La résistance à la corrosion d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque. Elle dépend à la fois des caractéristiques du matériau et de celles du milieu. En plus de ces facteurs, les conditions d'emploi et la durée d'exploitation ont un rôle prépondérant sur les phénomènes de corrosion, Le tableau 2.2 résume les principaux facteurs de corrosion [48].

Tableau 2.2 : Les principaux facteurs de corrosion [48].

Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	Facteurs métallure-piques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendants du temps
<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif -Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, H₂S) -Acidité (pH) du milieu, salinité, température, pression -Présence de bactéries. 	<ul style="list-style-type: none"> -Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines - Impuretés dans l'alliage, inclusions - Traitements thermiques, mécaniques ; - Additions protectrices. 	<ul style="list-style-type: none"> -Etat de surface, défaut de fabrication -Emploi d'inhibiteurs -Croûtes d'oxydes superficielles - Force électromotrice extérieure (électrolyse). 	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement - Température - Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous - Apparition d'un dépôt (calcaïque ou autre).

2.3. Aspect économique de la corrosion

De point de vue économique, la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année, un quart de la production d'acier est détruit par la corrosion. Cela équivaut à environ 150 millions de tonnes/an, soit 5 tonnes/seconde. Ces pertes pourraient

être plus élevées en l'absence d'une protection anticorrosion. Cela a d'énormes répercussions sur l'économie mondiale, incluant les pertes directes (remplacement de matériaux corrodés) et les dépenses indirectes (perte de temps et baisse de productivité). Selon les estimations, cet impact représente environ 4 % du produit intérieur brut annuel.

Le but principal des études sur la corrosion est économique. Les effets directs et indirects de la corrosion peuvent être récapitulés ci-dessous :

- Arrêt de la production ;
- Coût de l'entretien et du contrôle ;
- Coût des pièces à remplacer, des réparations à effectuer ;
- Coût dû à l'utilisation de matériaux plus nobles ;
- Contamination du produit par les produits de corrosion solubles ;
- Perte du produit ;
- Perte d'efficacité ;
- Augmentation des coefficients de sécurité (surdimensionnement) [49].

2.4. Conclusion

Le béton armé est soumis à différentes sources de dégradations pouvant diminuer sa durabilité. En général, la carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO₂ atmosphérique, La pénétration de chlorures depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieu industriels particuliers...), l'augmentations de température, l'effet gel-dégel engendre une diminution du pH dans la matrice du béton et par conséquent la dépassivation des aciers : destruction du film passif qui les entoure. Une fois que l'acier d'armature est dépassivé, la corrosion aura lieu sous la forme de formation de rouille, puis perte de section.

Références Bibliographiques du Chapitre 2

- [1] Mai-nhu Jonathan, Corrosion des armatures : intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage, Rapport d'études et recherches, 2015.
- [2] Hamed Aboul kacem Moutie, « Diagnostic des ouvrages en béton armé : Cas du centre intensif des langues à l'université de Biskra », mémoire de master, Université Mohamed khider Biskra, 2020.
- [3] <https://www.guidebeton.com/pathologies-beton> (consulté 18/03/2025).
- [4] Houmeur Mouaadh Et-Tayib, Lammari Yacine, « Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives », mémoire de master, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2018.
- [5] Zighem Naima, « Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages d'art », mémoire de master, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2021.
- [6] Senouci Sabrina, « Influence des taux élevés des fines calcaires sur les comportements mécaniques et rhéologiques des bétons à base du sable de carrière », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [7] Djebbari Hanane, Rahmani Nemira, « Pathologie des ouvrages en béton armé (Diagnostic, causes et conséquences, dégradation des ouvrages dans une zone aride) », mémoire de master, Université Ahmed Draia Adrar, 2022.
- [8] A. Tagnit, Hamou, « Cours de microstructure, Université de Sherbrooke, Automne 2019.
- [9] Pathologies des bétons : causes et effets », Université de Liège, Département d'Architecture, Géologie, Environnement et Constructions Journée d'études, Fabi, 20 février 2014. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/163308/1/FABI_Fev14_LC.pdf
- [10] W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE) « (réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil) Note d'information technique 231(CSTC) »Septembre 2007. Page 7.
- [11] Benyoub Akila, Benzaiou Abir, « Etude de la durabilité et réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion », mémoire de master, Université 8Mai 1945, Guelma, Algérie, 2016.
- [12] Houmeur Mouaadh Et-Tayib, Lammari Yacine, « Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives », Mémoire de master, Université 8Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018.
- [13] Kaddour Ahmed Mohamed, Ghorzi Sara, « L'Effet de la température sur la carbonatation du béton », mémoire de master, Université Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2020.
- [14] Fabien Gendron, « Carbonatation des matériaux cimentaires Étude de la diffusion du CO₂ », thèse, l'Université de la Rochelle, 2020.

- [15] Thiery. M, « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [16] CIM béton, « La durabilité des bétons, Collection technique », T48, 2006.
- [17] Fatima-Zohra, Dakhmouche Chabil, « carbonatation de bétons adjuvants a base de ressources locales algériennes », thèse en cotutelle internationale, Université d'Orléans, et de Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [18] Saidia Mohammed Aymen, Salah Salah Mounsi, « Influence de la corrosion dans les ouvrages en béton armé », mémoire de master, Université 8Mai 1945, Guelma, Algérie, 2020.
- [19] mouhamed salim kouadji, Dégradations au niveau de l'usine alzinc constatées et recommandations, Mémoire de mastère, Université de Tlemcen, 2013.
- [20] <https://sodiags.fr/contre-la-corrosion-protger-les-armatures-en-acier-dans-le-beton-avec-efficacite/> (consulté le 25/03/2025).
- [21] Zakaria Berrehouma, « Recherche bibliographique sur l'effet de la réaction alcali-granulaire sur la durabilité des bétons », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [22] Bouchard Jean-Baptiste, « Etude sur la durabilité des bétons armés en milieu marin Application aux caissons du projet d'extension en mer au droit de l'Anse du Portier », Monaco, Université de Lyon, 2016.
- [23] Azddine Karouite, « Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction », mémoire d'ingénieur, Ecole Hassania des Travaux publics, 2003.
- [24] Sara Chakri, « compréhension des mécanismes d'ingibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique », thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2015.
- [25] Soumia Kheira Sebsadj, « pathologies des bétons », polycopie de cours, Université des sciences et de la technologie d'Oran Med Boudiaf.
- [26] Rehamnia Nadjette, « contribution a l'étude de la réactivité potentielle des agrégats et étude des éléments vis-à-vis des sollicitations de traction par flexion », thèse de doctorat, Université badji mokhtar-Annaba, 2020.
- [27] https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/02-GASSER_141022_Agressions_attaques_beton_approche_performantielle_ENPC.pdf(consulté 18/03/2025).
- [28] Berredjem Layachi, « Le recyclage des bétons de démolition, Solution pour le développement durable, Formulation et comportements physiques et mécaniques des

- bétons à base de ces recyclés », Mémoire Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.
- [29] Touil Brahim, « étude de la diffusion des chlorures dans les bétons locaux », mémoire de magister, Université aboubekr belkaid – Tlemcen, 2009.
- [30] Hamzaoui Lazher, Meski Khaled, « Modélisation de l'attaque des chlorures dans le béton en présence d'incertitudes en utilisant le code « fib34 » » mémoire de master, Université Larbi Tébessi, Tébessa, 2020.
- [31] https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs34.html (consulté le 5/04/2025).
- [32] <https://fr.linkedin.com/pulse/h2s-comment-se-pr%C3%A9munir-de-la-bio-corrosion> (consulté le 08/06/2025).
- [33] https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs34.html (consulté le 5/04/2025).
- [34] Harik ChoaiB, « Effet inhibiteur de tensioactif anionique synthétisé à partir de gasoil algérien sur la corrosion de l'acier doux », mémoire de master, Université de Blida 1, 2017.
- [35] <https://www.aciersetplanchers.com/post/comment-prot%C3%A9ger-les-armatures-en-b%C3%A9ton-arm%C3%A9-de-la-corrosion-%C3%A0-l'aide-d-un-rev%C3%AAtement> (consulté le 7/04/2025).
- [36] Mohamed el mokhtar Mansouri, « étude de corrosion en utilisant les Inhibiteurs, Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs », mémoire de master, Université Mohamed KHider Biskra, 2014.
- [37] Allache Naila, Lassouani Naila, « Protection contre la corrosion de l'acier en milieu acide par les extraits de feuilles d'olivier », mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, 2018.
- [38] Teboula Aymen, Chouafa Salah, « étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des feuilles de figuier », mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023.
- [39] Chapitre II Théorie sur la corrosion et la protection des métaux <http://dSPACE.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11962/10/9Chapitre%20II%20th%C3%A9oriques%20de%20la%20corrosion.pdf> (consulté le 8/04/ 2025).
- [40] Kherbiche Douadi, KEMER Younes, « étude des causes de la corrosion des bacs de stockage de pétrole », Mémoire de Master, Ecole nationale supérieure des mines et métallurgie Amar Laskri, Annaba, 2020.

- [41] Clinton Chinogurei, « propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium », mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018.
- [42] Vargel. C, (2002) Corrosion de l'aluminium, Edition Dunod, ISBN 2-10-006569-6.
- [43] Kaoudj Fariza, Zioui Hayat, « Propriétés inhibitrices de l'extrait de la plante d'ortie vis-à-vis de la corrosion de l'acier XC38 en milieu H₂SO₄ », mémoire de master, Université A. M. Oulhadj, Bouira, 2020.
- [44] https://www.bil-bs.be/sites/default/files/projecten/galvanische_corrosie/galvanische_corrosie.jpg(consulté 11/04/2025).
- [45] Touahria Hadjer, « L'effet d'inhibiteur vert OFI (opuntia ficus indica) sur la corrosion d'un acier à béton RB14, Mémoire de master en Métallurgie », Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [46] Hamadi Latifa, « étude comparative de la corrosion localisée d'un acier ordinaire et d'un acier inoxydable », Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar Batna, 2014.
- [47] Houma Amira Roua, « Valorisation des déchets organiques dans la formulation des matériaux cimentaires (Caractérisation et optimisation) », mémoire de master, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2024.
- [48] M.DRA Rafik El Aeslene, Polycopie « corrosion ». Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas.
- [49] Zerarka Younes, « Medereg Benchohra, Stratégie de maintenance face à la corrosion des équipements industriels », mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022.
- [50] Khiati Zoulikha, Mrah Lahouari, « Polycopié de cours Corrosion et protection des métaux », Université des Sciences et de la Technologie, Mohamed Boudiaf, Oran, 2023. https://www.uni-usto.dz/images/coursenligne/CPM_ZK. Pdf.

Liste des norms

ISO 7539-3(1989): International standard « Corrosion of metals and alloys - Stress corrosion testing - Part 3: Preparation and use of U-bend specimens ».

La norme BNQ :normes minimales de qualité fournissent une marche à suivre et des données fiables aux producteurs et aux fournisseurs de services horticoles soucieux d'offrir à leur clientèle une garantie de qualité et de fiabilité.

CHAPITRE 3

PROTECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION

Chapitre 3 : Protection et Lutte contre la corrosion

3.1. Introduction

En raison de son faible coût et de ses caractéristiques mécaniques satisfaisantes, le béton armé est l'un des bétons le plus utilisé dans la construction des ouvrages en génie civil : bâtiments, ouvrages d'art, digue de barrage...

L'acier doux ou également appelé acier au carbone est la matière de base pour la fabrication des armatures (Ferrailage). L'exposition des aciers à des environnements acides ou salins peut entraîner d'importants dommages dus à la corrosion. L'une des stratégies les plus efficaces pour prévenir la corrosion en environnements acides est l'utilisation d'inhibiteurs. Ces derniers sont ajoutés à l'eau de gâchage au cours du malaxage du béton.

Il y a de nombreuses années, des inhibiteurs de corrosion efficaces, tels que les chromates et les phosphates synthétiques, étaient utilisés pour prévenir efficacement la corrosion de l'acier en milieux acides. Cependant, leur utilisation est actuellement presque abandonnée en raison de leur toxicité, de leur coût élevé et de leur impact négatif sur l'environnement. Cette situation a incité les chercheurs à rechercher d'autres types d'inhibiteurs, non seulement efficaces, mais aussi respectueux de l'environnement. Dans ce chapitre, on expose une bibliographie qui vise à assembler le maximum des travaux de recherches publiés dans cette filière.

La lutte contre la corrosion est un processus continu qui nécessite une approche intégrée, combinant diverses stratégies en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Elle est essentielle pour garantir la sécurité, la fiabilité et la durabilité des infrastructures, des équipements et des produits métalliques. En matière de protection contre la corrosion, il est possible d'agir sur le matériau lui-même (choix judicieux, formes adaptées, contraintes en fonction des applications, ...), sur la surface du matériau (revêtement, peinture, tout type de traitement de surface, ...) ou sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact (inhibiteurs de corrosion) [1].

3.2. Inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un produit chimique qui, lorsqu'il est ajouté en faibles concentrations au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion du métal en contact avec le milieu corrosif. L'action spéciale d'un inhibiteur de corrosion peut être complexe en raison du couple corrosif-métal qui est fonction de la température et des concentrations utilisées.

Pour qu'un inhibiteur soit efficace il doit satisfaire un certain nombre de critères [2]:

- 1) Réduire la vitesse de corrosion du métal sans nuire aux propriétés physicochimiques du milieu ou du métal.
- 2) Être stable aux températures d'utilisation et en présence d'autres constituants du milieu, en particulier avec les oxydants.
- 3) Être efficaces à faible concentration.
- 4) Respecter les normes de non toxicité.
- 5) Etre peu onéreux.



(a) sans inhibiteur de corrosion (b) avec inhibiteur de corrosion

Figure 3.1 : Métal au contact d'un milieu agressif [3].

3.3. Classification d'inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de différents critères, notamment leur nature (inhibiteurs organiques ou minéraux), leur réaction partielle (les inhibiteurs anodiques, les inhibiteurs cathodiques, les inhibiteurs mixtes), leur mécanisme d'action (adsorption et/ou formation d'un film). Ou leur origine artificiel ou naturel.

3.3.1. Selon la nature des inhibiteurs

3.3.1.1. Inhibiteurs organiques

Leur utilisation est actuellement préférée, au dépend des inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité évidentes.

Le mécanisme d'inhibition de ces composés organiques est lié à la formation d'une barrière plus ou moins continue, mais d'épaisseur finie, qui empêche la solution d'arriver au métal. Leur utilisation dépend dans une grande mesure de son prix de revient, on se tourne souvent vers les sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils possèdent au moins un hétéroatome servant de centre actif pour leur fixation sur le métal tel que l'azote, l'oxygène, le soufre ou le phosphore. L'augmentation de la température peut limiter énormément l'utilisation des molécules organiques comme inhibiteurs à cause de leur instabilité à haute température [4].

3.3.1.2. Inhibiteurs inorganiques (minéraux) :

Les inhibiteurs minéraux sont employés dans les environnements neutres/alcalins mais rarement dans les environnements acides. Ce sont généralement leurs produits de dissociation (anion ou cation) qui sont efficaces comme inhibiteurs de corrosion. Certains exemples courants d'inhibiteurs de corrosion minéraux incluent les sels de zinc, les phosphates de zinc, les chromates, les silicates et les molybdates. En raison de leur toxicité, leur application nécessite un suivi des réglementations environnementales d'utilisation [2].

3.3.2. Selon leur mode d'action

3.3.2.1. Inhibiteurs d'adsorption

Deux mécanismes d'interaction contribuent principalement à la liaison entre l'inhibiteur et la surface métallique : la physisorption (formation de liaisons faibles), et la chimisorption qui implique également la formation de liaisons fortes. Ces deux formes d'adsorption sont affectées par plusieurs facteurs, tels que la nature et la charge du métal, la structure chimique de l'inhibiteur organique, ainsi que le type d'électrolyte présent dans le milieu.

a) Adsorption physique : L'adsorption physique maintient l'identité des molécules adsorbées. On peut distinguer trois types d'interaction dans ce contexte : les interactions de Van der Waals qui sont toujours présentes, les interactions électrostatiques émanant de l'interaction entre les charges ioniques ou les dipôles présents dans les molécules inhibitrices et la surface métallique qui est électriquement chargée, et les liaisons hydrogène, qui se forment entre un donneur de liaison hydrogène et un accepteur, spécifiquement avec des atomes de N, O ou P portant des doublets libres.

b) Adsorption chimique (chimisorption) : qui met en jeu des liaisons chimiques covalentes ou de type hydrogène entre l'adsorbat et l'adsorbant. Contrairement à l'adsorption physique la chimisorption est irréversible puisque les énergies mises en jeu sont importantes. Ce type d'adsorption se développe à haute température et met en jeu une énergie de transformation élevée, l'adsorption chimique difficile et lente [5].

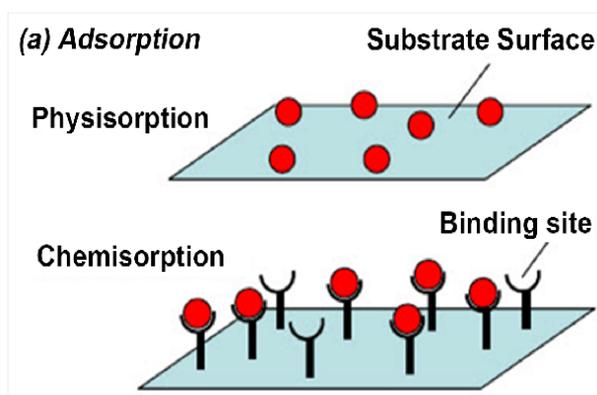


Figure 3.2 : Représentation de l'interaction de physisorption et de chimisorption entre la surface du substrat (adsorbant) et les molécules d'adsorbat [1].

3.3.2.2. Inhibiteurs passivants

Ce type d'inhibition, également appelé inhibition "d'interphase", c'est un film tridimensionnel entre la surface métallique corrodée et les molécules inhibitrices [6]. L'intégration également des inhibiteurs d'interphase dans les couches barrières, généralement sous forme de complexes. La création de réseaux homogènes et denses est favorisée par ces substances inhibitrices d'interphase, qui se distinguent par leur faible porosité et leur stabilité élevée [7].

3.3.3. Selon leur réaction partielle

Ce classement des inhibiteurs prend en considération la nature électrochimique de la corrosion en phase liquide, qui implique au moins deux réactions distinctes : une réaction anodique (dissolution du métal) et une réaction cathodique (réduction d'un oxydant de la solution).

3.3.3.1. Inhibiteurs anodiques

Elle est réservée aux métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif ($E_{corr} < E_{passif}$) [8].

Il existe une grande variété d'inhibiteurs anodiques, comprenant des substances inorganiques telles que les orthophosphates, les silicates, les chromates, etc. Leur mécanisme d'action vise à augmenter le potentiel de corrosion du matériau, permettant ainsi la formation d'un film passif protecteur sur l'anode. Bien que les inhibiteurs anodiques soient largement utilisés en raison de leur efficacité, ils présentent généralement une caractéristique indésirable. Lorsque la concentration en inhibiteur diminue progressivement, la surface métallique n'est plus complètement protégée. Dans ce cas, elle peut fonctionner comme une anode, créant ainsi une combinaison dangereuse où une petite partie devient l'anode et une grande partie la cathode,

favorisant ainsi la corrosion par piqûres. C'est pourquoi les inhibiteurs anodiques sont souvent considérés comme dangereux [1].

3.3.3.2. Inhibiteurs cathodiques

Ces inhibiteurs ralentissent la réaction cathodique (en bloquant la réduction de l'oxygène à une température d'air neutre ou en bloquant la réduction du proton H^+ à une température acide).

Un inhibiteur cathodique, en revanche, réduit la densité du courant de particules cathodiques et remplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif [9].

3.3.3.3. Inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs de corrosion qui augmentent la résistance ohmique de l'électrolyte sont considérés, dans certains cas, comme inhibiteurs filmant (anodique et cathodique). La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la surface du métal. Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas où le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion balance vers des valeurs négatives. Dans le cas de la formation d'un film sur les surfaces anodiques et cathodiques, le déplacement du potentiel de corrosion est du côté de la tendance prédominante. Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion [10].

3.3.4. Selon leur origine

3.3.4.1. Inhibiteurs de corrosion synthétiques

a) **Nitrites** : Divers composants nitrites ont été utilisés comme inhibiteurs de corrosion efficaces, notamment dans les environnements contaminés par les chlorures. La présence d'ions nitrites augmente la teneur FeII (fer dans son état d'oxydation $+2$) du film d'oxyde, ce qui entraîne la formation d'une couche d'oxyde plus épaisse et plus protectrice.

Das, J.K et al.2020 [11], ont également rapporté que les inhibiteurs de corrosion à base de nitrites, tels que le nitrite de sodium ($NaNO_2$), à raison de 3 % du poids du ciment, entravent significativement la diffusion des ions chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}) dans la matrice du béton [11]. Sideris et al.2005 [12], ont rapporté l'effet positif du $Ca(NO_2)_2$ sur la protection contre la corrosion de l'acier d'armature, mais cet effet dépend fortement du type de ciment. Cependant, Li, X et al.2020 [13], ont rapporté que l'ajout de nitrite de calcium à une concentration supérieure à 4 % du poids de ciment dans le mélange de béton diminue la

résistance à la compression à long terme, augmente le temps de prise de la pâte, réduire la demande en eau pour obtenir la consistance normale.

b) Amines : Les amines, telles que l'alcanolamine, la monoéthanolamine (MEA), la diéthanolamine (DEA) et la triéthanolamine (TEA), sont largement utilisées comme inhibiteurs de corrosion car elles (par exemple, l'alcanolamine) traversent la structure poreuse du béton pour atteindre la surface de l'acier d'armature et former un film protecteur. De plus, Batis, G. et al. 2008 [14], ont rapporté que ces types d'inhibiteurs peuvent réduire la migration des ions chlorure dans le béton et être classés comme inhibiteurs de corrosion mixtes en empêchant les réactions anodiques et cathodiques. Cependant, les propriétés mécaniques du béton ont considérablement diminué avec l'utilisation de ces types d'inhibiteurs. Selon Söylev et al. 2008 [15], une dose maximale de 1% d'inhibiteur a diminué la résistance à la compression du mortier de plus de 20%, en particulier aux premiers âges de 3 et 7 jours après la coulée, en raison du retard d'hydratation du ciment.

c) Carboxylates

Les carboxylates sont caractérisés par un groupe carboxylique ($-\text{COOH}$) dans leur structure. Ces matériaux sont considérés comme des donneurs de protons grâce à la charge électrique délocalisée sur les deux atomes d'oxygène du groupe carboxylique, qui forment une liaison avec la surface métallique. Les carboxylates se divisent en deux groupes principaux : les monocarboxylates et les polycarboxylates. L'inhibition de la corrosion de ces matériaux a été bien étudiée par Ormellese et al. 2011 [16]. Ils ont constaté que les polycarboxylates tels que le cyclohexancarboxyl, le succinate, le glutarate, le tartrate, le citrate et le fumarate présentent de meilleures performances et retardent significativement la corrosion localisée dans le chlorure de sodium 0,3 M présent dans la solution interstitielle.

d) Amides : Les amides sont des dérivés aminés d'acides carboxyliques. Les inhibiteurs de corrosion de type imide présentent une forte densité d'électrons dans le groupe imide, ce qui favorise l'adhésion au substrat métallique. Le substrat agit comme électrophile, et les inhibiteurs imides fournissent des électrons pour former une liaison avec lui. Les atomes fournissant des électrons à partager dans les structures imides sont principalement O, N et/ou S [17]. Certains amides et dérivés, tels que l'urée (U), la thiourée (TU), le thioacétamide (TA) et le thiosemicarbazide (TSC), sont connus pour être des inhibiteurs efficaces de l'acier doux en solutions acides. La structure des inhibiteurs et la localisation du groupe imide modifient considérablement l'efficacité et les performances de l'inhibiteur. Il a été constaté que lorsque

l'atome d'oxygène d'une molécule d'urée est remplacé par un atome de soufre (pour former une thiourée), l'efficacité de l'inhibition de la corrosion augmente considérablement [17].

e) Inhibiteurs hétérocycliques

Les inhibiteurs hétérocycliques présentent une structure cyclique avec un cycle contenant du carbone, de l'oxygène, de l'azote et du soufre. Le nombre de systèmes hétérocycliques possibles est illimité, car il est possible de produire différentes structures avec ces éléments. Cependant, les inhibiteurs de corrosion les plus courants présentant cette structure appartiennent aux imidazolines, aux thiazoles, aux triazoles, aux benzotriazoles et aux pyrazoles [18]. Cette classe d'inhibiteurs peut être utilisée à très faibles concentrations pour inhiber la corrosion de l'acier.

3.3.5. Inhibiteurs naturel (vert, écologique)

Les inhibiteurs de corrosion écologiques sont issus de produits naturels et d'extraits de plantes. Plusieurs recherches ont montré que les composés organiques, en particulier ceux contenant du N, S et O, présentent une efficacité d'inhibition significative. Cependant, la plupart de ces composés sont non seulement coûteux mais aussi toxiques pour les organismes vivants [1]. Ces impacts néfastes ont orienté les recherches vers les substances naturelles, qui pourraient aussi fournir des propriétés inhibitrices contre la corrosion des métaux et des alliages.

Les extraits végétaux sont désormais reconnus comme une source respectueuse de l'environnement, facilement accessible et renouvelable pour une variété étendue d'inhibiteurs. Ils contiennent une multitude d'ingrédients riches ayant une efficacité d'inhibition très élevée.

Actuellement, environ **3886** articles scientifiques abordent l'utilisation des extraits naturels de plantes comme inhibiteurs de corrosion. (Science Direct, Springer Link, Taylor & Franchis Online, 21 mai 2024) [19]. L'augmentation du nombre de publications révèle une tendance exponentielle soulignant ainsi l'intérêt de ce sujet. Cependant, l'acier et ses alliages ont particulièrement attiré l'attention des chercheurs en raison de leur utilisation répandue : 71% des articles publiés par année.

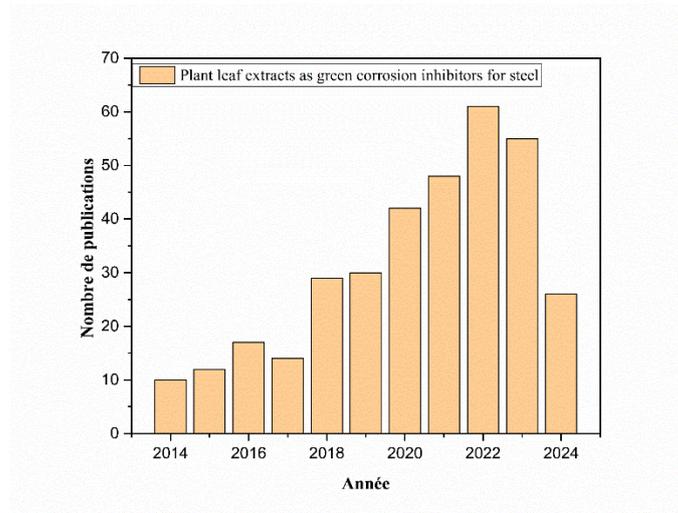


Figure 3.3 : Nombre de publications sur les inhibiteurs verts de corrosion de l'acier à base d'extrait de feuilles de plantes (base de données Scopus de 2014 à 2024) [19].

Les inhibiteurs verts sont largement utilisés pour la protection des métaux contre la corrosion dans plusieurs domaines en raison de:

- La diversité des espèces
- leur caractère renouvelable,
- de leur accessibilité
- leur coût relativement faible.
- Efficacité inhibitrice élevée
- facile a fabriqué et a appliqué

L'efficacité inhibitrice de ces matériaux dépend de nombreux facteurs,

- le pH du milieu corrosif,
- le type d'ions agressifs présents dans l'environnement,
- l'état moléculaire des inhibiteurs de corrosion.

Dans ce qui suit, nous allons donner un aperçu sur quelques plantes qui ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans le domaine de la corrosion de l'acier doux dans différents milieux agressifs.

L'efficacité inhibitrice a été calculée selon la formule suivante :

$$EI(\%) = \frac{V_{corr} - V'_{corr}}{V_{corr}} \quad (3.1)$$

V_{corr} et V'_{corr} représentent respectivement les vitesses de corrosion calculée sans et avec l'inhibiteur.

3.3.5.1. Extraits de feuilles de *Metasequoia glyptostroboides*

Xiong Sun.2024 [20] a démontré la capacité des extraits de feuilles de *Metasequoia glyptostroboides* d'agir comme inhibiteur de corrosion pour l'acier doux Q235 dans un milieu de HCl à 1M par l'analyse de la perte de masse, les méthodes de la spectroscopie d'impédance électrochimique et la polarisation potentiodynamique. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ont été utilisé comme des outils de caractérisation. Les surfaces des métaux ont été examinées à l'aide de la microscopie électronique à balayage, de la spectroscopie de dispersion d'énergie des rayons X, de l'angle de contact et de mesures de microscopie à force atomique. L'analyse de la perte de masse a montré qu'une concentration optimale d'extrait de 500 ppm, l'efficacité inhibitrice peut atteindre 83,62%.



Figure 3.4: Feuilles de *Metasequoia glyptostroboides*.

3.3.5.2. Extraits de feuilles d'olivier

Les extraits de de feuilles d'olivier contiennent une quantité impressionnante de composés chimiques précieux, notamment des molécules comportant de multiples atomes polaires et des liaisons riches en électrons, tels que : des antioxydants naturels, des minéraux, des vitamines, des composés phénoliques, des alcaloïdes, des flavonoïdes... etc. Cette richesse et diversité ont incité les chercheurs à tester les extraits de feuilles d'olivier comme inhibiteurs de corrosion.

G. Pustaja et al.2014 [21] ont étudié l'effet inhibiteur de l'extrait de feuilles d'olivier sur la corrosion de l'acier au carbone dans des solutions salines saturées en CO₂ à 25°C et 65°C à l'aide des courbes de polarisation (approximation de Tafel), des mesures de perte de poids et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. Des efficacités inhibitrices de 97,82% et de 99,26 % à une concentration de 300 mg L⁻¹ ont été obtenues à (25 et 65)°C respectivement.

H.M. Elabbasy et al.2019[22], ont testé l'effet des feuilles d'olivier en tant qu'inhibiteur de corrosion de l'acier dans une solution à 10 % d'acide sulfamique ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) à l'aide de la méthode de perte de masse, Ils ont trouvé que l'efficacité d'inhibition de 89,6 % à 400 ppm à 25°C.

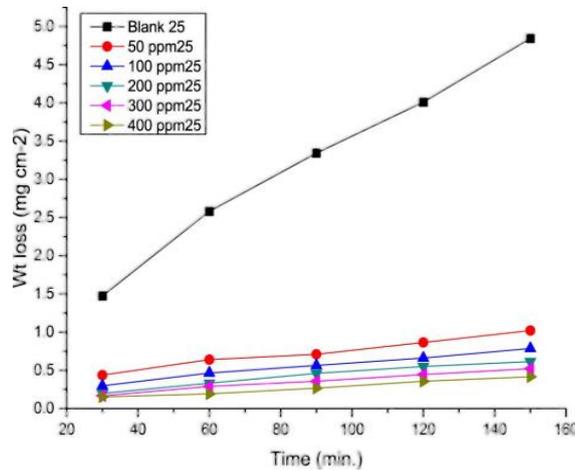


Figure 3.5: Efficacité inhibitrice d'extrait de feuilles d'olive [22].

Chérifa Elhady et al.2023 [23], ont étudié l'efficacité inhibitrice de l'extrait de feuilles d'olivier de l'acier au carbone. Ils ont utilisé un procédé rentable et respectueux de l'environnement (figure 3.6) d. Ils ont préparé plusieurs milieux avec différentes concentrations d'acide chlorhydrique (0,1, 1,0 et 2,0 M) et à différentes températures : 30, 45 et 60°C. Après huit heure d'immersion, ils ont trouvé que l'efficacité inhibitrice de corrosion augmente avec l'augmentation de la concentration de l'extrait de feuilles d'olivier. Pour une concentration de 60 ppm de l'extrait, l'efficacité est de 39,25%.

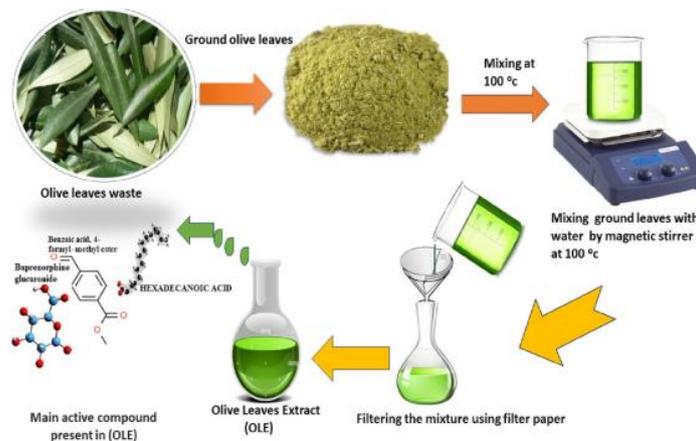


Figure 3.6: Exemple d'un procédé d'extraction écologique [23].

3.3.5.3. Extraits de feuilles d'Olea Europaea L

Driss Bouknana et al.2015 [24], ont examiné l'efficacité des extraits aqueux de feuilles, de racines et des tiges d'olivier (*Olea europaea* L.) sur la corrosion de l'acier doux dans une solution de HCl 1M en utilisant des mesures de la perte de masse à divers effets de température et de concentration. Des courbes de polarisation et des méthodes de spectroscopie d'impédance électrochimique ont été utilisées pour évaluer le taux de corrosion et l'efficacité inhibitrice. Des efficacités d'inhibition de la corrosion de 89,24, 88,84 et 89,83 % ont été obtenues par l'extrait des racines, tiges et de feuille d'olivier, respectivement.

3.3.5.4. Extraits de feuilles du Ficus carica

Taleb Ibrahima et al.2017 [25], ont étudié l'application de l'extrait de feuilles de *Ficus carica* comme inhibiteur de l'acier doux dans une solution aqueuse de chlorure de sodium (3,5%) saturée en CO₂. La résistance de polarisation linéaire, la spectroscopie d'impédance électrochimique, la théorie de la fonctionnelle de la densité et les simulations de dynamique moléculaire et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ont été exploitées. Une efficacité d'inhibition de 90 % a été obtenue avec une concentration optimale de 50 mg/L.

M.A. EL-Zekred et al.2021[26], ont examiné l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide H₂SO₄ par l'extrait de feuilles de *Ficus carica* en tant qu'inhibiteur durable respectueux de l'environnement. Cette étude a été menée en utilisant la méthode de perte de masse, la polarisation potentiodynamique, la modulation de fréquence électrochimique, la spectroscopie d'impédance électrochimique, la microscopie à force atomique et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. Les résultats montrent que le pourcentage d'efficacité d'inhibition augmente avec l'augmentation de la concentration et de la température et peut atteindre 95%.



Figure 3.7: Feuilles de *Ficus carica*.

3.3.5.5. Extraits de feuilles du Damsissa

Hanaa, M et al .2019 [27], ont étudié l'efficacité d'inhibition et l'effet de la température sur la corrosion de l'acier au carbone en l'absence et en présence de diverses concentrations d'extrait de Damsissa. Dans une solution de HCl 1 M et avec 300 ppm d'extrait de Damsissa à différentes températures (25, 30, 35, 40, 45°C), ils ont trouvé que la perte de poids augmente avec la température, de 25°C à 45°C pour 300 ppm. Ceci s'explique par la règle suivante : plus la température est élevée, plus l'efficacité augmente. Ils ont enregistré une efficacité de 92,7% pour une température de 45°C.

3.3.5.6. Extraits de feuilles des graines d'Esfand

Majd, M.T et al.2020 [28] ont montré la formation de complexes protecteurs et d'un film chélaté à la surface de l'acier au carbone en présence de l'extrait des graines d'Esfand. Cette couche formée avait une nature hydrophile, attribuée à la présence de composés organiques tels que les composés mercapto, amine, hydroxyle, phosphate et carboxyliques de l'extrait. L'efficacité inhibitrice de l'Esfand à une concentration de 1000 ppm était supérieure à 93% après 219h d'immersion dans une solution de chlorure à 3,5%, ce qui est comparable à celle d'autres inhibiteurs organiques synthétiques.



Figure 3.8: Graines d'Esfand.

3.3.5.7. Extraits de feuilles de cônes de conifères

Subbiah, K et al.2021[28], ont utilisé une concentration de 1000mg/L dans une solution de pores synthétique de NaCl (0,8M) pendant 720h en présence de l'extrait de cônes de conifères. Ils ont constaté que l'efficacité d'inhibition de la corrosion de cette concentration est supérieure à 81%. Le mécanisme identifié en deux étapes d'inhibition de la corrosion du cône de conifère consiste en une adsorption physique dans sa phase initiale, compte tenu de la présence de divers types de groupes carboxyliques et aminés dans l'extrait, puis une adsorption chimique comme deuxième étape sur une durée d'immersion plus longue.



Figure 3.9: Cônes de conifères.

3.3.5.8. Extraits des tanins

Les tanins sont également connus comme des inhibiteurs de corrosion, leur structure osseuse est constituée de résidus d'acide d'ail, qui sont liés au glucose par des liaisons glycosidiques, et comprend différents groupes fonctionnels tels que l'hydroxyle et le carboxyle.

Les tanins peuvent être adsorbés à la surface du métal corrodé en raison de la présence de ces composés actifs [30]. L'efficacité inhibitrice du tanin à une concentration de 140 ppm dans 1M HCl a été étudiée par Oki, M et al.2011[30]. Ils ont rapporté que l'efficacité d'inhibition est d'environ 72%, ce qui est supérieur à certains inhibiteurs de corrosion conventionnels tels que H_3PO_4 . L'application des tanins ne se limite pas aux environnements acides.

La performance des tannins dans l'eau de mer en conditions cycliques humide/sec a été évaluée, et son efficacité d'inhibition a été estimée à 86 % en raison du blocage de la réaction cathodique à la surface de l'acier et de la formation d'une couche dense de tannates ferriques. De plus, le $FeOOH$ formé lors de la réduction cathodique en cycle humide/sec a réagi avec le tannin présent dans la solution. [31].



Figure 3.10: Plante de Tanin

3.3.5.9. Extraits de la gomme de Guar

Venkatesh et al.2022, [32], ont mélangé de la gomme de Guar à (0,5, 1,0, 1,4 et 1,5)% dans du béton avec un rapport eau/liant constant de 0,45. Ils ont rapporté que l'ajout de 1,4 % de gomme de Guar protégeait efficacement l'acier de construction de la corrosion. Le mécanisme de protection contre la corrosion de cet inhibiteur, selon l'analyse de la densité d'états (DOS),

repose sur la charge négative de la surface métallique avant l'absorption électrostatique des molécules inhibitrices protonées à la surface de l'acier. Dans un deuxième temps, les électrons des atomes O et les électrons pi des cycles des inhibiteurs ont été adsorbés à la surface métallique, réduisant ainsi la dissolution anodique du métal. Cette étude montre que la gomme de Guar améliore non seulement la protection contre la corrosion, mais entraîne également une augmentation des propriétés mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression (jusqu'à 23,2 %) et la résistance à la traction par fendage



Figure 3.11: la gomme de Guar

3.3.5.10. Extraits de Juglans Regia

Une étude réalisée par Haddadi, S.A et al.2019 [33] a montré qu'un ajout de 1000 ppm d'extraction de Juglans regia (JRS) a augmenté l'efficacité d'inhibition des plaques d'acier testées à 94 % dans une solution de chlorure de sodium à 3,5 %. Cette efficacité d'inhibition considérable a été attribuée à des groupes fonctionnels tels que l'hydroxyle, le carboxyle et le carbonyle qui existent dans les composants à base phénoliques de l'extrait de Juglans regia. Ces groupes fonctionnels améliorent la capacité du JRS à s'adsorber électrostatiquement et/ou covalentement sur la surface métallique et limitent ensuite considérablement les réactions de corrosion des substrats métalliques.



Figure 3.12: Juglans regia

3.3.5.11. Extraits de d'Artémisa Herba Alba

Bouhira Zouhir et al.2023 [34], ont étudié de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (x70) par l'extrait d'Artémisa Herba Alba dans le milieu acide sulfurique H₂SO₄, 0,5

M, en ajoutant de l'huile essentielle d'Artemisia Herba Alba à des concentrations différentes: (0,125, 0,250, 0,5, 1,2)g/L, L'effet de la concentration et de la température sur les processus de corrosion en l'absence et en présence d'inhibiteur a été examiné par des mesures de perte de masse, L'expérience a été réalisée à différentes températures: 30, 50, 70C°. Les résultats ont montré que la relation entre la température et le taux d'inhibition est oscillante, et le taux d'inhibition maximal obtenu était de 94,69%, Il convient de noter que le maximum d'inhibition est atteint avec une concentration de 1 g/L d'huile essentielle



Figure 3.13: d'Artémisa Herba Alba

3.3.5.12. Extraits de cladodes de l'Opuntia Ficus Indica (O.F.I.)

Touahria Hadjer. 2019[35], a étudié le comportement corrosif d'un acier de fer à béton (RB14) aux milieux corrosif 0,3% 1% et 3% (NaCl) en absence et présence d'un inhibiteur de corrosion vert (cladodes de l'Opuntia Ficus Indica (O.F.I.) à différentes concentrations 0%, 5%, 10%, 15%, 20%. L'expérience a été réalisée à la température ambiante (25C°) et après différentes heures d'immersion (24, 48, 72, 96, 120)h, Les résultats montrent que 95,3% d'efficacité est atteinte à une concentration de 20ml et par conséquent, cet extrait aqueux des cladodes de l'Opuntia Ficus Indica (O.F.I.) est un inhibiteur de corrosion d'efficacité moyenne utilisé pour les aciers à béton [35].



Figure 3.14: L'opuntia ficus Indica.

Dans le travail de Oulabbas amel.2019 [36], les cladodes du figuier de barbarie appelé en botanique *Opuntia Ficus Indica* (O.F.I) provenant de l'Est Algérien (Chétaibi- Annaba) sont utilisés pour étudier l'efficacité inhibitrice à des concentrations différentes concentration (1, 2,4, 6, 8,10, 20)% sur l'acier ordinaire XC52 et dans trois milieux acides, 1M H_3PO_4 ,0,5M H_3PO_4 et 0.5M H_2SO_4 et après différentes heure d'immersion (24 , 48,72,96,120, 420)h, les résultats obtenus montrent que 97,6% d'efficacité inhibitrice est obtenue avec la concentration de 10%(v/v) d'O.F.I.

3.3.5.13. Extraits de Réglisse

L'étude menée dans le travail de Zaim wahiba.2021 [37] a porté sur l'inhibition de la corrosion d'un acier doux XC 42 par le composé organique de l'extraits de Réglisse dans un milieu corrosif 0.05M Na_2SO_4 pour deux concentration (2% et 0,5% de Réglisse), le temps d'immersion (7, 14, 21) jours. Les résultats obtenus par la méthode de la perte de masse, montrent que l'efficacité de l'inhibiteur n'est pas liée au temps, mais à la concentration l'inhibiteur. l'efficacité inhibitrice de la Réglisse augmente avec la diminution de sa concentration et atteint 88,23% pour 0,5% de Réglisse.



Figure 3.15: Réglisse.

3.3.5.14. Extraits de feuille de *Luffa cylindrica*

OO, Ogunleye et al.2020 [38], ont étudié l'inhibition de la corrosion de l'acier doux (MS) immergé dans une solution de HCl 0,5M avec l'extrait de feuille de *Luffa Cylindrica*. Ils ont utilisé la mesure gravimétrique de profondeur d'attaque, et la technique d'analyse de surface. Ils ont utilisé des concentrations d'inhibiteur (0,50, 0,75, 1,00g/l), des températures (30 – 60) °C et les temps d'immersion (4, 8, 12) h. Ils ont constaté que l'efficacité d'inhibition s'est améliorée avec l'augmentation des concentrations d'inhibiteur et a diminué avec l'augmentation de la température et à une concentration de 1,0g/L, l'extrait s'est avéré être un excellent inhibiteur avec une efficacité de 87,89%.



Figure 3.16 : Plante Luffa Cylindrica.

3.3.5.15. Extraits des feuilles d’Aloe Vera

Oulabbas amel.2019 [36] a utilisé un inhibiteurs verts à savoir les feuilles d’Aloe Vera à des concentrations de (1, 2, 4, 6, 8, 10, 20)% sur aciers ordinaires XC52 et dans trois milieux acides, 1M H_3PO_4 , 0.5M H_3PO_4 et 0.5M H_2SO_4 . Après différentes heures d’immersion (24, 48, 72, 96, 120, 420) h, les résultats obtenus montrent que pour la concentration de 10%(v/v) d’Aloe Vera l’efficacité est de 80.9%.



Figure 3.17: Aloe vera.

3.3.5.16. Extraits de feuilles du palmier d'arec (Areca Catechu)

Ghoreishiamiri et al.2021[39], ont comparé l’effet de deux types d’inhibiteurs de corrosion: inhibiteur vert (l’extraits de feuilles de palmier d'arec) et inhibiteur synthétique (nitrite de sodium (un inhibiteur de corrosion commercial)). Ils ont étudié la variation de la résistance à la compression, la perte de poids et l’imagerie par la microscopie électronique à balayage à émission de champ (FESEM) d’un béton armé mélangé à 5% de NaCl et de $MgSO_4$ comme matériaux corrosifs. Les résultats ont montré que les performances du béton contenant 2% par poids de ciment du palmier d'arec sont comparable à celle du béton contenant le nitrite de sodium. Ils ont aussi observé des surfaces relativement plus homogènes et une structure plus

lisse dans le béton contenant les inhibiteurs. Ce comportement est lié selon les mêmes hauteurs à la formation du gypse à texture dense. L'échantillon de béton sans inhibiteurs présente une structure ettringitique détériorée en raison d'une forte quantité de brucite insoluble ($Mg(OH)_2$) dissolvant le C-S-H. Cependant, cette recherche n'a pas indiqué le principal groupe actif de l'inhibiteur de corrosion lors de son extraction.



Figure 3.18: Palmier d'arec

3.3.5.17. Extraits de Gingembre

Liu et al.2019[40], ont étudié l'effet de l'extrait de gingembre sur la corrosion induite par le chlorure de l'acier au carbone dans une solution de pores de béton simulée. Ils ont constaté que 2 % de l'extrait de gingembre a retardé l'initiation de la corrosion en raison de la formation d'un film organique carboné sur les zones anodiques et cathodiques de la surface de l'acier. Néanmoins, l'efficacité d'inhibition de l'extrait de gingembre par rapport aux inhibiteurs de corrosion traditionnels tels que les nitrites de sodium est significativement plus faible.



Figure 3.19: Gingembre.

3.3.5.18. Extrait de feuilles de Fatsia japonica (FJLE).

Wang Qihui et al.2023 [41], ont étudié les performances de l'extrait de feuilles de Fatsia japonica (FJLE) et ont signalé une efficacité d'inhibition de la corrosion aussi élevée que 89,6 % à 1 000 mg/L. Cette amélioration a augmenté avec le temps d'immersion et a atteint la valeur de 91,2 %. Le mécanisme d'amélioration de l'inhibition de la corrosion au fil du temps a été expliqué par la gravité électrostatique du FJLE et son adsorption sur la surface de l'acier.

Dans la deuxième étape, l'interaction des électrons non appariés des hétéroatomes (de FJLE) avec les orbitales « d » du Fe se produit, et finalement les orbitales « d » du Fe interagissent avec les électrons de la molécule inhibitrice [41].



Figure 3.20 : Feuilles de Fatsia japonica (FJLE)

3.3.5.19. Extraits des feuilles *Allium Sativum* (Ail), *Pétroselinum Crispum* (Persil) et *Atractylis Flava Desf*

Benarioua Mokhtar.2019 [42], a étudié l'inhibition de la corrosion de l'acier A60 en milieu acide 1M HCl par les extraits de feuilles de trois plantes : *Allium Sativum* (Ail), *Pétroselinum Crispum* (Persil) et *Atractylis Flava Desf*, les tests réalisés à différentes concentrations de ces inhibiteurs et après 24 heures d'immersion dans HCl et à température ambiante 25°C, les résultats obtenus par les méthodes des tests gravimétriques, montrent que la vitesse de corrosion de l'échantillon a été significativement réduite avec l'addition de l'inhibiteurs et que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteurs, avec une meilleure efficacité de 87,65% de l'extrait (PCE), (86,43%) cette dernière est considérée comme la meilleure efficacité de (ASE), et 88,91% de l'extrait d'*Atractylis Flava Desf*. L'effet inhibiteur de ces extraits est attribué à l'adsorption des composants actifs sur la surface de l'échantillon, confirmée par les tests d'impédance électrochimique.



Figure 3.21 : le Persil.



Figure 3.22 : l'ail.



Figure 3.23 : l'Atractylis Flava Desf.

3.3.5.20. Les inhibiteurs de corrosion à base d'huile

Les inhibiteurs de corrosion à base d'huile sont principalement utilisés dans les solutions acides ou saumâtres, car les acides gras contenus dans la solution alcaline initient une réaction de moussage. Baraa Hafez et al.2019 [43], ont étudié L'huile d'eucalyptus commerciale présente un effet inhibiteur considérable sur la corrosion de l'acier doux dans une solution de HCl 1,0 M, Pour réaliser cette étude ils procédés l'inhibiteur a différents concentrations (0,25, 0,5, 1)% et différents températures (40, 55, 65, 7)°C, les résultats obtenus par les méthodes de perte de poids l'extrait s'est avéré être un excellent inhibiteur avec une efficacité de 95%.

Cependant, Oguntade, T.I et al.2009 [44], ont signalé que les huiles de sésame et de ricin étaient des inhibiteurs de corrosion efficaces pour l'acier en solution saline grâce à des composés insaturés tels que les acides oléique, stérique et palmitique, qui interagissent avec les ions fer et forment un film protecteur à la surface de l'acier. Divers types d'huiles végétales biocompatibles, telles que les huiles de lin, de tournesol, de ricin, de tung (TO), de soja (SBO) et de coco (CCO), ont été utilisées dans l'industrie comme principaux composants de peintures ou de plastifiants [45].

L'application de l'huile de lin a suscité plus d'intérêt que celle des autres huiles végétales, notamment dans les revêtements fissurés ou les mortiers, comme agent de cicatrisation ou d'étanchéité dans une matrice [46].

Le domaine des inhibiteurs de corrosion verts est un domaine de recherche très étendu et différents chercheurs ont signalé la faisabilité de l'utilisation des matériaux verts comme inhibiteurs de corrosion, néanmoins, des recherches plus approfondies sont nécessaires pour envisager des applications pratiques de ces matériaux verts dans le béton.

3.4. Récapitulatif des recherches ultérieures

Tableau 3.1 : Exposition des résultats des travaux de littérature.

Inhibiteur / Milieu corrosif	Solvant/Température	Type d'inhibiteur	Type d'adsorption/ Isotherme	Méthode	EI%	Réf
Feuilles d'olivier / HCl, 1M	Méthanol/Eau (70/30) / 60 °C	Mixte	Physisorption / -	Perte de masse, polarisation et FTIR	89,83	[1]
Feuille d'olivier / HCl, 2M	Eau distillée / 100°C	Mixte	Physisorption / Langmuir	Perte de masse, polarisation et voltammétrie cyclique	93,00	[19]
Feuille d'olivier / NH ₂ SO ₃ H 10%	Eau bidistillée / 100°C	Mixte	Physisorption / Langmuir	Perte de masse, polarisation, EIS et EFM	89,60	[22]
Feuilles d'olivier / Saumure alcaline CaCl ₂	Eau distillée / 70 °C	Anodique	Physisorption_ chimisorption	Polarisation, EIS et photo-micrographique optique	83,00	[1]

Feuilles d'olivier / Carbonate de chlorure saturé en CO ₂	/	Mixte	/	Polarisation, EIS et FTIR	95,78	[1]
Feuilles d'olivier / HCl, 1M	Méthanol/Eau (80/20)	Mixte	Physisorption_ chimisorption / Langmuir	Perte de masse, Polarization	87,42	[19]
Feuilles d'olivier / HCl, 1M	Eau distillée / 40°C	Mixte	Chimisorption / Langmuir	Polarisation, EIS, Perte de masse, UV-VIS, UV-VIS dérivée, FTIR, FTIR dérivée, MEB DRX et rugosité 3D	93,21	[1]
Feuilles de Ficus carica / milieu pétrolier	Ethanol/45°C	Mixte	Physisorption/ Langmuir	Polarisation	80	[1]
Feuilles de Ficus Carica / H ₂ SO ₄ , 0,5M	Ethanol	Mixte	Chimisorption / Temkin	Perte de masse, polarisation, EIS, EFM, FTIR et AFM	95,7	[1]
Feuilles de Ficus Carica / 3,5 % NaCl solution saturée de CO ₂	Eau bidistillée / 80 °C	Mixte	Physisorption / Langmuir	Polarisation, EIS, MEB, FTIR et Dynamique Moléculaire	90	[25]
Feuilles de Ficus Carica / HCl, 2M	Eau bidistillée / 100°C	Mixte	Physisorption / Langmuir	Perte de masse, polarisation et EIS	87	[19]
Feuilles de Ficus Carica / HCl, 1M	Eau bidistillée / 40°C	Mixte	Chimisorption / Langmuir	EIS, polarisation Perte de masse, UV-VIS, UV-VIS dérivées, FTIR, FTIR dérivées, MEB, DRX et rugosité 3D	94,42	[1]
Feuille d'olive /10% d'acide sulfurique NH ₂ SO ₃ H	Eau bidistillée		Physisorption	Perte de masse, polarisation et EIS et MEB et I.M.F.E	89,6	[19]
Banana peel extract /0,1M Hcl	Eau bidistillée / 70°C	/	/	Perte de masse et la méthode electrochimique	87	[47]
Potato peel /2M Hcl	Eau distillé	Mixte	Physisorption	Perte de masse et la méthode electrochimique.	> 70	[48]
Damcissa /1M Hcl	Eau distillé/100°C	Mixte	Physisorption	Perte de masse, la méthode electrochimique, FTIR, Atomique force.	92,6	[27]
Huile de eucalyptus /1M Hcl	Hcl dissous	Mixte	Physisorption	Perte de masse, courbe de polarisation, SIE, MEB, microscopie (AFM).	95	[43]
Huile d'Artémisa Herba Alba	Hydrodistillation	/	Physisorption	Pert de masse	88,08	[34]
Huile d'olive/Hcl	Eau distillé	Mixte	Physisorption	Perte de masse,	39,25	[23]

L'opuntia ficus indica /Nacl	/100°C Eau distillé/ féiltration	Mixte	Température ambiante	Anova. Perte de masse, électrochimique, polarisation ,SIE ,microscopie optique .	95,3	[35]
Huile de réglisse /Na ₂ SO ₄	Hydrodistilation	Mixte	Température ambiante	Pert de masse	88,23	[37]
Feuille de luffa cylindrica	Ethanol	Mixte	Chimisorption	Pert de poids	87,98	[38]
-Aluim Sativum (Ail) /Hcl,1M	Hcl	Mixte	Physisorption	Perte de masse, courbe de polarisation	86,43	[42]
-Petroselinum Crispum(persil) /Hcl,1M	Hcl	Mixte	Physisorption	Perte de masse, courbe de polarisation	87,73	[42]
- Atractylis Flava Desf/Hcl,1M	Hcl	Mixte	Physisorption	Perte de masse, courbe de polarisation	87,00	[42]
Grignon D'olive	Eau distillé/60°C	Mixte	Température ambiante	Perte de masse, courbe de polarisation, SIE.	84,64	[46]
-O.F.I /H ₃ PO ₄ /H ₂ PO ₄	/	Mixte	Température ambiante	Perte de masse, courbe de polarisation, SIE, XPS	97,6	[36]
-Aloe Vera /H ₃ PO ₄ /H ₂ PO ₄	/	Mixte	Température ambiante	Perte de masse, courbe de polarisation, SIE, XPS	80,9	[36]
Les tanins Hcl NaOH	/	/	/	/	86 72	[30]
Cônes de Conifres /Nacl	Ethanol	/	Physisorption/ Chimisorption	Perte de masse, électrochimique, polarisation, SIE	81	[29]
Graines d'esfand / Hcl	/	/	/	/	93	[28]
Extrait de farine de gluten de maïs,			Adsorption des groupes amides		88,10	[49]
Gomme de guar/ H ₃ PO ₄	/	/	Physisorption	Pert e masse	85	[32]
l'extrait de feuilles de Fatsia japonica	/	Adsorption	/	/	91,2	[41]

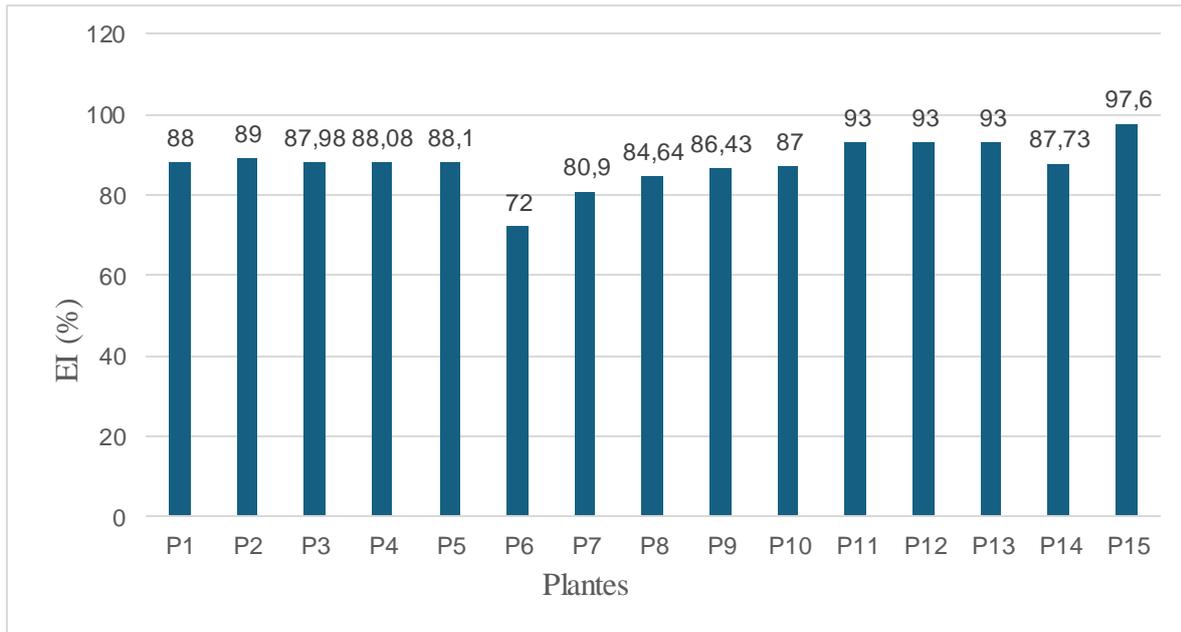


Figure 3. 24 : Variation de l'efficacité inhibitrice en fonction des plantes.

Tableau 3.2 : Abréviation des plantes.

P1 : Feuille d'olivier.	P2 : Feuille de figuier.	P3:Feuille de luffa cylindrica
P4: Artemisa herba alba.	P5 : Farine de gluten de maïs.	P6: Les tanins.
P7 : Aloe vera.	P8 : Grignon d'olive.	P9: Aluim sativum.
P10: Atractylis Flava Desf.	P11 :Feuilles d'olivier et de figuier.	P12 : Huile d'eucalyptus
P13 : Graines d'esfand.	P14 : Petroselinum Crispum.	P15:Opuntia ficus indica

3.5. Conclusion

Le choix approprié des inhibiteurs de corrosion dépend de leur efficacité et des groupes actifs correspondants, de leur concentration effective, de leur toxicité, de leur coût et de leur disponibilité commerciale. Pour des raisons environnementales, les extraits de plantes sont des substances parfaites pour remplacer les produits organiques synthétisés et d'autres inorganiques coûteux et toxiques. En général, certains inhibiteurs de corrosion verts peuvent afficher une efficacité de protection contre la corrosion allant jusqu'à 94%, comparable à celle des inhibiteurs synthétiques courants. L'efficacité de protection contre la corrosion peut même être améliorée jusqu'à 99% en extrayant le groupe fonctionnel de ces matériaux organiques verts.

Ces extraits de plantes (feuilles, les racines, les tiges) contiennent plusieurs constituants et substances physico-chimiques pouvant facilement être adsorbés et inhibent la corrosion des aciers des armatures ou du béton armé dans des milieux corrosifs.

A la fin de ce chapitre, nous proposons les extraits de trois plantes :

- Feuilles de Ficus carica.
- l'Opuntia Ficus Indica.
- Feuilles d'Aloe Vera.

Références Bibliographiques du Chapitre 3

- [1] Rahmouni Halima, «Extraits de feuilles de figuier et d'olivier comme inhibiteurs verts de corrosion de l'acier en milieu acide : Approche expérimentale et théorique», THÈSE de doctorat, Université 8mai 1945Guelma ,2024.
- [2] Khiati Zoulikha, «Corrosion et protection des métaux», Polycopié de cours, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran -Mohamed BOUDIAF-Oran, 2023.
- [3] Douadi Ibrahim, Beladjal Abderrahmane, «étude de l'efficacité d'inhibiteur de corrosion champion utilisé dans le champ de Hassi Messaoud», mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [4] Deghamna Marwa, Boumellit Zeyneb, «Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel», mémoire de master, Université 8mai 1945 Guelma, 2019.
- [5] Ben CHennaf Samah, «étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des plantes», mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2023.
- [6] P. Lorbeer, W.J. Lorenz, *Electrochim. Acta.* 25 (1980) 375–381.
- [7] P. Bommersbach. Thèse Génie des Matériaux, INSA de LYON, N° 05ISAL0060 (2005) 154.
- [8] Kaoudj Fariza, Zioui Hayat, «Propriétés inhibitrices de l'extrait de la plante d'ortie vis-à-vis de la corrosion de l'acier XC38 en milieu H₂SO₄», mémoire de master, Université A. M. Oulhadj, Bouira, 2020.
- [9] KHadraoui Abdelkader, «Extraction et pouvoir bio-inhibiteur de substances naturelles d'origine végétale vis-à-vis de la Corrosion acide de l'acier», thèse de doctorant, université de Blida 1, 2014.
- [10] Belloufi Abderrahim, «Comportement à la Corrosion d'un Acier Doux, dans un Milieu à Différents pH, en Présence de ZnCl₂», mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2010.
- [11] Das, J.K. Pradhan, B. Long Term «Effect of Corrosion Inhibitor and Associated Cation Type of Chloride Ions on Chloride Profile of Concrete Exposed to Composite Chloride-Sulfate Environment». *Mater. Today Proc.* 2020, 32, 803–809.
- [12] Sideris, K.K.; Savva, A.E, «Durability of Mixtures Containing Calcium Nitrite Based Corrosion Inhibitor», *Cem. Concr. Compos.* 2005, 27, 277–287.
- [13] Li, X.; O'Moore, L.; Wilkie, S.; Song, Y.; Wei, J.; Bond, P.L.; Yuan, Z.; Hanzic, L.; Jiang, G, «Nitrite Admixed Concrete for Wastewater Structures: Mechanical Properties, Leaching Behavior and Biofilm Development», *Constr. Build. Mater.* 2020, 233, 117341.

- [14] Batis, G.; Pantazopoulou, P.; Routoulas, A, «Corrosion Protection Investigation of Reinforcement by Inorganic Coating in the Presence of Alkanolamine-Based Inhibitor». *Cem. Concr. Compos.* 2003, 25, 371–377.
- [15] Söylev, T.A.; Richardson, M.G, «Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete: State-of-the-Art Report», *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 609–622.
- [16] Ormellese, M.; Bolzoni, F.; Lazzari, L.; Brenna, A.; Pedefferri, M, «Organic Substances as Inhibitors for Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete», *Mater. Corros.* 2011, 62, 170–177.
- [17] Fang, J.; Li, J, «Quantum Chemistry Study on the Relationship between Molecular Structure and Corrosion Inhibition Efficiency of Amides», *J. Mol. Struct. Theochem* 2002, 593, 179–185.
- [18] Yoo, S.H.; Kim, Y.W.; Chung, K.; Baik, S.Y.; Kim, J.S, «Synthesis and Corrosion Inhibition Behavior of Imidazoline Derivatives Based on Vegetable Oil Corros», *Sci.* 2012, 59, 42–54.
- [19] Halima Rahmouni, Soraya Nigri , Mouna Nacef, Rabah Oumeddour, Abed Mohamed Affoune, «Analysis of Fig Leaf Extract as Steel Eco-friendly Corrosion Inhibitor in Acidic Medium: Electrochemical, Gravimetric, Spectroscopic, and Surface Studies, Analytical and Bioanalytical Electrochemistry», p 142 -162 (2024).
- [20] Xiong Sun, «Highly efficient and durable water electrolysis via ligand modulated interfacial assembly», December 2024 *Applied Catalysis B Environmental* 359:124530, (2024).
- [21] Pustaja. G., F. Kapora.; Kvasnička.; *Int. J. Mater. Res.* 105 (2014) 992-998).
- [22] Elabbasy, H. M.et Fouda, A. S, «Olive leaf as green corrosion inhibitor for C-steel in Sulfamic acid solution», *Green Chem. Lett. Rev.* 12, 332–342. <https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1646812> (2019).
- [23] Chérifa Elhady, Hatice Inan1 Mahmoud Shaaban, Irene S. Fahim, «étude de l'extrait de feuille d'olivier comme inhibiteur potentiel de corrosion respectueux de l'environnement pour l'acier au carbone», *Rapports scientifiques*, (2023).
- [24] D. Bouknana.; B. Hammouti.; H. Serghini caid.; S. Jodeh.; A. Bouyanzer.; A. Aouniti, I. Warad, *Int J Ind Chem.* 6 (2015) 233–245.
- [25] Taleb Ibrahim 2017, «Mild steel green inhibition by Ficus carica leaves extract under practical field conditions», *Journal of Adhesion Science and Technology* <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1317458>.
- [26] M.A. EL-Zekred.; A.M. Nofal.; K. Shalabi.; A.S. Fouda, «Ficus carica extract as environmentally friendly inhibitor for the corrosion of L-80 carbon steel in 0.5M H₂SO₄ media». *Journal of the Indian Chemical Society* Volume 98, Issue 9, September 2021, 100128.

- [27] Hanaa M. Elabbasy, Samir M. Zidan, Abd El-Aziz S. Fouda, «Inhibitive behavior of ambrosia maritima extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in 1M HCl», *Zastita Materijala* 60 (2) 129 - 146 (2019).
- [28] Majd, M.T.; Ramezanzadeh, M.; Bahlakeh, G.; Ramezanzadeh, B, «Steel Corrosion Lowering in Front of the Saline Solution by a Nitrogen-Rich Source of Green Inhibitors: Detailed Surface, Electrochemical and Computational Studies», *Constr. Build. Mater.* 2020, 254, 119266.
- [29] Subbiah, K.; Lee, H.S.; Mandal. ; S.; Park, T, «Conifer Cone (Pinus Resinosa) as a Green Corrosion Inhibitor for Steel Rebar in Chloride-Contaminated Synthetic Concrete Pore Solutions», *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13, 43676–43695.
- [30] Oki, M.; Charles, E.; Alaka, C.; Oki, T.K, «Corrosion Inhibition of Mild Steel in Hydrochloric Acid by Tannins Rom Rhizophora Racemosa», *Mater. Sci. Appl.* 2011, 02, 592–595.
- [31] Qian, B.; Hou, B.; Zheng, M, «The Inhibition Effect of Tannic Acid on Mild Steel Corrosion in Seawater Wet/Dry Cyclic Conditions Corros», *Sci.* 2013, 72, 1–9.
- [32] Venkatesh, G.; Kamal, C.; Vennila, P.; Kaya, S.; Annaamalai, M.G.L.; Ibrahim, B, «El Sustainable Corrosion Inhibitor for Steel Embedded in Concrete by Guar Gum: Electrochemical and Theoretical Analyses», *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2022, 12, 100328.
- [33] Haddadi, S.A.; Alibakhshi, E.; Bahlakeh, G.; Ramezanzadeh, B.; Mahdavian, M. A, «Detailed Atomic Level Computational and Electrochemical Exploration of the Juglans Regia Green Fruit Shell Extract as a Sustainable and Highly Efficient Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 3.5wt% NaCl Solution», *J. Mol. Liq.* 2019, 284, 682–699.
- [34] Bouhrira Zouhir, Douaba Ahmed, «étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone par l'extrait d'Artémisa Herba Alba dans le milieu acide sulfurique 0.5 M», *Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla*, 2023.
- [35] Touahria Hadjer, «l'effet d'inhibiteur vert OFI (opuntia ficus indica) sur la corrosion d'un acier à béton RB14», *mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba*, 2019.
- [36] Oulabbas Amel, «effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides», *thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba*, 2019.
- [37] Zaim wahiba, «étude de l'inhibiteur le Réglisse sur le comportement à la corrosion de l'acier XC42», *mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra*, 2021.
- [38] O.O. Ogunleye. ; A.O. Arinkoola. ; O.A. Eletta, O.O. Agbede. ; Y.A. Osho. ; A.F. Morakinyo. ; J.O. Hamed, «Caractéristiques d'inhibition de la corrosion verte et d'adsorption de Luffa cylindrica extrait de feuille sur acier doux dans un environnement d'acide chlorhydrique», 2020.
- [39] Ghoreishiamiri, S.; Raja, P.B.; Ismail, M.; Karouei, S.F.H.; Forouzani, P, «Areca Catechu: An Eco-Friendly Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete Structures in Corrosive Mediums», *J. Bio-Tribo-Corros.* 2021, 7, 1–5.

- [40] Liu, Y.; Song, Z.; Wang, W.; Jiang, L.; Zhang, Y.; Guo, M.; Song, F.; Xu, N, «effect of Ginger Extract as Green Inhibitor on Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solutions», *J. Clean. Prod.* 2019, 214, 298–307.
- [41] Wang, Q.; Wu, X.; Zheng, H.; Liu, L.; Zhang, Q.; Zhang, A.; Yan, Z.; Sun, Y.; Li, Z.; Li, X, «Evaluation for *Fatsia Japonica* Leaves Extract (FJLE) as Green Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solutions», *J. Build. Eng.* 2023, 63, 105568.
- [42] Benarioua Mokhtar, «étude de l’Inhibition de la Corrosion d’un Acier Doux en Milieu Acide par l’Emploi d’Inhibiteurs à Base de Plante», thèse de doctorat, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2019.
- [43] B. Hafez, M. Mokhtari, H. Elmsellem and H. Steli, «Environmentally friendly inhibitor of the corrosion of mild steel: Commercial oil of Eucalyptus», *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2019, 8, no. 3, 573–585 .
- [44] Oguntade, T.I.; Ita, C.S.; Oyekunle, D.T.; Oni, T.P.; Ojo, T.; Ekere, I.E, «Inhibition of Mild Steel Corrosion Using Binary Mixture of Sesame and Castor Oil», *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1378, 042009.
- [45] Mirabedini, S.M.; Farnood, R.R.; Esfandeh, M.; Zareanshahraki, F.; Rajabi, P, «Nanocomposite Coatings Comprising APS-Treated Linseed Oil-Embedded Polyurea-Formaldehyde Microcapsules and Nanoclay, Part 2: Self-Healing and Corrosion Resistance Properties», *Prog. Org. Coat.* 2020, 142, 105592.
- [46] Houma Amira Roua, «Valorisation des déchets organiques dans la formulation des matériaux cimentaires (Caractérisation et optimisation) », mémoire de master, l’Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2024.
- [47] C. Bala Manikandan.; S.Balamurugan.; P.Balamurugan.; S.Lionel.; Beneston.; «Corrosion Inhibition of Mild Steel by using Banana Peel Extract », *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-6, April 2019.
- [48] Taleb H.; Ibrahim.; Youssef Chehade.; Mohamed Abou Zour.; «Corrosion Inhibition of Mild Steel using Potato Peel Extract in 2M HCl Solution», *International Journal of electrochemical science* 6 (2011) 6542 - 6556, www.electrochemsci.org .
- [49] Zhang, Z.; Ba, H.;Wu, Z. Sustainable «Corrosion Inhibitor for Steel in Simulated Concrete Pore Solution by Maize Gluten MealExtract: Electrochemical and Adsorption Behavior Studies », *Constr. Build. Mater.* **2019**, 227, 117080.

CONCLUSIONS

GENERALES

Conclusions générales

Ce manuscrit porte sur une synthèse bibliographique sur le matériau béton, ses pathologies et la lutte contre la corrosion.

Le béton est un matériau constitué de plusieurs matières, son comportement dépend des caractéristiques de chaque constituant, ses types sont fonction des usages, des caractéristiques souhaitées et de sa mise en œuvre.

La durabilité du béton est conditionnée non seulement par la qualité des constituants (ciments, granulats et eau), et sa mise en œuvre (dosage, vibration) mais aussi des conditions environnantes (température, humidité et le pH du milieu d'implantation).

L'exposition du béton à des charges modérées, aux intempéries et aux attaques chimiques agressives (dioxyde de carbone, les chlorures, les sulfates) entraîne sa dégradation physico-chimiques et mécaniques.

Lorsque les aciers sont introduits dans le béton frais, il se produit une oxydation de la surface de l'armature grâce au caractère alcalin de la matrice cimentaire pH supérieur à 13, Une fine couche d'oxyde est formée à la surface de l'armature, cette couche dans un premier temps protège le béton contre la corrosion et ce phénomène est appelé la passivation de l'armature.

Une la couche de passivation est brisée, la corrosion aura lieu. La corrosion des armatures se manifeste par des éclats du béton d'enrobage, des épaufrures locales ou la présence de taches de rouille sur le parement. Elle engendre une perte de section de l'acier pouvant entraîner sa rupture fragile et une altération de la capacité portante de la structure.

L'inhibiteur de corrosion est l'une des stratégies les plus efficaces pour prévenir la corrosion en environnements acides ou salin.

En raison de leur toxicité, de leur coût élevé et de leur impact négatif sur l'environnement, l'utilisation des inhibiteurs de corrosion synthétiques tels que les nitrites, les chromates et les phosphates est actuellement abandonnés. Cette situation a incité les chercheurs à rechercher d'autres types d'inhibiteurs, non seulement efficaces, mais aussi respectueux de l'environnement.

Les inhibiteurs de corrosion écologiques sont issus de produits naturels et d'extraits de plantes et plus particulièrement ceux qui contiennent les éléments N, S et O.

Les extraits végétaux sont désormais reconnus comme une source respectueuse de l'environnement, facilement accessible et renouvelable pour une variété étendue d'inhibiteurs.

Ils contiennent une multitude d'ingrédients riches ayant une efficacité d'inhibition très élevée qui dépend de la concentration des groupes fonctionnels.

L'extraction aqueuse (à l'eau et chauffage) est la méthode d'extraction la plus économique.

Efficacité inhibitrice varie d'une plante à une autre, elle dépasse 99% pour les feuilles d'olivier, l'extraits de feuilles de *Metasequoia glyptostroboides* avec une efficacité inhibitrice de 83,62% ; extraits de feuilles du *Ficus carica* : 90 % et 95%, extraits de feuilles du *Damsissa* : 92,7%, extraits de feuilles des graines d'*Esfand* : 93%, extraits de feuilles de cônes de conifères : 81% et l'Extraits des tanins : 72% , extraits de cladodes de l'*Opuntia Ficus Indica* (O.F.I.) : 97,6%, extraits de *Juglans Regia* : 94 % ,extraits de d'*Artémisa Herba Alba* : 94,69%,

extraits de *Juglans Regia* : 94 % , extraits de d'*Artémisa Herba Alba* : 94,69%, extraits de feuille de *Luffa cylindrica* : 87,89 et extraits des feuilles d'*Aloe Vera* : 80,9%.

Cette synthèse bibliographique, montre aussi l'effet positif de l'addition de ces extrait sur les caractéristiques du béton, ils améliorent non seulement la protection contre la corrosion, mais entraîne également une augmentation des propriétés mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression (jusqu'à 23,2 %) et la résistance à la traction par fendage ainsi une amélioration des propriétés physiques comme la densité, c'est le cas de l'extrait de la gomme de Guar et du palmier d'arec.

Finalement, nous proposons les extraits de trois plantes suivantes:

- Feuilles de *Ficus carica*.
- Cladodes de l'*Opuntia Ficus Indica*.
- Feuilles d'*Aloe Vera*

ANNEXE

Fiche technique: Feuilles de Ficus carica.



Origine : Australie et Afrique du sud.

Famille : Moracées

Type de feuilles : vertes et caduques,

Environnement approprié : chaud et sec en été, doux en hiver.

Principaux groupes actifs: Flavonoïdes, Polyphénols, Tanins, Saponines, Composés antioxydants (quercétine, acide gallique, lutéoline)

Applications possibles:

- ✓ Utilisées comme inhibiteurs de corrosion verts dans les environnements acides (HCl, H₂SO₄).

Mécanismes d'action:

- ✓ Adsorption des molécules actives sur la surface du métal.
- ✓ Formation d'un film protecteur.
- ✓ Réduction de réaction d'oxydation.

Précautions à prendre:

- ✓ Choisir un extrait de qualité pour garantir son efficacité.
- ✓ Tester l'efficacité de l'extrait dans des conditions spécifiques avant de l'appliquer à grande échelle.
- ✓ Prendre les précautions de sécurité en de contact avec la peau et d'ingestion (non toxique).

Fiche technique: l'Opuntia Ficus Indica (O.F.I.)

Origine : Mexique, le bassin méditerranéen et en Afrique du Sud.

Famille : Cactaceae

Type de feuilles : des cladodes verts menées des glochides piquantes.

Fruits : Figuier de Barbarie



Environnement approprié : un climat chaud et une exposition bien ensoleillée. Il préfère un sol filtrant et bien drainé, de pH neutre.

Principaux groupes actifs: phénoliques (180,3 mg/g).

Applications possibles: Protection de l'acier doux contre la corrosion (milieux acides).

Mécanismes d'action:

✓ Les composés bioactifs, comme les mucilages, s'adsorbent sur la surface du métal, formant une couche protectrice.

Précautions à prendre:

✓ Choisir un extrait de qualité pour garantir son efficacité.

✓ Tester l'efficacité de l'extrait dans des conditions spécifiques avant de l'appliquer à grande échelle.

✓ Prendre les précautions de sécurité en termes de contact avec la peau et d'ingestion (non toxique)

Fiche technique: Aloe Vera



Origine : Barbades

Famille : Aloacées, anciennement Liliacées

Type de feuilles : feuille persistantes, piquantes, coriaces, allongées et vertes.

Environnement approprié : des températures supérieur à 5°C.

Principaux groupes actifs: Polyphénols et des polysaccharides.

Applications possibles:

- ✓ Protection des métaux contre la corrosion : le zinc et l'acier doux (milieux acides).
- ✓ Protection des systèmes de circulation d'eau.
- ✓ Protection des équipements dans l'industrie pétrolière.
- ✓ Protection des structures métalliques contre la corrosion atmosphérique.

Mécanismes d'action:

- ✓ Formation une couche protectrice sur la surface du métal.
- ✓ Ces composés peuvent interagir avec les ions métalliques, réduisant la vitesse de la réaction de corrosion.

Précautions à prendre:

- ✓ Choisir un extrait de qualité pour garantir son efficacité.
- ✓ Tester l'efficacité de l'extrait dans des conditions spécifiques avant de l'appliquer à grande échelle.
- ✓ Prendre les précautions de sécurité en termes de contact avec la peau et d'ingestion (non toxique)