

CHAPITRE I

Pathologies Des Ouvrages Causes Et Désordres

I.1 INTRODUCTION

Le béton armé est un matériau de base des structures largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. Sa conception de durabilité repose sur plusieurs facteurs tel que la composition des matériaux, les conditions d'exploitation, les dimensions structurelles, la mise en œuvre et le manque d'entretien ainsi de suite.

Cette diversité des facteurs permet la manifestation des pathologies apparentes ou cachées, ces dernières se développent progressivement avec le temps en aggravant la situation plus en plus jusqu'à la ruine totale de l'ouvrage.

Donc la première étape qui nous permette la lutte contre ces pathologies c'est la compréhension approfondie des phénomènes déclencheurs et les désordres résultants ces pathologies, il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quelle sont les différentes pathologies manifestants dans un ouvrages en béton ?
- Quelle sont leurs natures, leurs étendues et leurs potentialités d'évolution ?

I.2 GENERALITE SUR LES PONTS

I.2.1 Définition

Un pont est un ouvrage qui permet de franchir ou d'enjamber tout obstacle naturel (oued, ravin) ou voie de circulation (route, autoroute, chemin de fer, canal). Les aqueducs pour le passage de canalisations et les passerelles pour piétons sont considérés aussi comme des ouvrages de franchissement pour l'un ou l'autre de ces obstacles.

Suivant les caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage, on distingue :

- **La buse** : ouvrage de forme cylindrique pour le passage de l'eau.
- **Le ponceau** : ouvrage de petites dimensions (≥ 2 m).
- **Le viaduc** : ouvrage de grande hauteur à travées ou ouvertures successives.

I.2.2 Classification Des Ponts

I.2.1.1 Intérêt de la classification

La classification des ouvrages a pour objectif de faire mieux connaître la nature et le type d'ouvrage composant le parc national et le degré de complexité de leurs structures, de mettre en place une politique de gestion conséquente aux exigences et priorités de maintien en service dans

les conditions de sécurité conformes aux usagers, et d'évaluer le coût d'entretien et le budget annuel à allouer à cette opération

I.2.1.2 Classification

La classification des ouvrages est effectuée sur la base des critères suivants :

- a) **La nature de la voie portée** on distingue le pont-route, pont-rail, aqueduc et pont pour avion.
- b) **La géométrie** : pont droit, pont courbe et pont biais.
- c) **La nature du matériau utilisé** (dans la réalisation des éléments porteurs) : pont en bois, pont en maçonnerie, pont métallique (fonte, fer, acier), pont en béton armé et pont en béton précontraint.

On introduit ici la notion de pont « mixte » dont les éléments porteurs sont en acier à lesquels on associe une dalle collaborant en béton armé ou précontraint, participant dans la résistance générale à la flexion du tablier.

- d) **Leur fonctionnement** : il ya trois grandes catégories, à savoir, pont à poutres (éléments porteurs parallèle à l'axe du pont), pont en arc (éléments porteurs en arc, encastrés ou articulés, générant des poussées horizontales aux appuis) et les ponts suspendus (tablier suspendu à deux câbles porteurs principaux ancrés dans des massifs d'ancrage au niveau des culées, passant aux sommets de pylônes et supportant le tablier par l'intermédiaire de suspentes.

Couramment, la classification adoptée se rapporte plus à la structure du tablier qui est la partie plane de l'ouvrage qui permet de porter la voie de communication et de raccorder entre les deux rives de l'obstacle. Dans le cas des portiques et des ponts en voûtes, la structure d'ensemble de l'ouvrage assure cette classification.

On distingue alors :

- ✓ Pont voûté (maçonnerie, béton)
- ✓ Portique (tablier encastré sur piles).
- ✓ Pont à poutres (sous chaussée, latérales)
- ✓ Pont en caisson (unicellulaire, bicellulaire)
- ✓ Pont dalle (pleine, élégie, nervurée)

- ✓ Pont haubané (tablier soutenu par des câbles obliques et rectilignes).
- ✓ Pont en arc (à tablier inférieur, supérieur ou intermédiaire).
- ✓ Pont suspendu.

Un autre critère de classification lié à la méthode d'exécution donne son nom à certains types de tablier, à savoir :

✓ **Pont en encorbellements successifs** : le tablier est constitué d'une succession de voussoirs montés en encorbellement de part et d'autre d'une pile ou à partir de la culée. Les voussoirs sont préfabriqués ou coulés sur place au moyen de coffrage glissant. Cette technique de construction est apparue avec le développement de la précontrainte.

✓ **Pont cantilever** : la travée est constituée de consoles qui sont le prolongement des travées adjacentes ou encastrées sur les piles, et d'une travée centrale indépendante et de longueur réduite s'appuyant sur ces consoles.

La standardisation de certains types d'ouvrages sur autoroutes, en vue d'uniformiser l'aspect esthétique et architectural des passages supérieurs et inférieurs, et notamment avec le développement de l'informatique et du calcul automatique de structures d'ouvrages, a conduit à la constitution de dossiers pilotes pour les ouvrages ou structures de petites portées, comme suit :

- **PS-BA** : Passage Supérieur à poutres continues en Béton Armé.
- **TI-BA** : Passage Supérieur à Travées Indépendantes en poutres (portée comprise entre 16 et 26 m) en Béton Armé.
- **PI-PO** : Passage Inférieur à Portique Ouvert (portée ≤ 20 m).
- **PI-CF** : Passage Inférieur à Cadre Fermé (portée ≤ 10 m).
- **PSI-DA** : Passage Supérieur Inférieur à Dalle en Béton Armé.
- **POD** : Passage à Portique Double (portée de la travée ≤ 20 m).

Remarque

Chaque type d'ouvrage est constitué de plusieurs éléments variant selon le type, la grandeur et la situation de l'ouvrage, ainsi que chaque élément de structure ou partie d'ouvrage est désigné par un terme propre et bien précis qui permet de le distinguer et même de le situer dans la structure d'un ouvrage donné. L'ensemble de cette terminologie constitue le vocabulaire de la nomenclature des ouvrages d'art. La définition d'un vocabulaire unifié est une étape

fondamentale dans la mise en application du programme de surveillance et suivi de nos ouvrages. (Voire Annexe A).

I.3 ACTIONS ET PATHOLOGIES AGISSANTS SUR LES PONTS

I.3.1 Action Des Eaux

Le béton n'est pas le seul matériau vulnérable aux processus physiques et chimiques de dégradation liées à l'eau. Par conséquent, il est souhaitable d'examiner de manière générale les caractéristiques de l'eau qui font le principal agent de la destruction des matériaux solides. L'eau se trouve sous diverses formes, telles que l'eau de mer, les eaux souterraines, eaux de rivière, l'eau de lac, la neige, la glace et la vapeur, est sans doute le liquide le plus abondant dans la nature. Les molécules d'eau sont très petites et, par conséquent, sont capables de pénétrer dans les pores très fins ou des cavités. En tant que solvant, l'eau est réputée pour sa capacité à dissoudre plus de substances que tout autre liquide connu. Cette propriété représente la présence de nombreux ions et gaz (gaz carbonique en forme de H_2CO_3) dans certaines eaux qui, à leur tour, deviennent contribué à provoquer la décomposition chimique des matériaux solides. En outre, l'eau a la plus forte chaleur de vaporisation parmi les liquides commune, par conséquent, à la température ordinaire, il a tendance à exister à l'état liquide dans un matériau poreux, plutôt que de vaporisation et de laisser les matériaux secs. Par ailleurs, avec des solides poreux, les mouvements de l'humidité interne et les transformations structurelles d'eau sont connus pour provoquer des changements de volume perturbateurs de nombreux types. Par exemple, la congélation de l'eau en glace (voire gel dégel), la formation d'une structure ordonnée de l'eau dans les pores fins, le développement de la pression osmotique due à des différences de concentration ionique, et l'accumulation de pression hydrostatique par des pressions de vapeur différentielle peut conduire à de fortes contraintes internes.

I.3.1.1 Action de l'eau de mer [38]

La plupart des eaux de mer sont assez uniforme dans leur composition chimique, qui se caractérise par la présence d'environ 3,5 % des sels solubles en masse. Les concentrations ioniques de Na^+ et Cl^- sont les plus élevés, généralement 11 000 et 20 000 mg / l, respectivement. Cependant, du point de vue de l'action agressive sur les produits d'hydratation de ciment, des quantités suffisantes de Mg^{2+} et SO_4^{2-} sont présents, généralement 1400 et 2700 mg / L respectivement.

Le béton exposé à l'environnement marin peuvent se détériorer en raison des effets combinés de l'action chimique des constituants d'eau de mer sur les produits d'hydratation du ciment, alcali-

granulat d'expansion (lorsque des granulats réactifs sont présents), la pression cristallisation des sels dans le béton, si une face de la structure est soumise à de mouillage et d'autres à des conditions de séchage, action du gel dans les climats froids, la corrosion de l'acier encastré dans les membres armés ou précontraint, et l'érosion physique due à l'action des vagues et des objets flottants. Attaque sur le béton en raison de l'une de ces causes tend à augmenter la perméabilité, non seulement rendre le matériel de plus en plus sensible à d'autres mesures par le même agent destructeur, mais aussi par d'autres types d'attaque, la **figure I.1** illustre les différentes attaques de l'eau de mer.

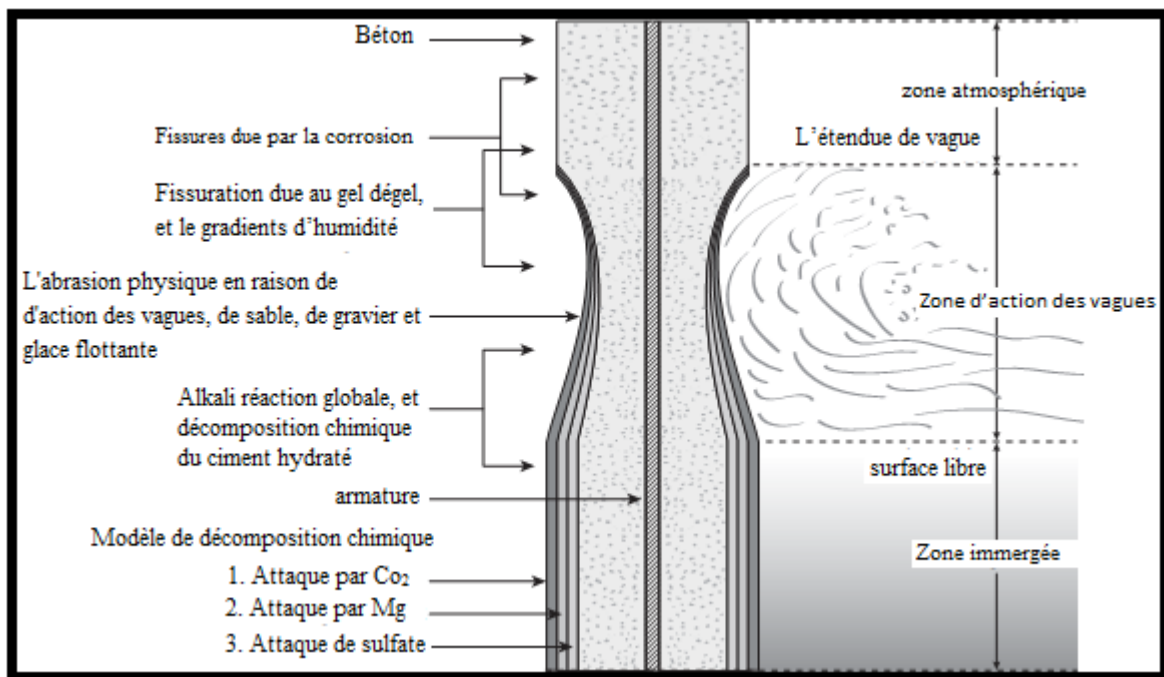


Figure I.1 : Représentation schématique d'un cylindre en béton armé exposé à l'eau de mer [38]

I.3.1.2 Action Mécanique De L'eau

I.3.1.2.1 Les Affouillements

Se manifestent autour des appuis de pont implantés dans un cours d'eau et surviennent lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau qui entoure une fondation est élevée, l'eau écoulée se compose d'un mélange bi-phasique comporte une phase liquide et une phase solide (transport solide). L'action de l'eau est tellement violente qu'elle est capable de dénuder (déchausser) un massif de fondation et de rendre une construction instable, des ouvrages en entier sont emportés ou détériorés et les remblais d'accès en général sans protection sont affouillés, créant des points de coupure sur des axes névralgiques.

Ce type de problème se pose en pratique

- ✓ autour de tout massif support de structure installé en rivière et qui en perturbe l'écoulement, engendrant à son pourtour des vitesses de fluides élevées,
- ✓ à proximité des évacuations hydrauliques d'un ouvrage de retenue, barrage,
- ✓ Les ouvrages hydrauliques de type « cadre fermé » introduisent des rétrécissements importants des sections hydrauliques offertes à l'écoulement une très grande vitesse .

Les affouillements de piles en rivière ont été la cause historique prédominante dans les dégradations et destruction de ponts au cours des siècles passés. La situation est meilleure de nos jours en raison des techniques modernes d'exécution de travaux en rivière (les travaux des fondations) et des possibilités d'exécution d'ouvrages de grande portée réduisant le nombre de piles en rivière.

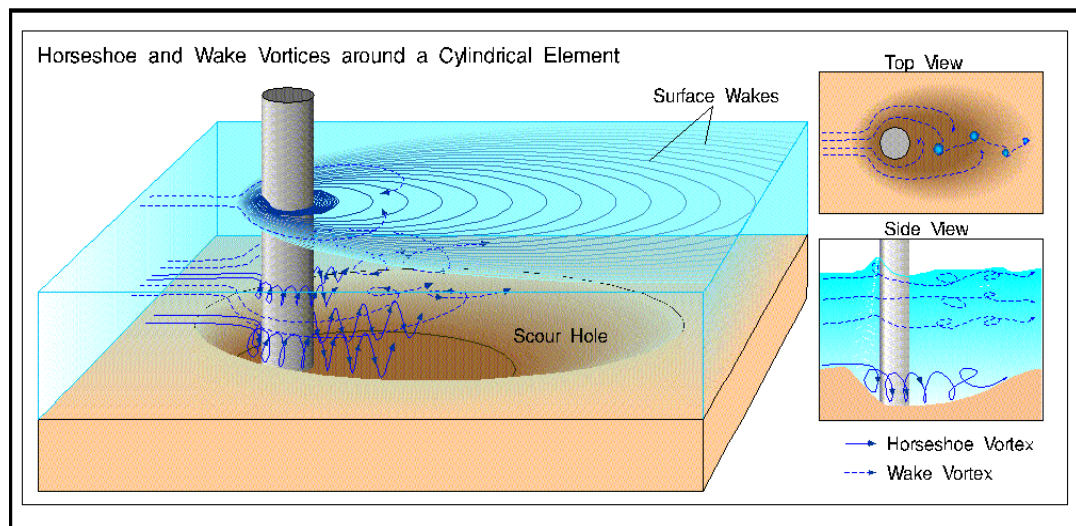


Figure I.2 : Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont [56]

I.3.2 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'aluminate de calcium hydraté) aux sels de calcium [10].

Tell que

- L'action de l'acide chlorhydrique conduit à la formation de chlorure de calcium, qui est très soluble;

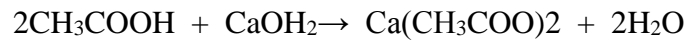


- acide sulfurique donne du sulfate de calcium, qui précipite sous forme de gypse ;

- 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

En raison de ces réactions, la structure du ciment durci est détruite selon le mécanisme présent par la Figure I.3.

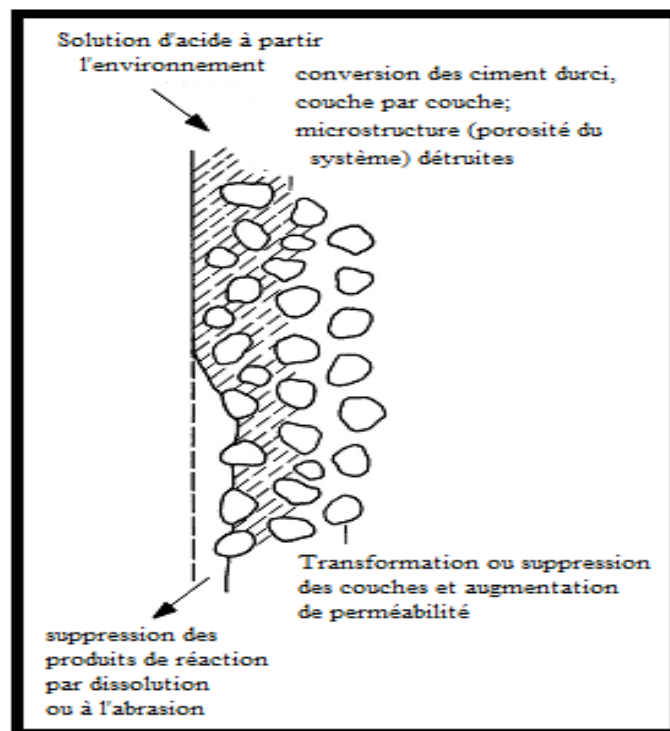


Figure I.3 : Mécanisme des attaques par les acides [10]

Le taux de réaction des différents acides avec du béton n'est pas déterminée par l'agressivité de l'acide, mais par la solubilité du sel de calcium qui en résulte.

I.3.3 L'attaque des Sulfatiques

I.3.3 .1 Présentation

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement connus ni maîtrisés, elle est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l'attaque sulfatique interne, qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton, de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès que les conditions externes sont réunies

I.3.3 .2 L'origine des Sulfates

Les sulfates peuvent avoir de différentes origines

a) *Origines Intérieures*

- ils peuvent provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, héli-hydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent en proportion variable.
- les sulfates continus dans le clinker lui-même : sulfate alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_3$) et solution solides dans les silicates de calcium [26].
- ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats ou de l'eau de gâchage pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle [38].

b) *Les origines extérieures* [8]

- Action des eaux souterraines sulfatées, les concentrations les plus élevées sont en général dues à la présence de sulfates de magnésium ($MgSO_4$) ou de sulfates alcalins (K_2SO_4 ; Na_2SO_4).
- Action de l'eau de mer (contenant 2,2 g/l de $MgSO_4$);
- Action de remblais ou de sol contenant des sulfates (exemple des remblais constitués de schiste houiller) ;
- Action des pluies acides emmenant avec elles le dioxyde de soufre contenu dans l'atmosphère.
- -dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (carbone, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.

I.3.3 .3 Les Produits Résultants de l'attaque

Trois types de composés peuvent se former en fonction de la concentration en sulfate de l'eau, du pH environnant, et de la température: L'ettringite, **Le gypse** et **La thaumasite**.

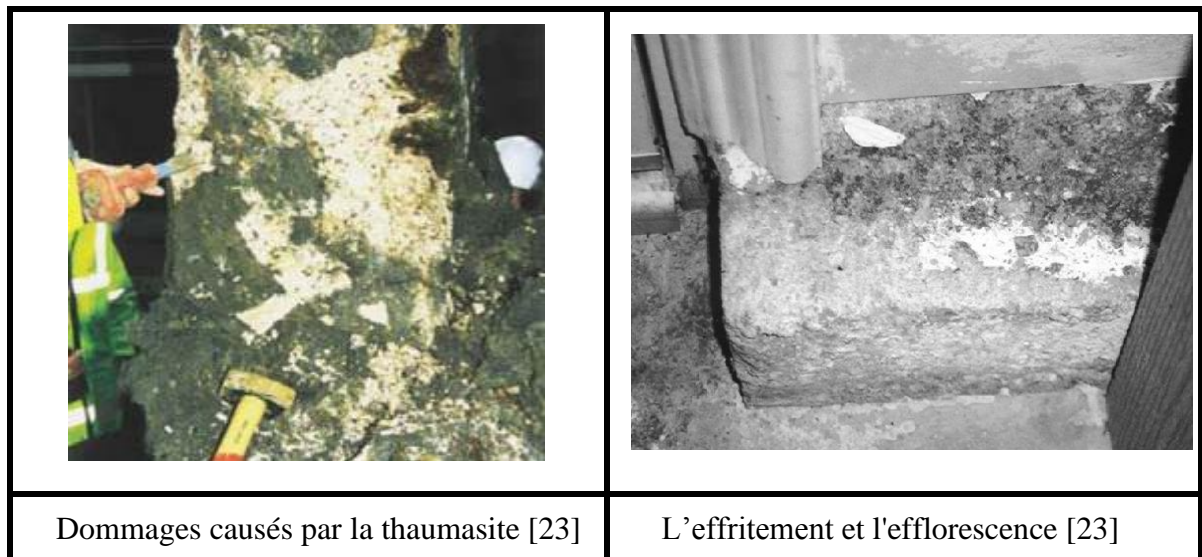


Figure I.4 : Exemples des structures dégradées attaquées par les sulfates.

I.3.3 .4 Les conséquences des réactions Sulfatiques [23]

Les mécanismes complexes d'attaque des sulfates peuvent conduire aux diverses modifications chimiques et physiques dans le béton.

a) Les modifications chimiques elles peuvent inclure ce qui suit

- 1- Une élimination de Ca^{2+} de certains produits d'hydratation (par exemple: décomposition d'hydroxyde de calcium et de C-S-H, ou les deux);
- 2- Changements inhabituels dans la composition de la solution interstitielle;
- 3- Formation de silice hydratée (gel de silice);
- 4- Décomposition des minéraux du clinker non hydraté encore;
- 5- Dissolution des produits d'hydratation préalablement formé;
- 6- Formation d'ettringite (supérieure à celle formée à partir de sulfate d'origine dans le ciment), le gypse et traumatise ;
- 7- Formation de magnésium contenant des composés tels que l'hydroxyde de magnésium (brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$) et d'hydrate de silicate de magnésium;
- 8- Recristallisation répétée de l'anhydrite sulfate de sodium (thénardite- Na_2SO_4) to / frome sulfate de sodium déca-hydraté (mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et
- 9- La pénétration dans le béton des espèces ioniques et la formation ultérieure et de cristallisation des sels tels que NaCl , K_2SO_4 , MgSO_4 ...etc.

b) Les modifications physiques

Les changements physiques visibles sont la conséquence des changements chimiques au-dessus et peut inclure :

- 1- Une restructuration complète de la structure des pores et de la microstructure solides , qui mène à l'augmentation de la porosité et de la perméabilité;
- 2- Une expansion volumétrique et une génération des microfissuration;
- 3- Formation de circonférence complète ou partielle des jantes ou des lacunes (des fissures d'expansion coller) autour des particules d'agrégats;
- 4- Surface de l'écaillage, délamination, l'effritement et l'efflorescence ;
- 5- Une diminution de la dureté qui est le résultat de la dulcification de la pâte,;
- 6- Dépôts de sels sur les surfaces et les fissures d'exfoliation;
- 7- Une perte de résistance mécanique ce qui implique la diminution de module d'élasticité.

I.3.4 L'alcali-Réaction

Pendant de nombreuses années, les agrégats étaient censés être essentiellement inertes et chimiquement non réactifs dans les mélanges de béton. Malheureusement, ce n'est souvent pas vrai, les agrégats sont actifs et entrent dans une réaction qui présente l'une des pathologies du béton, Cette réaction est à présent décelée dans la plupart des régions du monde. Ce fut probablement R.J. Holden qui observa pour la première fois aux États-Unis, en 1935, la présence de réactions chimiques dans les bétons, entre les ciments et certains granulats. Puis, Kammer et Carlson constatèrent également l'existence de désordres, mais c'est Stanton le premier qui précisa (en 1940) la nature des réactifs en cause dans les dégradations observées sur des chaussées en Californie. En France, il faut attendre la fin des années 1970 pour certifier la présence d'alcali-réaction au sein de quelques barrages, et 1987 pour découvrir que plusieurs ponts sont atteints par cette maladie. Les structures les plus touchées sont celles qui sont en contact avec l'eau ou celles qui se situent dans des environnements humides; ce sont donc essentiellement les ouvrages de génie civil et certaines pièces humides de bâtiments qui sont les plus vulnérables.

I.3.4.1 Définition

Est une réaction endogène «génères à l'intérieur » qui affecte le béton dans sa masse au contrairement aux autres réactions, l'alcali-réaction peut être considéré comme une réaction solide/liquide entre des formes de silice réactive des granulats et la solution alcaline de la matrice cimentaire distribuée dans la microporosité, pour que la réaction se manifeste, il faut que trois conditions soient simultanément remplies :

- granulats réactifs ou une source d'alcalins (ciments, additions, granulats, adjuvants).
- humidité relative supérieur à 80-85%
- concentration en alcalins excédant un seuil critique [26].

- une forte concentration d'ions hydroxyles (haute pH).

Cette réaction nous résulte un gel expansif qui engendre des contraintes (de 3 à 10Mpa par mesure expérimental, 45 à 140Mpa par calcul théorique de la pression osmotique) [8].

I.3.4.2 Les différents types de réactions

en général on distingue trois formes de l'alcali-réaction selon réaction alcali-silice (la plus fréquente), réaction alcali-silicate et réaction alcali-carbonate,

a) *Réaction Alcali-silice (ASR) (la plus fréquente)* [31]

Il s'agit de réactions entre solution interstitielle alcaline et des formes métastables (forme amorphe ou sous formes modifiées qui ne sont pas chimiquement stables) de silice tels que les verres volcaniques, cristobalite (SiO_2 avec des traces : Fe; Ca; Al; K; Na; Ti; Mn; Mg; P), la tridymite (SiO_2 pouvant contenir des traces : Ti; Al; Fe; Mn; Mg; Ca; Na; K; H_2O) et l'opale ($\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$).

Le mécanisme de la réaction alcali-silice passe par une dissolution de la silice sous l'action de la solution interstitielle, suivie de la précipitation d'un gel expansif de silico-calco-alcalin.

Les caractéristiques de l'ASR dans les sections de béton infecté sont :

- 1- Des produits blanchâtres et la réaction des jointes autour des particules agrégées,
- 2- Fissures à travers agrégats, parfois remplis de gel, la matrice des fissures souvent contiguës aux fissures globales, et les vides remplis de produits de réaction - Figure (d).
- 3- Une perte d'adhérence peut également se produire entre les granulats et la matrice cimentaire.
- 4- Fissures dans les agrégats qui montrent une évidence de l'ASR sont souvent microfissures naissantes ou préexistantes qui sont des plans de faiblesse dans lequel une solution interstitielle alcaline pénètre et réagit.

b) *Réaction alcali-silicate* [26]

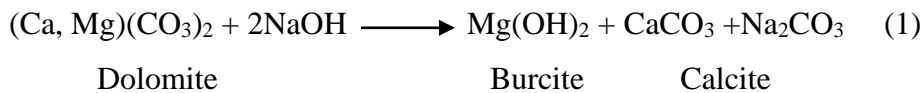
La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllo-silicates, tecto-silicates, sains ou altérés). En ce qui concerne les produits de la réaction, on admet qu'ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcali-silice.

c) *Réaction alcali-carbonate*

Contrairement aux autres réactions alcali-granulaire, l'alcali-carbonate ne veut pas produire un gel expansif ou 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 [ACI 221].

Au ce lieu la, les particules grossières soumis a une expansion global due à des hydroxydes 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, et provoque l'expansion et à la fissuration étendue (Swenson et Gillott, 1964; Dolar-Mantuani, 1983).

La réaction se manifeste comme suit



Lorsque dédolomitisation conduisant à la formation des Brucite $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$, il ya une régénération de l'alcali sous la réaction suivante



Ce qui conduise à l'autoalimentations de 1^{er} réaction, c'est une caractéristique qui est différente de la réaction alcali-silice, dans lequel l'alcali est combiné (diminue) dans le produit de la réaction que la réaction progresse.

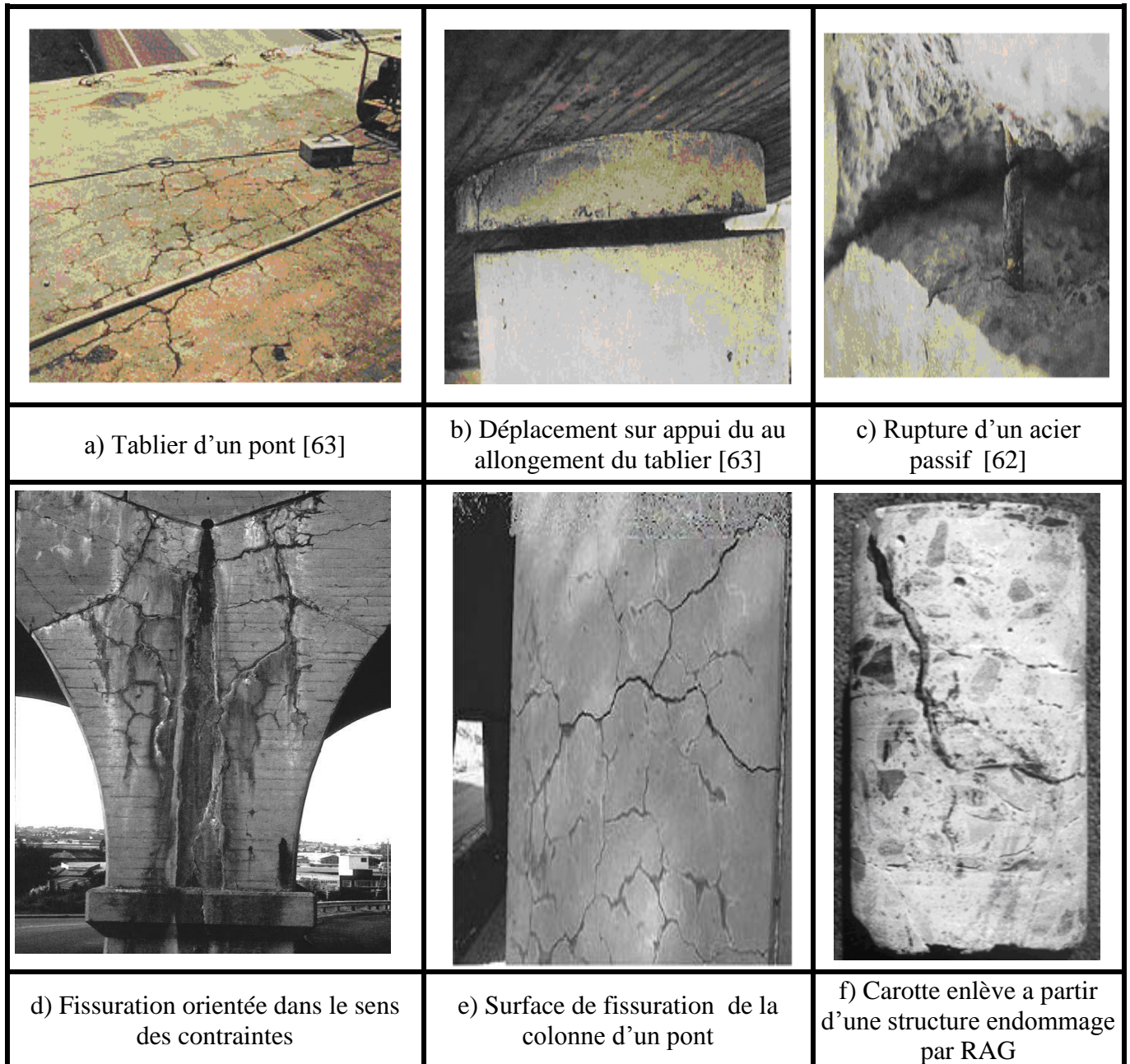
I.3.4.3 Typologie des désordres [8]

Sur un béton les manifestations de l'alcali-réaction visibles à l'œil ou mesurables sont :

- Fissuration orientée dans le sens des contraintes pour la partie des ouvrages pré ou post contrainte, ou fortement armé ;
- Formation des cônes d'éclatement lorsqu'on a affaire à certaines espèces à cinétique de réactivité très rapide contenues dans des granulats proches du parement ;
- Fissuration en macro-faïençage des parois avec des contours polygonaux ;
- Des exsudations blanches de gels (à ne pas confondre avec les efflorescences de chaux carbonatée) ;
- Réduction de la résistance à la traction à la compression et indirects dus à l'expansion de l'ASR ;
- Rupture d'un acier passif comme le montre la photo (C) ;

Tableau I.1 : L'influence des alcali-réactions sur la résistance du béton [31].

	Réduction	
Expansion (%)	Résistance à la compression (%)	Résistance à la traction indirecte (%)
- 0.1-0.2	0-20	20-25
- 0.3-1.0	25-65	20-30
- >1.50	> 60	----

**Figure 05:** Exemples des dommages occasionnés par RAG.

I.3.5 Attaque des Chlorures

Les Chlorures peuvent attaquer le béton de plus d'une source, la première est à l'intérieur du béton pendant le processus de gâchage, la seconde est de se déplacer en béton de l'extérieur vers l'intérieur.

Les chlorures de sources internes existent en raison des éléments suivants:

- En utilisant l'eau de mer dans le béton ;
- En utilisant du chlorure de calcium dans les additifs nécessaires pour accélérer le temps de prise ;
- Agrégats qui contiennent des chlorures ;
- additifs qui ont une teneur plus élevée en chlorure de celle qui est définie dans la spécification normative ;
- l'eau utilisée dans le mélange de béton qui a un nombre plus élevé d'ions chlorure à celle autorisée par le cahier des charges.

Les chlorures peut se propager à l'intérieur de béton de l'environnement externe par :

- béton exposées à des embruns de l'eau de mer ou une exposition continue à l'eau salée ;
- l'utilisation du sel de déverglace.

Dans la plupart des cas, l'impact des chlorures provient de sources externes, mais l'effet des chlorures sur les structures et essentiellement dans le cas de corrosion se produit très rapidement en cas de chlorures existant dans l'eau de gâchage par rapport à l'effet des chlorures de conditions environnementales entourant l'ouvrage. Cela arrive souvent dans une structure ou le mélange de béton peut contenir l'eau de mer.

I.3.5.1 Mouvement de Chlorure dans le béton

La pénétration des chlorures se manifestent suivant les deux cas suivant :

- En milieu saturé, ou partiellement saturé mais avec interconnexion de la phase liquide du béton poreux, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion sous gradient de concentration ;
- Pour les parements soumis à des cycles d'humidification et de séchage (zone de marnage ou sels de déverglace), les chlorures pénètrent tout d'abord par absorption capillaire et migrent avec la phase liquide par convection dans la zone concernée par les cycles, ensuite la pénétration se manifeste par diffusion.

La pénétration des chlorures dépend donc des caractéristiques des matériaux et des cycles d'humidification et séchage (durée, condition climatique), ainsi que la concentration des chlorures et la présence de la fissuration qui facilite la pénétration des chlorures.

I.3.5.2 Seuil d'amorçage de la Corrosion due par les Chlorures

A la différence de la carbonatation, la corrosion ne démarre pas instantanément lorsque les ions atteignent les aciers : il faut atteindre une concentration critique.

Cette valeur, exprimée par le rapport aux chlorures libres, peut varier en fonction de plusieurs facteurs comme la composition du béton, la teneur en C_3A , le rapport E/C, l'humidité relative, la température, la microstructure en contact avec l'acier et l'état de surface de l'acier.

Néanmoins il est admis la valeur suivante $[CL^-] / [OH^-] \geq 0.6$

Le rapport $[CL^-]_{\text{libre}} / [OH^-]$ compris entre 0.6 et 1 conduit généralement à une concentration critique en ions de chlorures plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de corrosion est grande.

I.3.5.3 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' O_2 et H_2O 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.

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 **Figure I.7** .comme il est illustré dans la **Figure(I.6)** suivante

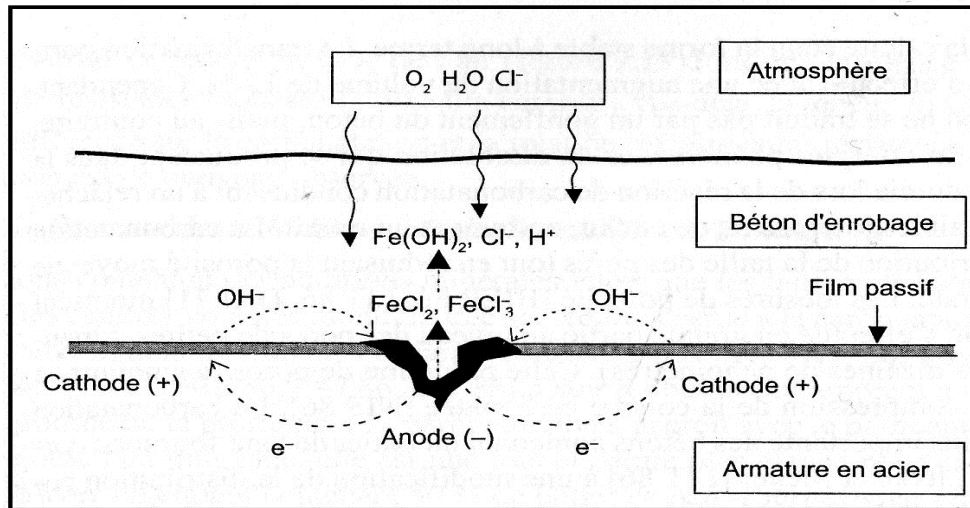


Figure I.6: Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence des chlorures. [26]

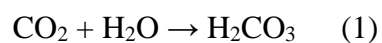


Figure I.7 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure. [46].

I.3.6 Carbonatation

La carbonatation est le résultat de la réaction chimique entre les gaz de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et les constituants de la pâte de ciment hydratée susceptibles de réagir telle que : La portlandite Ca(OH)_2 , les silicates de calcium hydratés (C - S - H), les chloroaluminates et les sulfoaluminates.

Et comme de nombreux autres gaz, dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former un acide faible (H_2CO_3) réagit avec la majorité des hydrates du ciment:



Contrairement à la plupart des autres acides, l'acide carbonique n'attaque pas la pâte de ciment, mais plutôt neutralise les alcalis dans l'eau interstitielle et principalement le carbonate de calcium sous l'équation :

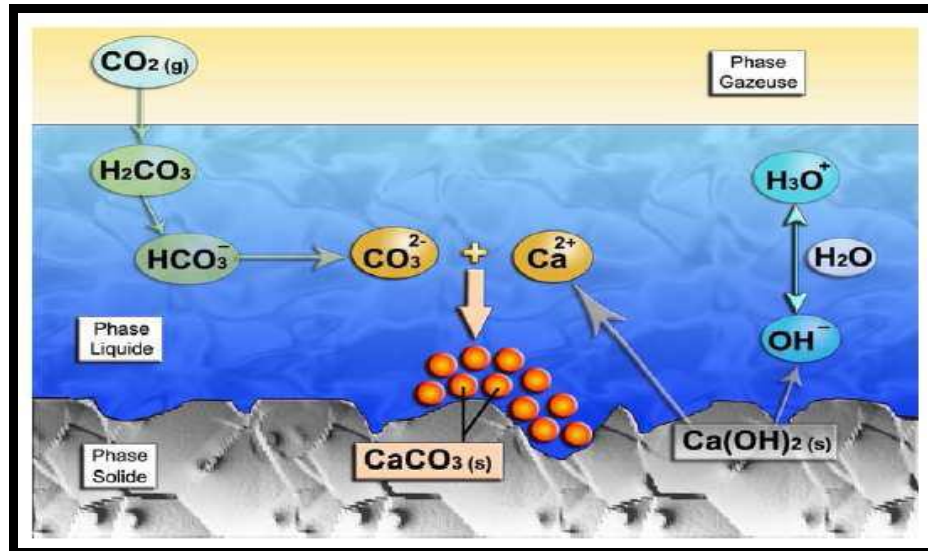
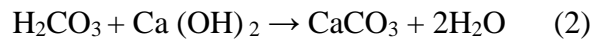
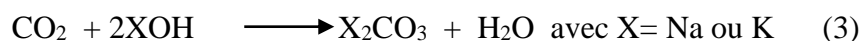


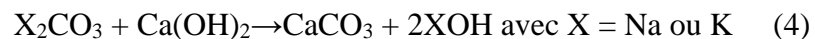
Figure I.8 : Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [29].

I.3.6 .1 Les Mécanismes de carbonatation

En présence de bases alcalines, tel que NaOH ou KOH , la solubilité de la chaux est relativement faible et la réaction peut se ralentir , cependant ces bases alcalines se carbonatent aussi :

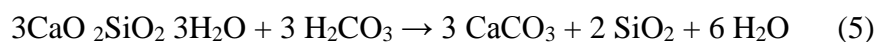


La carbonatation des bases alcalines augmente la solubilité de la chaux qui peut alors se carbonater en plus grande quantité [26]:

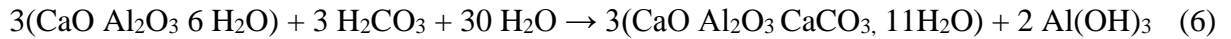


La portlandite est le composé le plus sensible à la carbonatation et qui réagi rapidement mais d'autres composés sont aussi sensible à l'attaque par le CO_2 en formant la calcite CaCO_3 tel que :

- Le silicate de calcium C-S-H : [26]



- Les aluminates:



- Puis la carboaluminate se décompose en alumine et carbonate: [26]



- L'ettringite peut également se carbonater: [26]



I.3.6.2 Les facteurs influents sur la carbonatation

La réaction de carbonatation progresse de l'extérieur vers l'intérieur du béton, avec une vitesse dégressive, qui dépend des caractéristiques du béton (porosité, nature du ciment, etc.) et de l'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation atteint son maximum pour une humidité comprise entre 40% et 80%, 60% étant considéré comme la valeur la plus critique.

De fortes teneurs, dans un béton, en cendres volantes (>30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement sa vitesse de carbonatation. Après environ 30 ans, la profondeur de carbonatation dans un béton peut varier généralement de 1 mm à 30 mm, suivant les bétons et leur milieu environnant.

- La propagation rapide du CO₂ à l'intérieur du béton
- Le rapport E/C très élevé se qui implique une porosité excessive du matériau en zone superficielle
- Les conditions de la cure : pour étudier l'effet de cure du béton sous l'eau. Leur résultat sur des essais de carbonatation accélérée indique que les bétons conservé sous l'eau de 1, 3, 5, 7, et 28 jours présentent respectivement un taux de carbonatation de 66, 53, 42, 39, et 17 % par rapport à une cure dans l'air.
- L'ouverture des fissures : elles accélèrent également le transport des Co₂

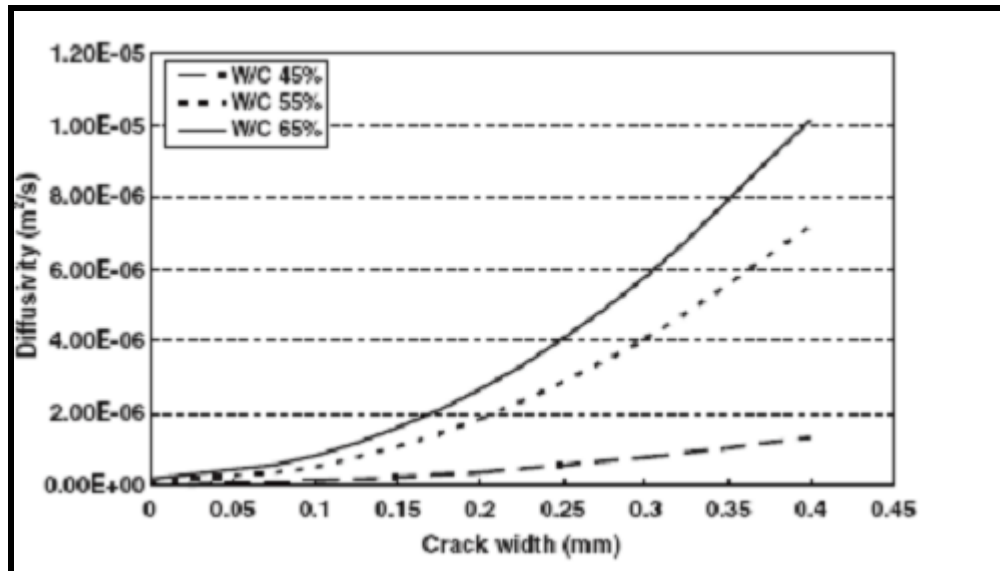


Figure I.9 : effet de l'ouverture moyenne de fissure sur la diffusion de CO₂ pour différents rapports C/E [55]

- Un enrobage insuffisant
- Une humidité relative suffisante

I.3.6.3 Conséquences de la carbonatation :

a) Béton

Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a une conséquence bénéfique, en effet, la réduction de la porosité conduit à améliorer les résistances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs. On parle d'un effet dit « Colmatage » des pores.

- les réactions de carbonatation de la portlandite conduisent à une augmentation de volume de la phase solide, cette augmentation conduit à la diminution du volume poreux du béton. [57], [52], en mesurant la porosité pour des pâtes de ciment de E/C variant de 0.3 à 0.8, ils ont trouvé des baisses de porosité allant de 10 % à 15%.
- La diminution de porosité associée à la carbonatation engendre une augmentation de résistance mécanique. La calcite consolide la microstructure, il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant, ce qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux

b) Armatures

L'hydroxyle de Calcium existe dans le béton augmente l'alcalinité de ce dernier, qui maintient un niveau de pH de 12-13 après l'attaque et la propagation des carbonates à l'intérieur

du béton , forme du carbonate de calcium , à partir de cela la valeur du pH sera réduite à un niveau (pH <8) ce qui provoque la corrosion des armatures.

I.3.7 La corrosion

Des études faites à travers le monde montrent qu'au-delà de 80% des dégradations du béton armé sont provoquées par la corrosion des armatures, et qu'elle est la pathologie la plus fréquente qui absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des ouvrages de génie civil ; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris sérieusement en considération , afin d'éviter la corrosion des barres d'acier dans une structure de béton , nous avons besoin d'identifier l'origine des désordres rencontrés sur les ouvrages, connaître les mécanismes de la corrosion et par voie de conséquence déterminer les techniques de réparation et de réhabilitation.

I.3.7.1 Le mécanisme de Corrosion

La corrosion représente l'attaque destructif d'un métal par des réaction électrochimique qui conduisent à un transfert d'ions et d'électrons à l'interface métal/solution à la surface du métal. Deux types de réactions couplées correspondent au processus de corrosion/oxydation, ont lieu :

- **Une réaction anodique [8]**

Dans laquelle l'oxydation du métal correspondant, a la formation à partir de l'état métallique, d'ions passant en solution :

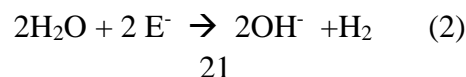


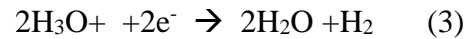
La cinétique de cette réaction est régie par la capacité du milieu électrolytique à accepter la présence d'ions ferreux Fe^{2+} ou ferriques Fe^{3+} , la concentration de ces ions dépend de la nature des anions présents dans la solution et de la valeur de produit de solubilité des anions et des ions ferreux ou ferriques.

- **Une réaction cathodique [8]**

Corresponde à la réduction d'un oxydant présent dans la solution par capture d'électrons fournis par la cathode, Selon la disponibilité en oxygène de l'environnement, on obtient :

En l'absence d'oxygène :

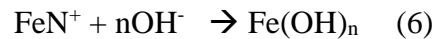




En présence de l'oxygéné



Ces réactions principales d'oxydoréduction sont suivies des réactions secondaires de formation des produits de corrosion à la surface du métal :



Elles sont illustrées schématiquement par la figure :

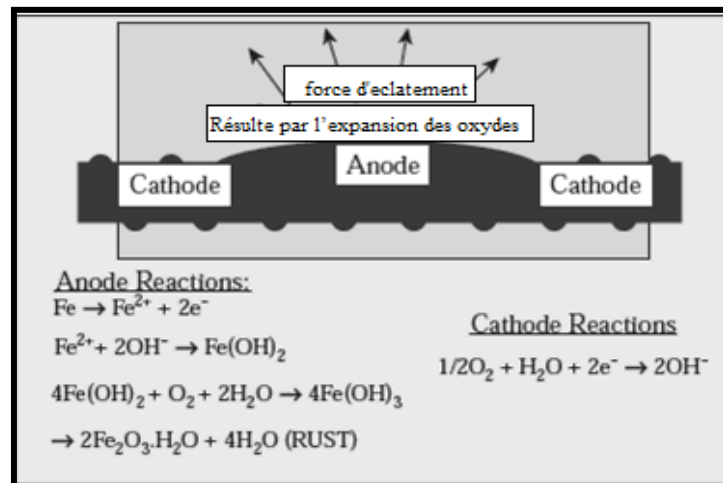


Figure I.10 : Le Mécanisme de la Corrosion [39]

I.3.7.2 Les phases de dégradation

Les manifestations visibles de la corrosion d'un ouvrage sont les conséquences de réaction qui ont commencé bien avant que les désordres ne soient apparents . On distingue schématiquement "**Figure I.12**" et successivement deux phases dans le développement de la corrosion :

- **Une période d'amorçage**, dite aussi période dormant, d'incubation ou d'initiation, durant laquelle la stabilité du système constitué par l'armature métallique noyée dans la matrice cimentaire du béton décroît progressivement et durant laquelle se créent les conditions favorables au développement de la corrosion. l'amorçage de la corrosion peut être provoqué soit par la **carbonatation** du béton d'enrobage, soit par la pénétration d'ions **chlorure** :

- **Une période de propagation**, durant laquelle on observe, en premier lieu, la formulation de produits issus de la corrosion de l'armature. les phénomènes électrochimiques de corrosion, décrits dans le paragraphe précédent, conduisent à la formation d'oxydes et d'hydroxydes de volumes supérieurs à celui de l'acier sain.

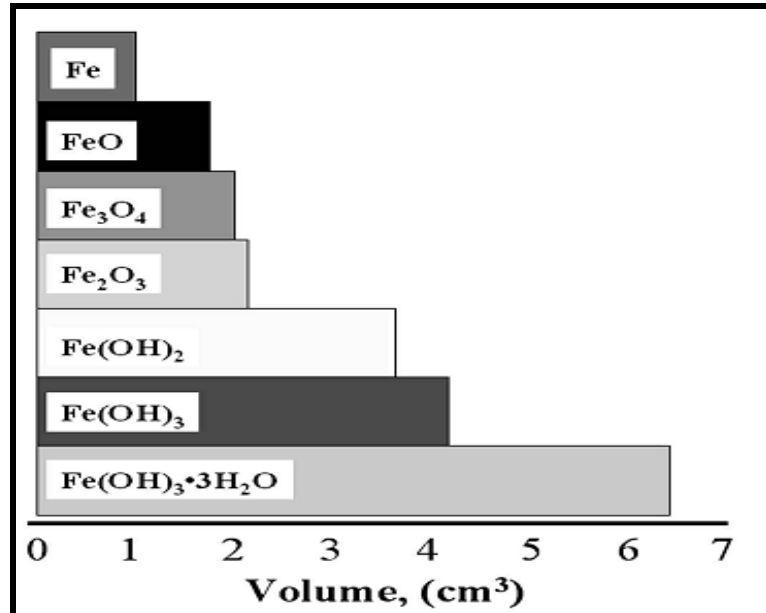


Figure I.11 : Volume relatif des produits d'oxydation du fer [2].

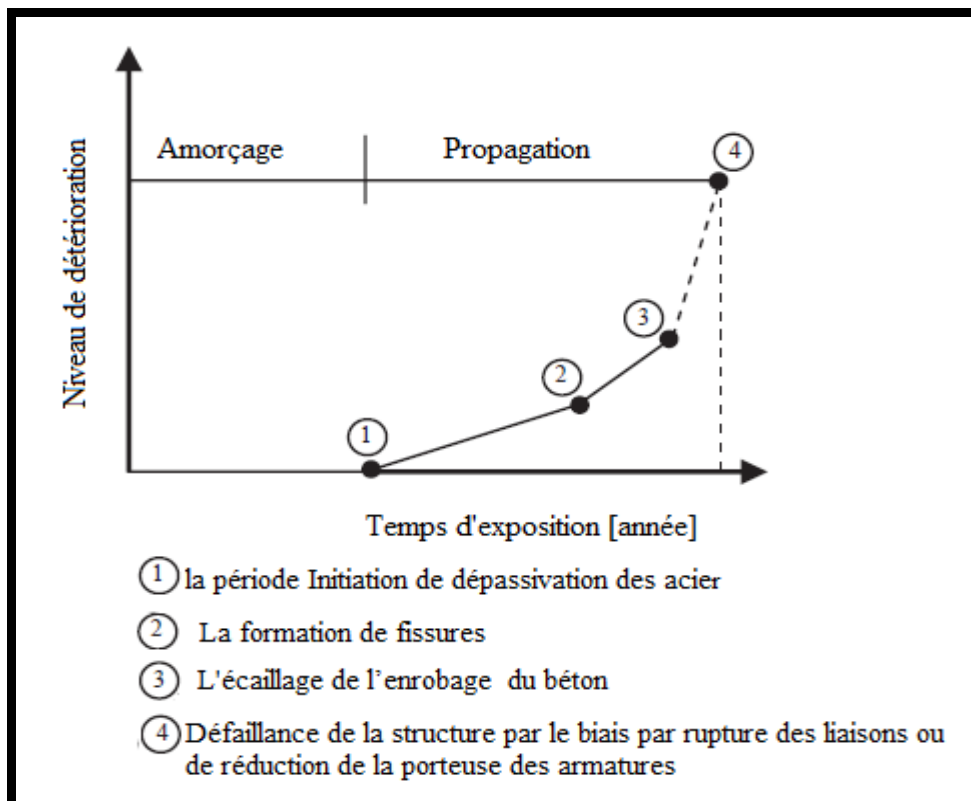


Figure I.12 : Les phases de la corrosion [30].

I.3.7.3 Facteurs influents de la corrosion

La corrosion des armatures dans le béton agit ou s'accélère en fonction des paramètres concernant l'acier et le béton ainsi que des propriétés existantes à leur interface. Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent affecter directement les processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosif. La température et l'humidité, tout comme les autres facteurs pouvant détériorer le béton, jouent aussi un rôle important dans la corrosion des armatures.

La corrosion de l'acier n'est donc pas dépendante d'un seul paramètre mais de plusieurs dont les interactions concourent ou non à la corrosion.

- La carbonatation : voir paragraphe carbonatation
- Les ions de chlorures : la concentration critique des ions...etc.
- **Influence de l'enrobage :** L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont passer les espèces agressives pour arriver à l'armature, parfois la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures.

- **Influence de la composition du béton :** Tout ce qui conditionne la solution interstitielle et la porosité du béton est un facteur pouvant affecter ou non la corrosion, le type et la teneur en liant, les additions minérales et le rapport E/C (Eau/Ciment) déterminent la performance d'un béton, le choix de la formulation du béton et de la nature de ses principaux constituants constitue une approche pour augmenter la résistance à la corrosion du béton. Toutes modifications de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité ont généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Le rapport E/C a une très grande influence sur la porosité du béton : plus il est important, plus la porosité du béton est grande, facilitant ainsi la pénétration des espèces agressives puis la corrosion de l'acier, l'influence du rapport E/C est bien plus importante que le type de liant utilisé.

Les ajouts minéraux, en faibles quantités, tel que les cendres volantes et les fumées de silice qui ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton, l'augmentation de

la compacité provoquée par les ajouts minéraux, utilisés en quantité suffisante, peut de plus annuler largement

Les effets néfastes de la diminution du pH interne et de la moins grande quantité d'aluminate tricalcique (C3A) qui découlent de l'utilisation de ces ajouts.

- **Influence de l'humidité :** L'effet du taux d'humidité, ou degré de saturation en eau, dans le béton est important car la vitesse de corrosion dépend fortement de ce taux, celui-ci influençant directement la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène.

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion.

- **L'influence de la fissuration sur la corrosion**

- ✓ La présence des fissures facilite la pénétration rapide des agents agressifs par le béton d'enrobage jusqu' aux armatures qui sont aussitôt dépassivées [13].
- ✓ Les expériences des ouvrages montrent que les fissures parallèles aux barres sont plus dangereuses que les fissures perpendiculaires [45]. Les résultats sont moins clairs en ce qui concerne l'influence de l'ouverture des fissures sur la pathologie. Un état de corrosion avancée est enregistré si l'ouverture des fissures dépasse 0,2 - 0,5 mm, ou l'auto-colmatage est difficile et l'environnement est agressif [24].
- ✓ Les fissures accélèrent la corrosion induite par le chlorure en augmentant la pénétrabilité du béton, en général, l'augmentation de taux de la corrosion est proportionnelle à la largeur des fissures, mais elle est sensible à la qualité du béton. Pour un type de liant et E/C donné, la vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de largeur des fissures, alors que pour une largeur de fissure donnée, la vitesse de corrosion diminue quand la qualité du béton augmente.

I.3.7.4 Cas des ouvrages en béton précontraint

Les aciers de précontrainte du béton sont soit directement noyés dans le béton (précontrainte par pré-tension), soit placés dans des gaines qui sont ensuite remplies d'un coulis d'injection, de cire ou de graisse (précontrainte par post-tension). Les aciers tendus et directement au contact avec le béton, risquent la corrosion avec dissolution et formation de rouille, mais les mécanismes fondamentaux de la corrosion d'acier de précontrainte dans le béton sont essentiellement les mêmes que ceux pour les autres armatures, mais La ruine de la structure dans cette cas est difficile à prévoir.

Le tableau suivant montre les différents facteurs influents la corrosion des bétons précontraints ainsi que les problèmes résultant :

Tableau I.2 : Causes et effets de la corrosion des aciers de précontrainte [2]

Facteur d'influence	Les problèmes potentiels
Environnement: -L'utilisation de sels de déglacage l'environnement marin -Sols à forte teneur élevée en sel -Exposition aux produits chimiques (acides, des matériaux à haute teneur en soufre) -Accès à l'eau dans les conduits	-Source de l'humidité et les chlorures -Source de l'humidité et les chlorures -Source des chlorures -Peut conduire à des HE ou l'hydrogène induit par corrosion sous contrainte -Sources d'humidité
Choix des matériaux: La plupart des aciers traités thermiquement précontrainte Basse-qualité du béton Faible qualité de post-tension coulis D'assise non permanents (conduits) La corrosion des matériaux sensibles à gaine Métaux différents utilisés pour les composants d'ancrage	Enclin à la corrosion sous contrainte et HE Une protection insuffisante pour l'acier Excessive lentilles saigner ou de vides d'air la formation, l'insuffisance ou de la fluidité excessive, des chlorures dans le coulis Pas de protection contre la corrosion Limitée protection contre la corrosion Enclin à la corrosion galvanique
Des défauts de conception: - Faible couverture en béton - Renforcement congestionnées - Un mauvais drainage - Joint lieux et les détails - La protection d'Anchorage - Emplacement des ancrages de post-tension - Post-tension conduits - Vents de post-tension des conduits - Contrôler le saignement insuffisant	-Insuffisance de protection pour l'acier -Pauvre de consolidation en béton ou en nids d'abeille -Eau salée des étangs de recueillir des éléments structuraux -Eau salée coule sur le soutien des éléments de structure et l'ancrage n'est pas conçu pour une exposition grave -Insuffisance de protection fournis -Salée entre en contact avec d'ancrage -Gaines-discontinu ou des détails d'épissure mauvaise conduire à fuite de coulis ou de la graisse et l'infiltration d'humidité et chlorures -Mauvaise événements ou le manque de bouches conduire à incomplets coulis -Coulis vides dans les zones les plus vulnérables
Défauts de construction : - Couverture en béton de conception n'est pas fourni	-Une protection insuffisante pour l'acier

<ul style="list-style-type: none"> - Endommagées ou déchirées gaine - Obstruées ou endommagées par post-tension conduit - Mauvaise procédures coulis ou entrepreneurs inexpérimentés - Période prolongée entre les stresser et de coulis / construction - Fuite des joints froids 	<ul style="list-style-type: none"> - Protection en acier de précontrainte est compromise - Incomplet coulis-protection insuffisante pour les aciers de précontrainte - Incomplètes ou inexistantes coulis-insuffisante protection pour les aciers de précontrainte - Possibilité de la corrosion tout en tendon est protégé - Corrosion des tendons
<p>L'absences d'entretiens :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les joints de dilatation - Obstruées ou endommagées drains 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau salée coule sur le soutien des éléments de structure n'est pas conçu pour une exposition grave - Salée s'accumule sur les éléments structurels ou de gouttes sur le soutien des éléments de structure n'est pas conçue pour une exposition sévère

I.3.7.5 Désordres dus par la corrosion

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que fissurations au droit des armatures, décollements de béton, éclats et épaufrures, mais attention, d'autres mécanismes peuvent être à l'origine de ces dégradations « Les fissures créées par le gonflement de la barre consécutif à la formation de la rouille sont à différencier des fissures de retrait et des fissures de flexion ou d'effort tranchant.....etc ».

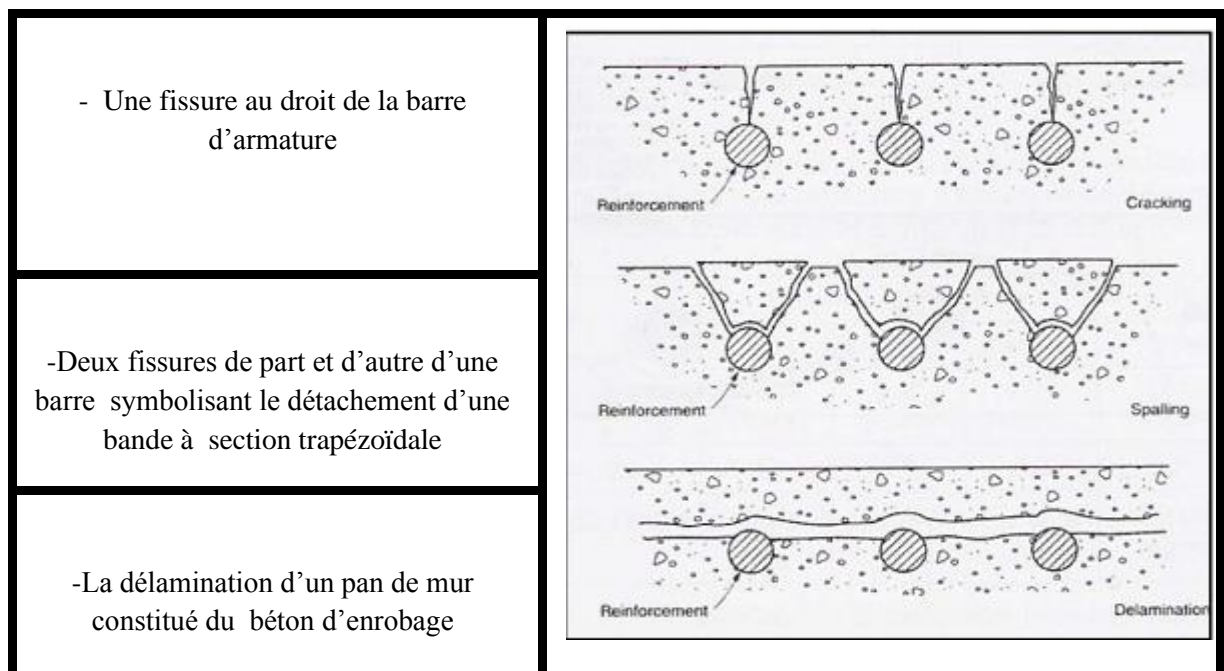
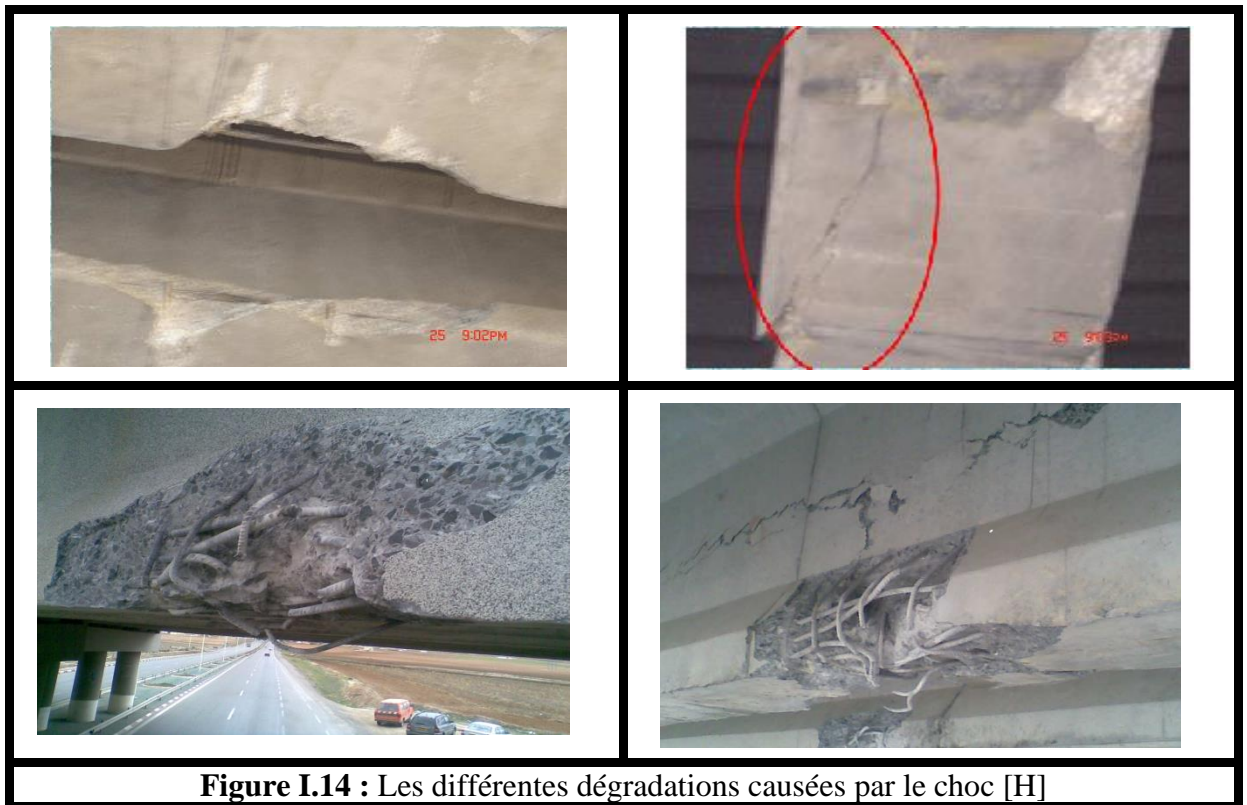


Figure I.13 : Types de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature.

I.3.8 Le Choc

Il s'agit le plus souvent d'une attaque mécanique concrétisée 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 retenue constituent une autre source de chocs non négligeable.

Un dommage dû aux ondes de choc est caractéristique, les éléments du béton sont épauprés 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 épauprures résultant sont profondes et ils n'ont pas l'aspect d'un écaillage, de plus, l'ouvrage est généralement soumis à des impacts (quais ou pont) ce qui fait qu'un tel dommage est immédiatement suspect.



I.3.9 Action Sismique

La situation géographique de l'Algérie, fait que plusieurs régions de notre pays peuvent être qualifiées de zones sismiquement actives. La dernière sollicitation sismique, qu'a connue la région Boumerdès en 2003 de magnitude Mw 6.8, en ont apporté l'ultime preuve. Elle a également, provoqué la discussion sur la prise en compte du risque sismique dans le dimensionnement des ouvrages d'art afin d'éviter les effondrements catastrophiques et limiter le

degré d'endommagement. En effet l'intégration des études parasismique est assez récente par la mise en vigueur de 1^{er} règlement parasismique des ouvrages d'art Algérien élaboré en 2006.

Les ponts sont classés selon leur importance en [42] :

Groupe 1 : Ponts stratégiques qui doivent rester circulables après le séisme tell que acheminement des secours, itinéraires de desserte d'installations stratégiques.

Groupe 2 : Ponts importants qui portent, franchissent ou longent des autoroutes, des voies express et des voies à grande circulation – itinéraires de desserte d'installations de grande importance.

Groupe 3 : Ponts d'importance moyenne non classés en groupe 1 ou 2.

Le territoire national est divisé en 5 zones de sismicité croissante :

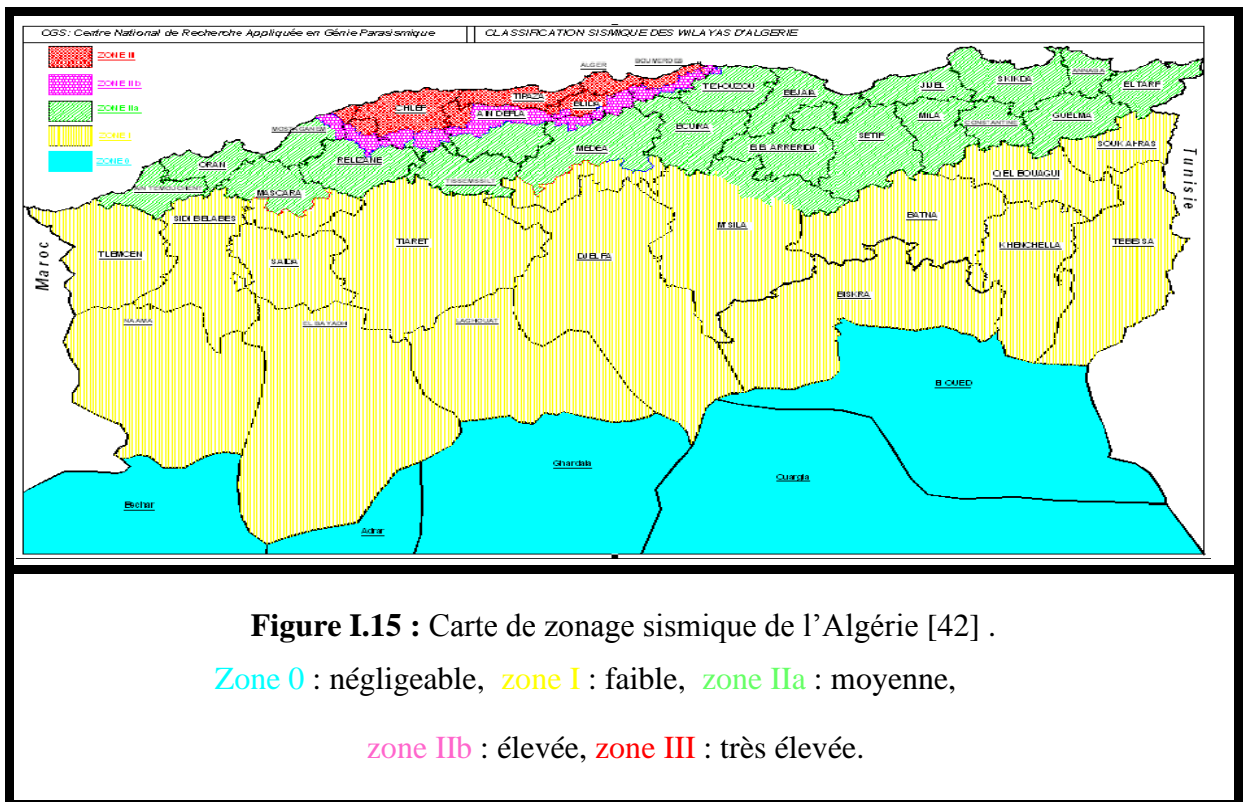


Figure I.15 : Carte de zonage sismique de l'Algérie [42] .

Zone 0 : négligeable, zone I : faible, zone IIa : moyenne,

zone IIb : élevée, zone III : très élevée.

L'action sismique peut être définie comme un déplacement imposé induisant dans les diverses parties d'un pont, des efforts dans l'intensité proportionnelle à la rigidité et le poids de l'élément.

Les effets du séisme sur les ouvrages peuvent se manifester en :

I.3.9.1 Les Dommages Induits Par Le Séisme Directement [41]

Concernant les dommages, ils sont de quatre types :

- Affaissements des chaussées par rapport à l'entrée ou à la sortie du pont (a)
- Ouvertures des joints de chaussées. (b, c)
- Endommagement des bloqueurs de déplacements latéraux (d)
- Déplacements et translations des poutres de tabliers, (e)
- Endommagement des appareils d'appuis (f)

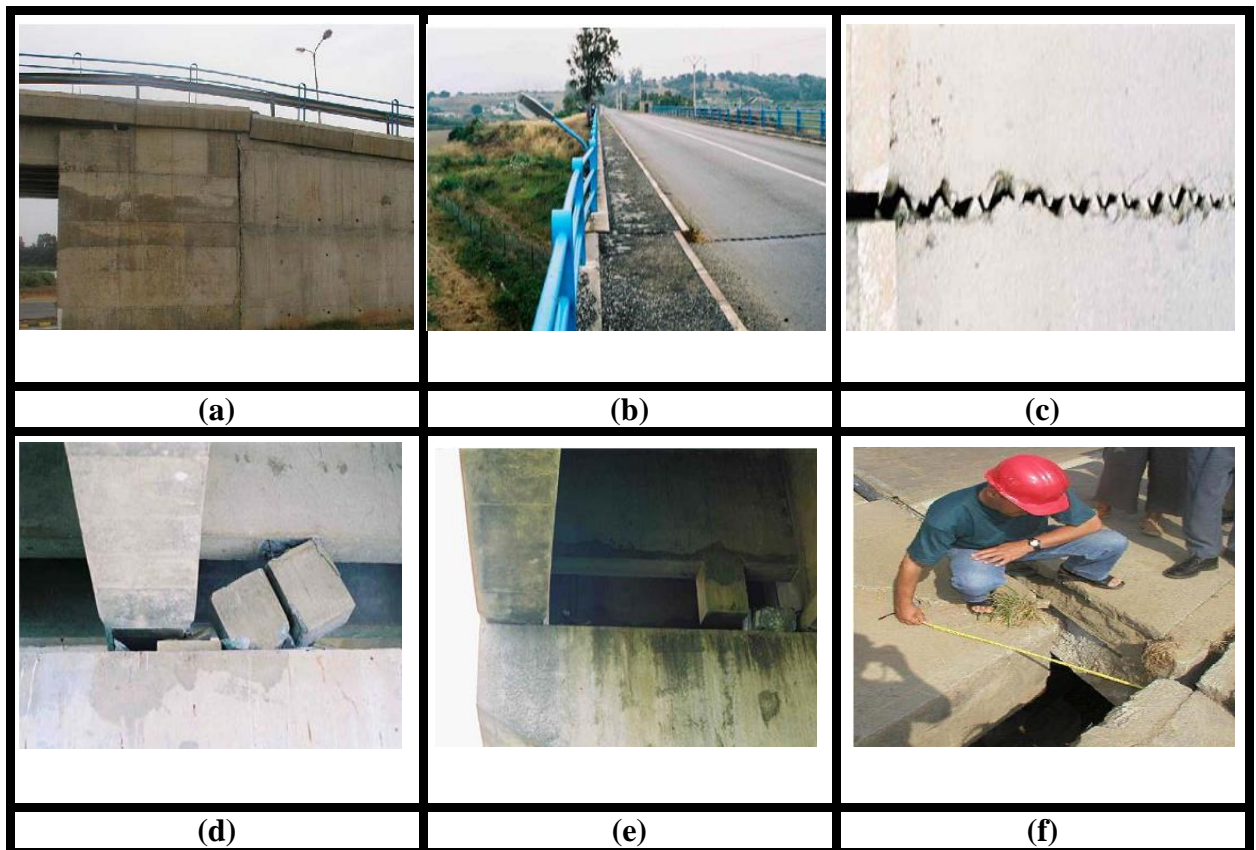


Figure I.16 : Exemples des dommages induits par le séisme [41]

I.3.9.2 Les Effets Indirects :

- La liquéfaction des sables (perte de la capacité portante des sables gorgés d'eau qui provoquent le basculement et l'enfoncement des constructions) ;
- Le glissement de terrain : sur les versants, les glissements provoqués par les séismes ne sont pas rares et entraînent la perte totale des ouvrages concernés ;

- Les éboulements rocheux : ils sont fréquents dans les régions montagneuses . Les constructions peuvent alors être partiellement ou totalement détruites. Ce danger ne peut être apprécié que par un spécialiste.

I.3.10 La Fatigue [50]

Les trafics routiers et ferroviaires engendrent des variations de contraintes cycliques d'intensité et des fréquences élevées, il est donc logique que les ponts soient potentiellement susceptibles de s'endommager en fatigue. Dans le cas des ponts routiers, ce phénomène n'est tributaire ni des charges apportées par les essieux légers, même s'ils sont nombreux, ni de celles apportées par les essieux très lourds, plutôt rares : les charges déterminantes sont donc les charges intermédiaires. Les tabliers à dalle orthotrope sont particulièrement exposés.

Les endommagements par fatigue se traduit par :

- ✓ une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraînant l'apparition d'une fissuration pouvant affecter la durée de vie de l'ouvrage,
- ✓ voire des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service.

Le degré d'endommagement dépend de nombreux facteurs comme le nombre et l'intensité des cycles de chargement, la variabilité des charges appliquées et le degré de fissuration entraînant une modification des propriétés du béton. Le phénomène de fatigue concerne principalement les armatures dans les structures en état de précontrainte partielle « involontaire », pour lesquelles il n'a donc pas été pris en considération. Il n'a jamais été observé dans le béton de tabliers non fissurés.

I.3.11 Le Retrait du Béton

Définition : lorsque on observe une pièce de béton aussitôt son gâchage, on constate qu'en, l'absence de toute force extérieure, elle change de volume. Cette propriété, qui a pris le nom de retrait, est à l'origine de désagréments de toutes sortes que les constructeurs connaissent bien. Il est, en réalité, la résultante de mouvement complexe.

I.3.11.1 Les Causes Du Retrait : [26] et [27]

- Les quantités d'eau et de ciment ;
- La présence d'ajouts minéraux, entre autres de fumée de silice qui produisent un réseau poreux plus fin ;

- Le volume de la pâte ;
- Le module élastique des granulats ;
- La nature et la finesse du ciment ;
- La quantité d'armature dans la pièce du béton « pour 5% d'armature, le retrait tombe à 1/5 de sa valeur »
- Les conditions de la cure telle que l'humidité et la température ;
- Les conditions dues au béton : sa consistance ; la granulométrie et la forme des agrégats, la méthode de mise en œuvre ;

I.3.11.2 Les Conséquences du Retrait

Dans tous les cas, la conséquence essentielle du retrait est l'apparition de phénomènes de fissurations pouvant diminuer la durabilité des structures en béton armé ou précontraint, et/ou limiter leur capacité portante, notamment dans le cas de manifestation dans la masse.

Cette fissuration peut conduire à limiter l'adhérence entre un matériau rapport en surface (revêtement par exemple) et le support en béton, ainsi, l'accélération de la diffusion du CO₂ atmosphérique dans le béton, donc accélération de phénomène de carbonatation.

I.3.12 Effet de gel dégel

La détérioration par le gel se manifeste essentiellement dans les structures construites dans les régions froides ou d'altitude ; dans lesquelles on peut trouver une ambiance hivernale rigoureuse.

Dans la pâte de ciment hydratée, on trouve de l'eau sous différentes formes, mais seulement l'eau libre contenue dans les pores ou sur leurs parois internes est qualifiée de «gelable», la quantité de ce dernier ainsi que la forme, les dimensions et le type des pores, les températures minimale et maximale, taux de gel, degré de saturation sont tous des facteurs qui influent sur l'effet de gel dégel.

L'endommagement des matériaux de construction par le gel, résulte non seulement de l'expansion de volume associée à la solidification de l'eau (en gelant, le volume de l'eau augmente de 9%), mais aussi des écoulements d'eau non gelée dans le réseau poreux, et du comportement thermomécanique de chaque phase (glace, eau, et matrice).

L'action des cycles de gel-dégel produit deux principaux types de détériorations du béton:

- La fissuration interne
- L'écaillage des surfaces.

Ces deux types de dégradations ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps lorsque les bétons sont exposés aux cycles de gel-dégel.

✓ **La fissuration interne**

Il s'agit d'une dégradation qui touche toute la masse de béton soumise à des cycles de gel-dégel, cette dernière, se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel.

- Dans un béton mal protégé contre le gel, l'intensité de la fissuration interne dépend du nombre de cycles de gel-dégel et de la sévérité des cycles (températures minimale et maximale, taux de gel, degré de saturation).
- La fissuration interne du béton diminue la performance du béton en réduisant considérablement ses caractéristiques mécaniques (résistances à la compression et à la traction, module élastique) et son imperméabilité par exemple, un béton fortement attaqué par le gel interne peut perdre presque toute sa cohésion.

✓ **L'écaillage de surface :**

Comme son nom l'indique, il s'agit d'un mode de dégradation qui touche surtout la surface du béton en contact avec le milieu externe (les premiers millimètres), elle se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles.

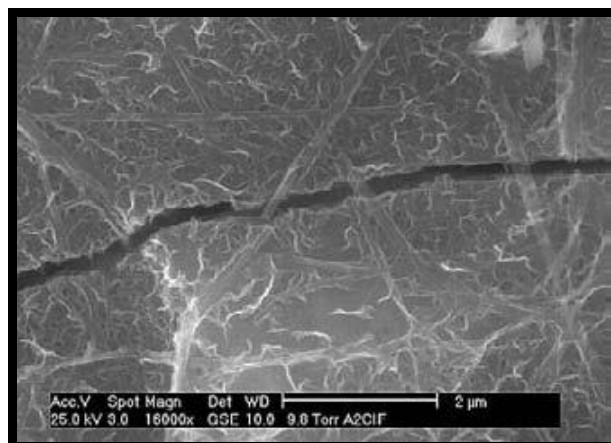


Figure I.17 : Photo réalisée par le MEB d'une fissure interne causée par Gel-Dégel [30].

I.3.13 Défauts d'exécution [8], [47]

Un certain nombre de dégradations du béton sont provoquées par une mauvaise exécution qui peut commencer dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en place de l'étanchéité. nous allons passer en revue les principaux défauts d'exécution rencontrés et les types des dégradations du béton qui en résultent :

- Une mauvaise formulation du béton qui engendre une porosité trop élevée ; c'est le cas d'un surdosage en eau ou d'un sous dosage en ciment. Une porosité très importante du béton est assurément le facteur le plus nuisible pour sa durabilité ; elle facilite en effet la circulation des eaux et des solutions agressives au sein du matériau, et favorise la corrosion des armatures
- Mauvaise exécution des coffrages : outre les défauts de parement engendrés par des coffrages de piètre qualité ; l'absence d'écarteurs de coffrage peut entraîner une insuffisance d'enrobages et la création de nids de cailloux ou de défaut de bétonnage par « effet de bouchon» des gros granulats coincés entre les armatures et le coffrage , des nids de cailloux peuvent aussi être provoqués par des fuites de laitance aux joints entre coffrages.

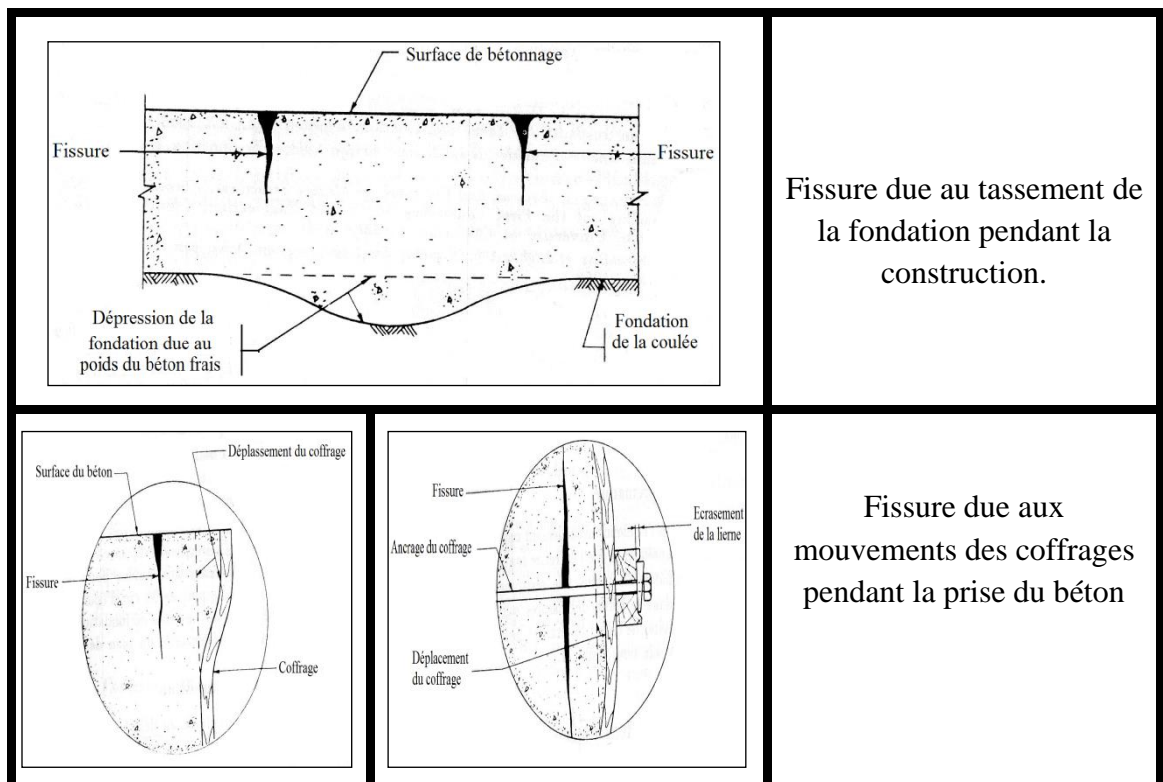


Figure 18 : Quelques exemples des Défauts d'exécution [47]

- Mauvaise disposition des armatures : le manque de recouvrement des armatures est probablement le défaut le plus courant, et l'insuffisance d'enrobage mène tout droit vers la corrosion des aciers qui crée ensuite des fissures parallèles aux armatures, des épaufrures et des éclats.
- Mauvaises conditions de transport du béton frais : les mauvaises conditions de transport peuvent remettre en cause la qualité obtenue à la fabrication en favorisant la ségrégation du béton (variation dans la répartition des éléments), ou en provoquant un raidissement du béton par un départ d'eau résultant d'un délai de livraison trop long ou d'une température extérieure trop élevée.
- Mauvaise mise en œuvre du béton : une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité, une ségrégation qui peut nuire à la résistance du matériau, et même des défauts de bétonnage particulièrement dangereux lorsqu'ils affectent le talent des poutres précontrainte par post-tension. ces vibrations peuvent aussi être dues à la circulation des véhicules, au battage de pieux, à des tirs de mines, à un compactage par vibration, ou à une vibration accidentelle causée par des chocs.
- Mauvaise manutention d'éléments lourds en béton (exemple des voussoirs préfabriqués de ponts en béton précontraint) peut provoquer des épaufrures et même des cassures de parties appartenant à l'élément (comme les clés d'assemblage).
- Mauvaise étanchéité : ce facteur qui se rencontre encore parfois sur les ponts est un élément favorisant de manière importante la dégradation du béton . elle facilite l'apparition d'efflorescences et de stalactites consécutives à une dissolution de la chaux, ainsi que la pénétration d'agents agressifs et son corollaire : la corrosion des aciers.
- Ces vibrations importuns peuvent être dues à la circulation des véhicules, au battage de pieux, à des tirs de mines, à un compactage par vibration, ou à une vibration accidentelle causée par les heurts de l'outillage, ou par choc , cette vibration peut nous resautes des fissures produites pendant la prise du béton.

I.3.14 Défauts de chaussées [25], [9]

Les différentes types des défauts de chaussée et les causes probables de leurs apparitions

Tableau I3 : Les différentes types des défauts de chaussée et les causes probables de leurs apparitions.

Dégradations	Causes
Fissurations	<p>Pour les structures souples :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvaise qualité des matériaux. ✓ Mauvaise mise en œuvre. ✓ Epaisseur insuffisante de la chaussée par rapport au trafic. ✓ Retrait (couche de base traitée au ciment) ✓ Age de la chaussée. <p>Pour les structures rigides:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Absence du joint dans le sens axial. ✓ Mauvaise composition du béton.
Epaufrement de rive	<p>Dégradation des marches d'escalier</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Action de l'eau. ✓ Compactage insuffisant des rives (enrobés). ✓ Largeur insuffisante de la chaussée.
Déformations <ul style="list-style-type: none"> ➤ Affaissement longitudinal suivant l'axe. ➤ Affaissement longitudinal de rive. ➤ Orniérage à grand rayon ➤ Bourrelet longitudinal ➤ Bourrelet transversal ➤ Flache ➤ Tôle ondulée 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Stabilité insuffisante du revêtement (enrobés). ✓ Insuffisance de la stabilité d'enrobés. ✓ Fatigue de la chaussée causée par une circulation lourde et lente. ✓ Eau : perte de portance du corps de chaussée. Matériaux: qualité insuffisante. ✓ Mise en œuvre : compactage insuffisant. ✓ Trafic : passage des véhicules trop lourds pour l'épaisseur de la chaussée. ✓ Fluage des enrobés sur toute la surface dans les zones de freinage. ✓ Défaut de portance localisé (poche d' argile humide). ✓ Perte de cohésion localise de la couche de base. ✓ Tassement différentiel du matériau ayant servi au rebouchement du nid de poule. ✓ Manque de stabilité d'enrobés. ✓ Insuffisance d'épaisseur ou de compacité du

	tapis d'enrobé.
Arrachement <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pelade ➤ Nid de poule ➤ Plumage ➤ Peignage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Qualité insuffisante des matériaux de chaussée. ✓ Arrachement des matériaux lors du passage des véhicules. ✓ Stade final de faïençage ou d'une flache. ✓ La perméabilité de la couche de roulement. ✓ Un mauvais accrochage (enduit). ✓ Un sous-dosage en bitume (enrobé). ✓ Mauvais fonctionnement du matériel de répandage <p>lors de la mise en œuvre de l'enduit, qui se traduit par un manque de liants ou de gravillons.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mise en œuvre par conditions atmosphériques défavorables.
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Désenrobage ➤ Décollement 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Attaque du liant « hydrocarboné » par un produit chimique (Argile, sel ...) ✓ Mauvaises conditions d'exécution (surface humide). ✓ Gonflement ou retrait des matériaux de la couche de base.
Remontées <ul style="list-style-type: none"> ➤ Remontées d'eau et d'argile ➤ Ressuage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Perte de cohésion au sein d'une chaussée fondée sur un sol argileux ou gorgé d'eau. ✓ Dosage en liant trop élevé. ✓ Liant non adapté. ✓ Utilisation d'un liant mou ou (et) la présence d'une forte chaleur.
Usures de la surface de revêtement <ul style="list-style-type: none"> ➤ Glaçage ➤ Tête de chat 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usure des gravillons de revêtement sans qu'ils soient arrachés (utilisation des granulats polissables). ✓ Enfoncement des gravillons dans le support (lors des fortes chaleurs le liant et le mortier recouvrent en totalité les gravillons). ✓ Disparition partielle des matériaux en surface par usure.

I.4 LES DEGRADATIONS

I.4.1 La Fissuration

I.4.1.1 Définition

En général, une fissure est considérée comme une discontinuité dans le champ de déplacement à travers laquelle les contraintes de traction sont nulles ou diminuent en fonction de l'ouverture de cette même fissure (hypothèse de Griffith 1920). La fissuration peut se produire par compression, traction, cisaillement, aussi bien sous chargement statique qu'en fatigue, sous l'effet des charges permanente ou des surcharges ou lors du déplacement des charges

I.4.1.2 Mécanismes de Formation des Fissures [37] [43]

A) Fissuration gouvernée par des contraintes de traction :

On a deux étapes à distinguer :

- 1) Une microfissuration se développe au sein du matériau.
- 2) Les microfissures se connectent pour créer une ou plusieurs macro-fissures, c'est une phase de localisation de la fissuration.
- 3) Les macro-fissures se propagent, conduisant à la rupture du volume du matériau considéré.

B) Fissuration gouvernée par des contraintes de compression

On a trois étapes encore à distinguer :

- 1) Les microfissures sont créées aléatoirement au sein de l'éprouvette. ce caractère aléatoire est lié à l'hétérogénéité du matériau et à l'existence de points durs (les granulats) , l'orientation des fissures, quant à elle, est gouvernée par la différence de raideur de la pâte de ciment et des granulats.
- 2) Les microfissures se rejoignent pour former des macro-fissures, toujours orientées parallèlement à la direction de la sollicitation, délimitant ainsi des « colonnettes ».
- 3) Des fissures obliques apparaissent à l'intérieur des « colonnettes ». ces fissures obliques se rejoignent pour former un plan de glissement également oblique à l'échelle de l'éprouvette.

I.4.1.3 Les Caractéristiques Des Fissures

Les caractéristiques des fissures se résument en

- **L'âge et l'évolution:** il nous permette de connaître la cause de génération mais d'une façon approximative ; La figure suivante montre l'âge de l'apparition des fissures.

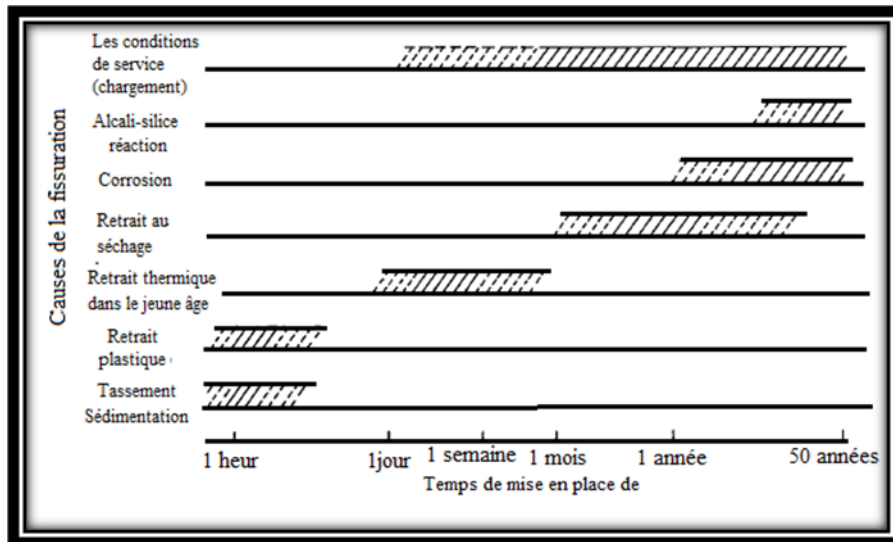


Figure I.19 : Age d'apparition de fissures à partir mise en place de béton [10].

- La morphologie des fissures

✓ **Le tracé:** Le tracé d'une fissure se définit par son orientation et sa longueur mesurable sur l'ouvrage. L'orientation est souvent révélatrice de son origine, lorsque la fissure est continue sur l'axe de l'orientation, elle est dite fissure franche, lorsque l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite discontinue.

✓ **L'ouverture:** On définit l'ouverture d'une fissure par l'ouverture maximale relevée sur le tracé.

✓ **La profondeur:** on distingue

- Une fissure traversant : lorsqu'elle est visible sur deux faces de la structure.
- Une fissure aveugle : si elle est supposée traversant mais bouchée sur la face non accessible de la structure (exemple fissure d'un mur de soutènement) elle est souvent d'ouverture importante.
- Une fissure dite de surface : si l'ouverture est maximale en surface et s'annule au sein du matériau.

- **L'activité:** L'activité caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps.

- Une fissure est dite morte : si l'ouverture reste constante quelles que soient les variations de températures ou de charges.
- Une fissure active : si l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que température, charges, vibrations, hygrométrie ...etc. [8]
- L'ouverture moyenne d'une fissure active est la demi-somme de l'ouverture min et max.

I.4.1.4 Les Différentes causes de fissurations

Plusieurs phénomènes et mécanismes peuvent être à l'origine de l'apparition des fissures, un ou une combinaison de plusieurs mécanismes peuvent être en cause, agissant simultanément ou séquentiellement. un aperçu des principales causes de fissuration est présenté à la **Figure I.20** ainsi que leur position dans l'ouvrage **Figure I.2**

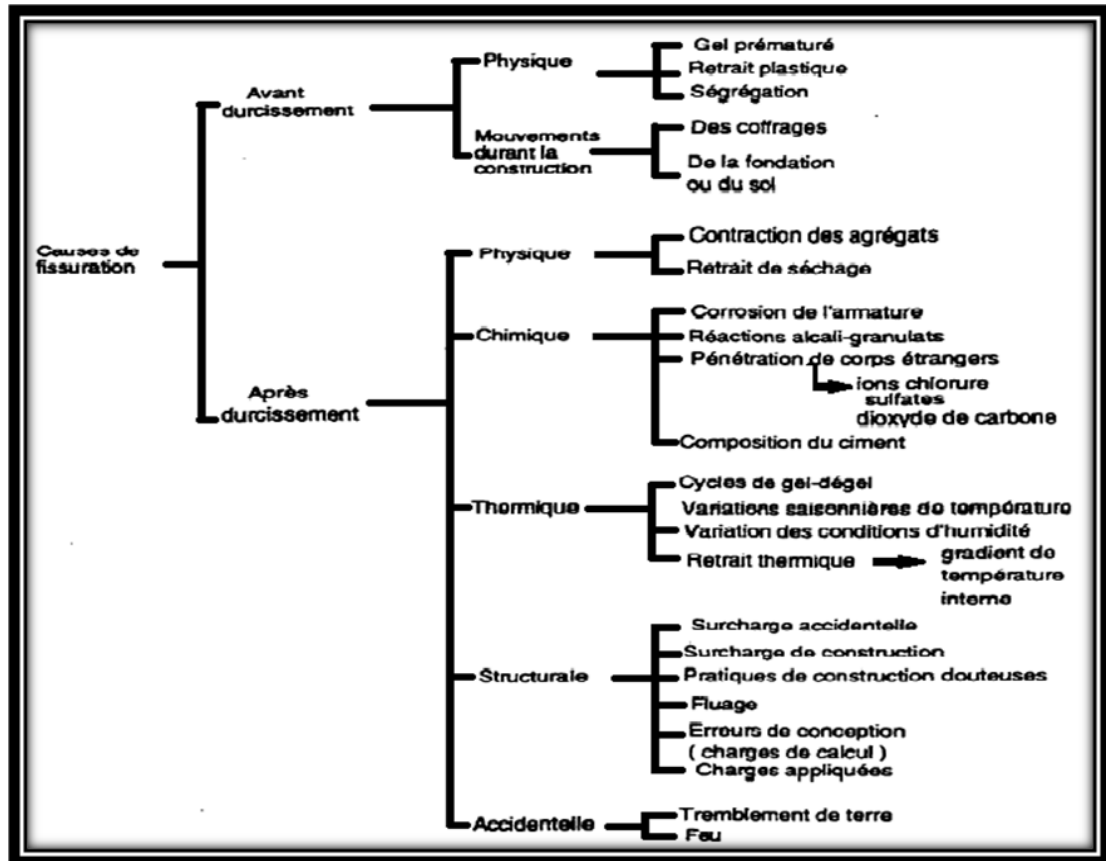


Figure I.20 : les différentes causes de fissuration [28]

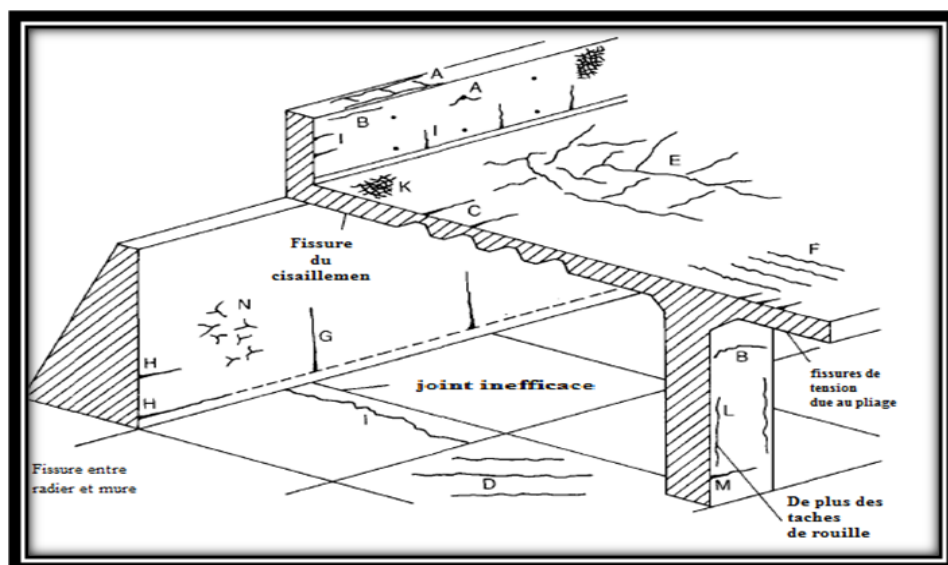


Figure I.21: Principales sortes des fissures et leur position dans l'ouvrage. [10]

Tableau I.4 : Causes des différentes sortes de fissurations et les Précautions pour les 'éviter [10]

Type de fissuration	Position sur la Figure	Sous division	Localisation la plus fréquente	Cause première (exceptés retrait)	Causes secondaire (facteur)	remèdes	Délais d'apparition
Tassement, Sédimentation Du béton frais	A	Proximité Des armatures et des étrépillons	Grande hauteur	Excès de ressuage	Conditions de séchage au jeune âge trop rapide	Réduire le ressuage ou vibration plus soutenue	10mn à 3h
	B	Effet des voûtes	Partie haute des colonnes				
	C	Changement d'épaisseur					
Retrait plastique	D	Diagonal	Chaussées et dallages	Dessiccation rapide du béton frais	Vitesse de ressuage faible	Améliorer la cure au jeune âge	30mn à 6 h
	E	Aléatoire	Dalles armées				
	F	Proximité des armatures	Dalles armées	Dessiccation du béton plus armatures en surface			
Retrait thermique endogène	G	Déformation empêchée par l'extérieur	Mur épais	Exothermie Trop importante	Refroidissement rapide	Réduire la chaleur et/ou isoler	1 j à 2 ou 3 semaines
	H	Déformation empêchée par l'intérieur	Pièces épaisses	Gradient de température élevé			
Retrait de dessiccation exogène	I		Murs et dalles minces	Distance insuffisante entre les joints	Retrait excessif, cure inefficace	Réduire le dosage en eau, améliorer cure	Quelques semaines ou mois
divers	J	Contre les coffrages	Surface laide	Coffrage imperméable	Formule riche en ciment, mauvaise cure	Améliorer la cure et la finition	1 à 7 jours, parfois plus tard
	K	Béton de surface	dalles	Talochage excessif			
Corrosion des armatures	L	naturel	Colonnes et poutre	Enrobage insuffisant			
Réaction alcali-silice	M		Sites humides	Granulats réactifs et teneur en alcalis élevée		Eliminer les causes	Plus de 5 ans
Réaction alcali-granulaire	N		Les emplacements humides	granulats réactifs plus ciment alcalin		Eliminer les causes de réaction	

I.4.1.5 Classification des Fissures selon leur Morphologie:

Il est possible de classer les fissures selon leur morphologie, ce type de classement fait appel uniquement aux apparences et pour qu'il soit efficace, les observations doivent être faites de la manière la plus objective et la plus neutre possible

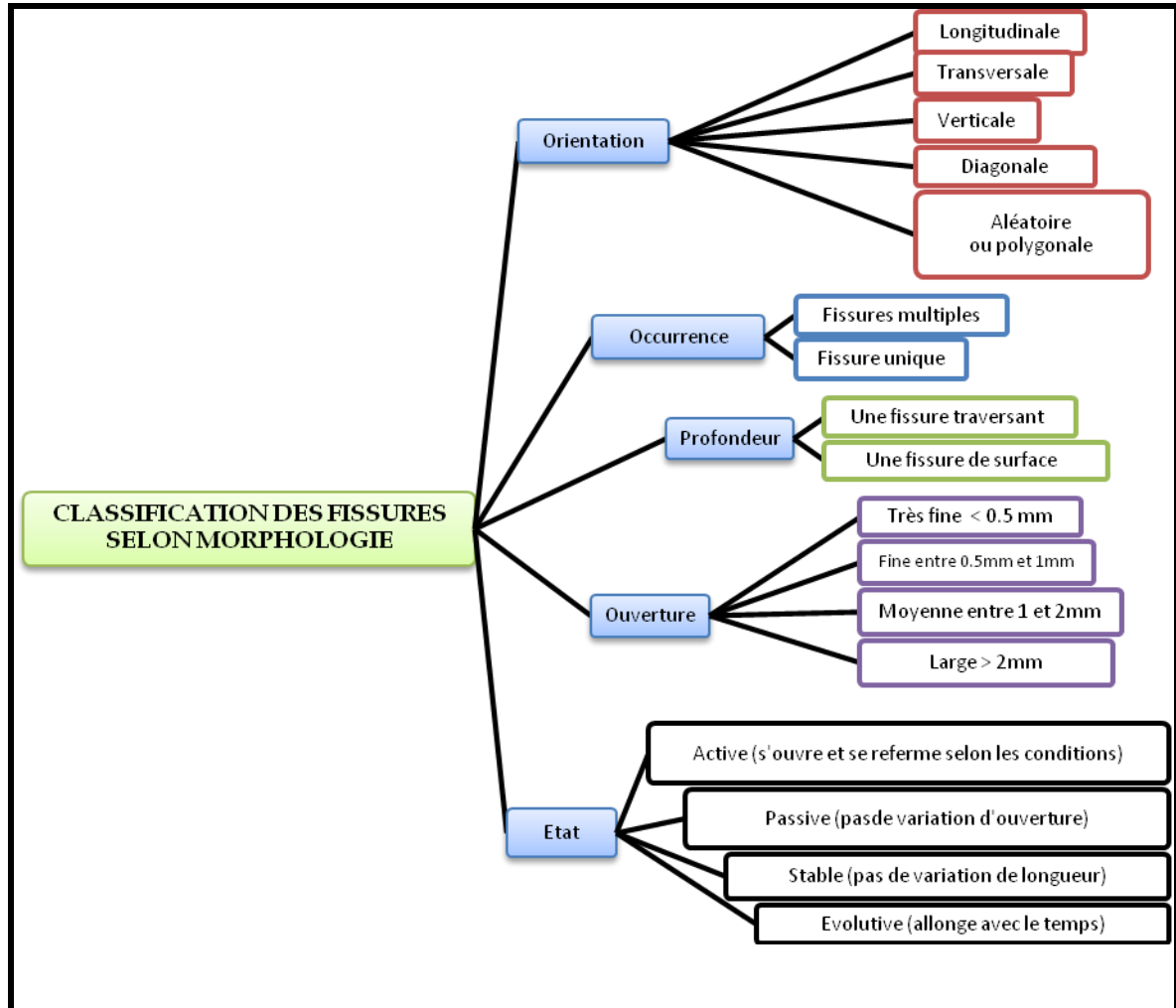


Figure I.22: Classification des fissures selon leur Morphologie [28]

I.4.2 Autres Désordres

a) Efflorescence

L'efflorescence est le résultat de l'hydrolyse des composants de la pâte de ciment dans le béton. L'efflorescence est indiquée par la présence des dépôts blancs sur le béton, le plus souvent sur le dessous des ponts et viaducs et indique que l'eau utilisée dans le processus de mélange de béton a été contaminée.

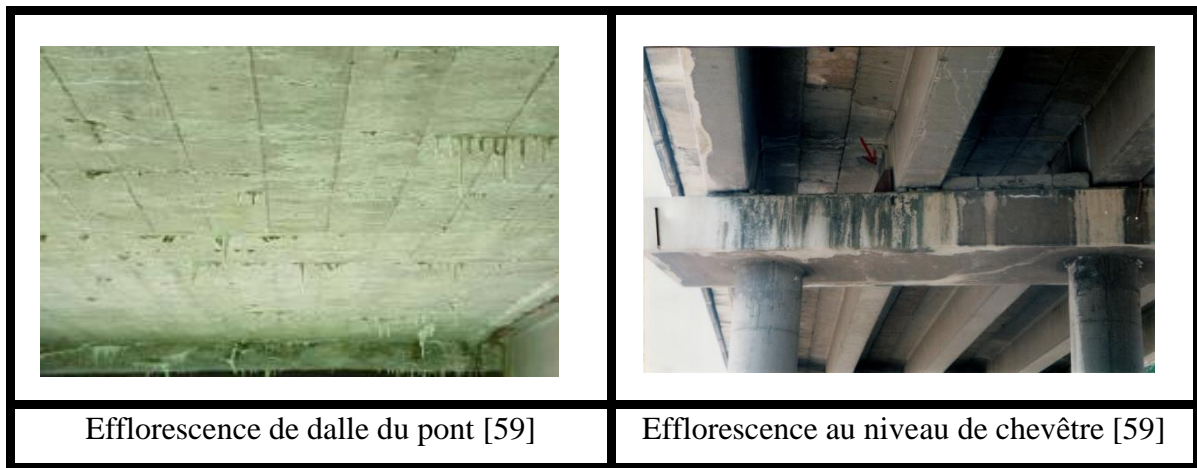


Figure I.23: Efflorescence.

b) Les épaufrures

Elles correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragments, laissant souvent les armatures apparentes. Les épaufrures sont généralement la suite logique d'un écaillage ou elles ont provoqué par des ondes de choc.

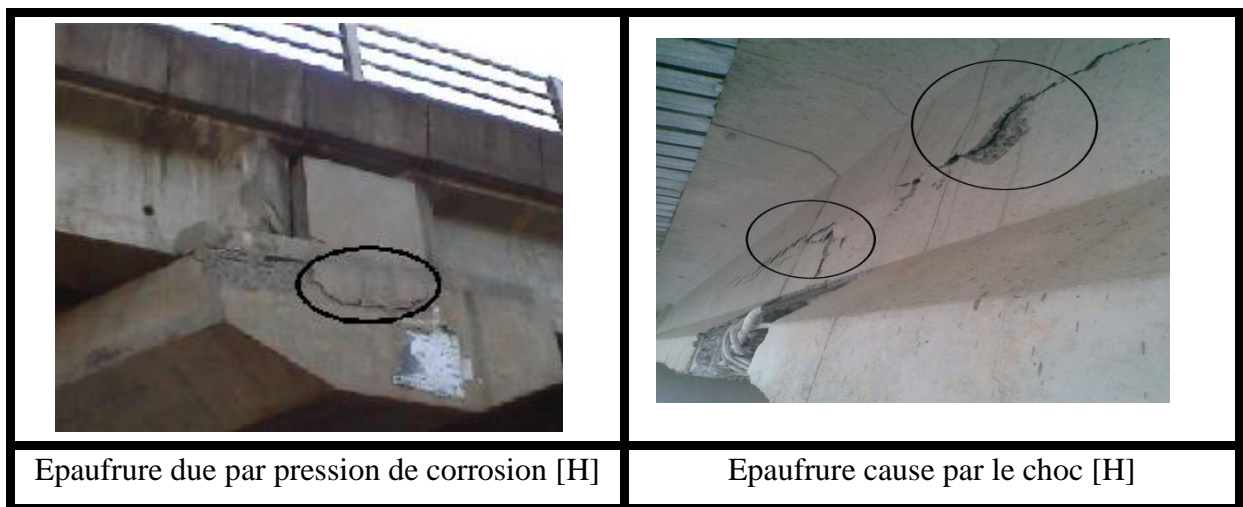


Figure I.24: Les épaufrures.

c) L'écaillage

L'écaillage est un phénomène de désagrégation des surfaces de béton provoqué par leur exposition au gel/dégel en présence d'humidité ou de sels déglacant. Généralement, son apparition commence par de petites zones localisées, qui par la suite peuvent se rejoindre, s'étendre et affecter de grandes surfaces. Lors d'un écaillage léger, les gros granulats restent enrobés dans la pâte.

Pour l'écaillage modéré, la perte d'épaisseur du mortier de surface peut aller de 10 à 15 mm et engendrer la dénudation des granulats. Dans le cas d'un écaillage important, la surface est détruite sur une grande épaisseur et elle est caractérisée par une dénudation et occasionnellement par un arrachement des granulats.

d) Délamination

L'action conjuguée des sollicitations climatique, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdi de pont à provoquer des « Délamination » du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaques de béton et à la création de trous dans les tabliers de pont. Le délaminage est la séparation des couches de béton ou à proximité de la couche extérieure de l'acier d'armature. Le délaminage est causé par l'expansion de la corrosion d'armature en acier et peut conduire à la fissuration sévère. La rouille peut occuper jusqu'à dix fois le volume de l'acier corrodé qu'il remplace.

Figure I.25: Délamination.

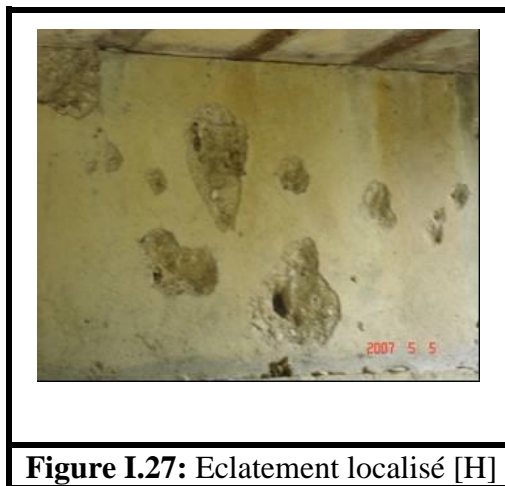
e) Défauts de construction

Cela inclut les questions de consolidation tels que *les poches de roche*, *les vides en nid d'abeille*, *des trous de bugs*, et *des stries de sable* qui peuvent résulter de vibrations incorrecte, mélange sec, sans super Plastifiant, mélanger trop mouillées, l'espacement des barres d'armature incorrecte ou mauvaise sélection des agrégats.



f) Eclatement localise

Sont le résultat de réactions alcali-silice se déroule dans le béton comme des fragments conique apparaissant à la surface du béton en laissant de petits trous, des pertes des particules seront généralement trouvés au fond du trou.



g) La ségrégation

Variation dans la répartition des éléments du béton, se traduisant par des concentrations différentes des composants du béton. Une ségrégation dans la masse de l'ouvrage conduit à un affaiblissement de sa résistance et une diminution de son étanchéité.

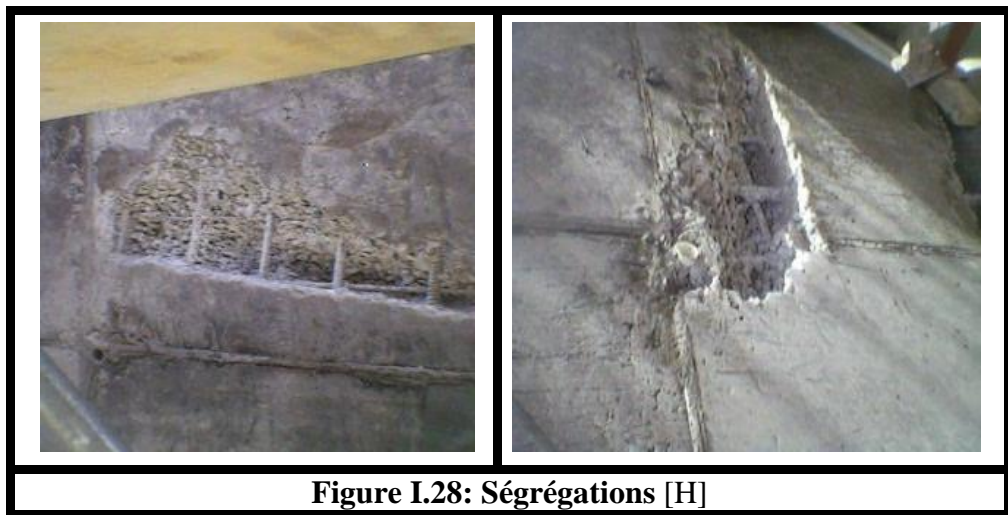


Figure I.28: Ségrégations [H]

h) La désintégration

Désorganisation de la peau du béton pouvant se poursuivre par une destruction avancée du béton d'un élément de l'ouvrage, et parfois assimilable à un pourrissement du matériau.

En fin Le tableau suivant montre les principaux symptômes de la dégradation du béton :

Tableau I.5 : Les principaux symptômes de la dégradation du béton [47]

	Fissures	Épaufrures	Écaillage	Désagrégation	En activité ou en évolution
Carbonatation					
Corrosion des armatures	X	X			OUI
Dégradation interne (alcali-réaction,...)	X				OUI
Attaque bactériologique	X			X	OUI
Attaque sulfatique (externe)	X		X	X	OUI
Retrait, tassement	X				NON
Gel-dégel	X		X	X	OUI
Chocs	X	X			NON
Abrasion, érosion				X	OUI
Défauts d'exécution	X	X			NON
Incendie	X		X	X	NON

Conclusion

On a vu dans ce Chapitre que tous les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues par plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maîtriser tous, donc ***la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable***, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recourir à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

A cet effet il nous faut plus de la compréhension des mécanismes dégradant, la maîtrise des méthodes des détectations des causes et pathologie ainsi que celles des séparations entre ces pathologies pour l'élaboration d'un diagnostic le plus juste possible.

CHAPITRE II

Méthodes De Diagnostic Et Investigation

II.1 INTRODUCTION

On entend par surveillance, toute visite ou inspection visant à déceler tout dysfonctionnement ou dégradation au niveau des éléments ou des parties de l'ouvrage.

La surveillance des ouvrages est destinée à tenir à jour une connaissance suffisante de son état de dégradation, afin de permettre d'effectuer dans un délai adéquat, les opérations nécessaires d'entretien ou de remise en état ,ainsi, le suivi d'évolution des désordres détectés dans un ouvrage (dégradation par corrosion ou autres) est fondamental dans l'efficacité de ces actions. de ce fait, l'inspection des ouvrages dégradés constitue une étape importante dans l'évaluation des conditions d'état et dans la définition des éventuels travaux de réparation.

II.2 Pourquoi un diagnostic ?

Le diagnostic d'un ouvrage au sens large du terme permet d'évaluer dans quelles mesures il remplit ses fonctions structurelles et de service, c'est-à-dire de vérifier qu'il satisfait aux conditions de sécurité et d'utilisation qui sont définies par la réglementation et par les besoins de son propriétaire ou usager. le vieillissement d'un ouvrage est marqué par l'apparition de désordres spécifiques. Dans le cadre d'un diagnostic, deux types de missions peuvent être réalisées :

- Sur un ouvrage sain, il peut vouloir estimer, vérifier ou contrôler les caractéristiques de la construction, c'est notamment le cas des ouvrages à « caractère exceptionnel » (grand ponts...etc.) ou des structures innovantes dont il souhaite connaître le comportement en service ;
- Sur un ouvrage supposé endommager : l'inspection visuelle ou l'auscultation peut alors être utilisée pour détecter l'endommagement ;
- Sur un ouvrage visiblement endommagé dont les désordres sont susceptibles ou non de s'aggraver ou de mettre en cause la sécurité : il peut faire appel à l'auscultation pour caractériser l'endommagement (gravité de l'endommagement, étendue spatiale...etc.).

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

II.3 Les données nécessaires pour la surveillance d'un Ouvrage

Les informations nécessaires pour mettre en application une surveillance rigoureuse à un Ouvrage se répartissant de la façon suivante :

II.3.1 Les données de recensement

Elles renseignent ce qui suit :

- ✓ la localisation du pont ;
- ✓ les caractéristiques géométriques de l'ouvrage ;
- ✓ le type d'ouvrage et les matériaux utilisés dans sa construction ;
- ✓ L'importance historique du pont ;
- ✓ la possibilité et la longueur de déviation en cas de nécessité ;
- ✓ l'importance de réseau dans lequel se trouve le pont ;
- ✓ l'année de construction du pont ;
- ✓ la charge admissibles ainsi que l'historique de réparation si elle existe.

II.3.2 Les données d'évaluation

Les données permettant l'évaluation de l'endommagement d'un ouvrage en béton sont nombreuses. On peut alors classer les informations recherchées en quatre catégories selon leur nature ou leur origine :

- **caractéristiques de l'ouvrage** : mesure de l'épaisseur de béton, mesure de l'enrobage des barres d'armatures dans un béton armé, positionnement et dimensionnement du ferrailage passif/actif, localisation des joints de coulées ...etc.
- **caractéristiques du matériau** : caractérisation de la composition, évaluation de l'ensemble des caractéristiques mécaniques et physique des matériaux.
- **caractéristiques pathologiques** : détection et localisation des parties d'un ouvrage atteinte d'alcali-réaction, détection et quantification des zones d'un ouvrage contaminées par des chlorures, détection, localisation et dimensionnement de vides ou d'hétérogénéités (fissures, microfissures, délaminations, nids d'abeille)...etc. [44]

II.3.3 Les données décrivant le niveau de service rendu

S'obtiennent en comparant le niveau de service, effectivement offert par le pont, avec le niveau de service actuellement requis par rapport à un nouveau pont que l'on construisait sur le même réseau ou pour une nouvelle condition du trafic sur le même réseau. à cet effet on

peut conclure que ces données permettant l'évaluation de l'état de gravité des ouvrages et le type d'insuffisance soit :

A) L'insuffisance structurelle signifie que le pont n'a plus sa résistance mécanique originelle, à cause de sa dégradation ; il ne peut donc plus supporter sans risques le trafic pour lequel il a été conçu. En conséquence, il doit être limité en charge, ou en vitesse, ou en nombre de voies de circulation, voire fermé complètement au trafic [61] ;

B) L'insuffisance fonctionnelle signifie que la conception originelle du pont l'a rendu inadapté aux nouvelles conditions du trafic, à cause par exemple, d'une insuffisance des charges admissibles, ou du gabarit, ou de la largeur utile [61].

II.4 Différents types de surveillance

Tout au long de sa vie, l'ouvrage devra être soumis à des inspections, de plusieurs types ou niveaux, afin de savoir l'état. :

II.4.1 Inspection visuelle

II.4.1.1 Définition

Appelée aussi « de routine », « continue » ou « préliminaire », les inspections visuelles représentent les sources principales d'information relevées pendant les inspections principales. Elles fournissent des informations de base suffisantes pour qu'un avis préliminaire soit présenté vis-à-vis des conditions de l'élément dégradé. Plusieurs méthodes de classification basées sur les caractéristiques de ces désordres sont disponibles dans la littérature, notamment IQOA, 1996, ACI.

II.4.1.2 La Procédure IQOA, 1995

Présente des catalogues de désordres destinés à faciliter la cotation des ouvrages en application de la méthodologie I.Q.O.A. (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art). Chaque catalogue traite des principales dégradations qui peuvent atteindre des éléments structuraux spécifiques, tel que le tablier et les piles, d'un type d'ouvrage comme les ponts à poutres sous chaussée, les ponts dalle en béton armé, les ponts voûtés en béton armé... (Tableau Des catalogues de défauts relatifs aux équipements et aux éléments de protection sont aussi proposés. La qualité des ouvrages est donc vérifiée selon 6 classes d'état :

Tableau II.1: Extrait de la classification des défauts des poutres pour les ponts à poutres sous chaussées en béton armé selon la méthodologie I.Q.O.A.

Classe 1	Ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.
Classe 2	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
Classe 2E	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé URGENT pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
Classe 3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
Classe 3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation URGENTS liés à l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.
Classe NE	Ouvrage non évalué.

II.4.1.3 La Référence ACI, 1993

Présente une méthode de classification visuelle des dégradations à partir d'une codification. Celle-ci est attribuée sur l'identification et la description du désordre. Il fournit aussi les causes probables et suggère les détails qui doivent être collectés pendant l'inspection. Le Tableau 5.2 représente un extrait de la méthode de classification proposée par ACI, 1993. On note, dans les situations illustrées, que l'investigation ne concerne pas seulement les dégradations de la structure provoquées par la corrosion (B2 et C4).

Tableau II.2: Inspection visuelle – Classification simplifiée de dommages **ACI**. [3]

Codification	Identification du dommage	Description	Causes	Données collectées
A1	fissures	fissuration superficielle ou profonde du béton	surcharges ou corrosion	direction de la fissure, longueur, profondeur
B2	efflorescence	couche blanche déposée sur la surface	Lixiviation des hydroxydes avec ou sans formation de carbonates	Définition de la surface affectée et de la quantité de produit (stalactites)
B3	taches d'oxydes	taches de couleur marron	corrosion de l'armature	localisation, intensité, dommages
B4	taches d'humidité	zones superficielles du béton avec des indices d'humidité	traces d'écoulement et de condensation	surface affectée
C3	détachement du béton de l'enrobage	morceaux de béton détachés	pression interne provoquée par les produits de la rouille ou par les chocs	surface affectée et profondeur
C4	intempérie	lixiviation de la surface du béton	action de l'environnement	surface affectée et profondeur

II.4.1.4 Outils et équipement pour l'inspection visuelle

En cours de l'inspection visuelle l'ingénieur doit être bien équipé avec des outils pour faciliter l'inspection. Il s'agit notamment d'une série d'accessoires courants tels que les rubans de mesures, décamètre, des marqueurs, des thermomètres, des anémomètres et autres. Jumelles, télescopes, ou autres instruments un peu plus chers tel que les fibroscopes qui sont utiles lorsque l'accès est difficile. Un microscope de largeur des fissures ou une Jauge de profondeur, tandis qu'une loupe ou un microscope portable est pratique pour l'examen de près. Un bon appareil photo avec un bon zoom nécessaires et des microlentilles et autres accessoires, tels que des filtres polarisés, facilite la documentation picturale de défauts, et un tableau des couleurs portables est utile pour identifier les variations dans la couleur du béton. Un ensemble complet de dessins adaptés montrant des vues en plan, élévations et les détails structuraux permettant l'enregistrement des observations à faire.

II.4.1.5 Buts de l'inspection visuelle

L'inspection visuelle sert à :

- **Qualifier**

Un désordre spécifique à une origine et des conséquences particulières. La qualification permet de savoir à quel désordre on est confronté et donc quel type de traitement/réparation est à mettre en place.

- **Localiser**

La position d'un désordre sur l'ouvrage donne des indications sur son degré d'importance et son origine. En outre, la localisation permet de cibler d'emblée les zones à traiter de manière urgente et de choisir les travaux en fonction des contraintes d'accès.

- **Quantifier**

Ceci a pour but de connaître l'étendue des désordres et donc d'évaluer les méthodes les plus adaptées pour effectuer les réparations.

- **Comparer**

Une comparaison de l'état de l'ouvrage par rapport à l'état précédent ou par rapport à un état de référence, et cela en vue de déceler et de signaler à temps toute nouvelle anomalie ou toute évolution anormale d'une anomalie existante.

II.4.2 Inspections Détaillée

Elle est réalisée par un organisme spécialisé. C'est une inspection qui est menée avec soin et dans le détail, en employant tous les moyens d'accès nécessaires pour accéder aux différentes parties et éléments de l'ouvrage, ainsi que l'outillage adéquat de maître d'ouvrages

Dans l'inspection détaillée, il est utilisé les moyens d'accès spécifiques pour accéder à toutes les parties d'ouvrage avec tout l'outillage nécessaires à cet effet, à savoir : nacelles, échafaudages, matériel élévateur, barques, équipements de plongée, aides visuelles, marteau, fil à plomb, Cette inspection est complétée éventuellement par le nivellement des appuis et la mesure des flèches de travées. La périodicité de ces inspections ou visites est en moyenne de cinq (05) ans jusqu'à dix (10) ans, si l'ouvrage ne présente pas de dégradation, elle est réduite à une (01) ou à deux (02) années pour le cas d'ouvrages spécifiques. Cette visite sera sanctionnée par un procès-verbal ou rapport de visite dans lequel apparaîtront en détail tous les renseignements et résultats de la visite (appuyée par des prises de vues), ainsi qu'une évaluation précise de l'état de l'ouvrage.

L'inspection détaillée peut défaire sur :

II.4.2.1 Une visite annuelle

Pour certains ouvrages comportant des dégradations ou désordres particuliers et pour les ouvrages relativement anciens, avant de les programmer pour l'entretien ou la réparation.

II.4.2.2 Une auscultation approfondie

D'éléments ou parties d'ouvrage, ou de tout l'ouvrage. Des investigations sont menées au moyen d'appareillages spécifiques pour apprécier la qualité et les caractéristiques des matériaux en place, le comportement de l'élément ou de la structure en service, évaluer les efforts et contraintes.

II.4.2.3 Une surveillance renforcée

Lorsque l'auscultation ne permet pas de répondre à certaines questions qui se posent sur l'état de l'ouvrage, ou lorsqu'il y a possibilité de remplacement de l'auscultation, on recourt au suivi de l'évolution de certaines dégradations par des examens fréquents et des mesures périodiques, pendant une certaine durée (une année au minimum).

II.4.2.4 Une haute surveillance [7]

Est une mesure d'exception, destinée à surveiller l'apparition ou à suivre l'évolution d'un état considéré comme dangereux et à permettre de prendre en temps utile toutes les dispositions nécessaires pour maintenir la sécurité.

L'objectif fondamental de la haute surveillance est d'assurer une sécurité permanente, compte tenu de l'utilisation qui sera faite de l'ouvrage avant réparation. Un deuxième objectif est de suivre l'évolution réelle des désordres, pour qu'il puisse en être tenu compte dans le projet de réparation.

II.4.2.5 Inspection des dommages [22]

Dans le cas de l'endommagement d'un pont, une inspection des dommages est généralement appelée à évaluer la gravité des dégâts et de déterminer la nécessité de restrictions de charge ou de fermeture complète. Le niveau et le détail d'inspection dans cette cas dépend de la gravité et l'étendue des dégâts. Si les dommages significants sont trouvés, l'inspecteur peut généralement s'attendre à faire des mesures détaillées des éléments endommagés (par exemple le niveau de perte de la section). Il est évidemment souhaitable que l'inspecteur ait la capacité de faire des calculs d'ingénierie dans le domaine spécifiée liées à la nécessité de restrictions de charge ou de fermeture.

II.4.2.6 Inspection détaillée particulières

Elles sont effectuées en dehors du programme d'inspections périodiques (primaires et détaillées). Elles sont déclenchées par l'administration :

- a) Suite à des circonstances anormales : Crues, glissement de terrain, passage de convois exceptionnels, défaillance imprévue, désordre occasionné par choc, séisme, ...etc.
- b) A l'occasion de la mise en service d'un ouvrage neuf ou d'un ouvrage ayant subi des travaux de confortement ou de réhabilitation.
- c) En vue de réévaluation de la portance vis-à-vis de nouvelles réglementations.

II.4.3 Procédures d'inspection des Parties des ponts

L'inspection doit porter sur l'examen des parties de l'ouvrage tel que :

- a) **Fondations**: il y a lieu de déceler tout mouvement du sol de fondation, à travers les mouvements d'appuis (inclinaison, tassement général ou différentiel) qui peuvent être occasionnés par un glissement de terrain, la présence de cavités souterraines, variation du niveau de la nappe phréatique et les affouillements pour les appuis dans les cours d'eau.
- b) **Infrastructure** : c'est la partie apparente des appuis du tablier. Il y a lieu de vérifier la présence et la nature des fissures, l'existence d'éclatements de béton, la corrosion des armatures, l'état des joints de maçonneries, vérifier si la maçonnerie n'est pas dérangée par la végétation et les arbustes, ...etc.
- c) **Appareils d'appuis** : vérifier s'il n'y a pas d'écrasement d'appareil, de déformations importantes, de blocage quelconque, ...etc.
- d) **Superstructure** :
 - ✓ Tabliers en béton : vérifier le contact tablier appui, noter en particulier l'existence de fissures et leurs directions sur chaque élément porteur, relever les avaries de nature chimique, les éclats de béton et écaillages, la corrosion des armatures, les dégâts accidentels, étanchéité de la dalle, ...
 - ✓ Tabliers métalliques : vérifier l'état de la protection (peinture), la présence de fissures, relever les déformations permanentes (flèches, flambements, voilements, torsion, ondulations, vérifier l'état des soudures, des assemblages, des boulons et rivets, étanchéité du tablier, ...
 - ✓ Ponts suspendus : vérifier l'état des colliers, selles, sabots et culots, la rupture de fils et câbles, l'état de la protection (peinture métallique), la tension relatives des câbles...etc.

- e) *Joints de dilatation* : il faut porter attention aux défauts suivants : desserrement des boulons, insuffisance du souffle, étanchéité du joint, ...
- f) *Systèmes d'évacuation des eaux* : vérifier si les barbacanes et gargouilles ne sont obstruées, si les conduites et descentes d'eau sont en bon état, ...
- g) *Système de retenue latérale* : relever les dommages occasionnés par les véhicules, l'état de la protection (peinture) des gardes corps et glissières métalliques,

II.4.4 L'auscultation du pont

II.4.4.1 Les méthodes d'auscultation du béton

a) *Méthodes Électriques* [34]

Les méthodes traditionnelles pour évaluer la corrosion des armatures sont basées sur des techniques électrochimiques telles que la mesure du potentiel spontané pour détecter les zones de corrosion active et la mesure de la résistance de polarisation pour estimer la vitesse de corrosion.

Récemment mise au point, une nouvelle technique non destructive de polarisation, dite méthode par impulsions galvanoplastiques, permet la réalisation rapide de mesures de vitesse de corrosion (10 à 30 secondes/mesure).

Cette méthode est basée sur l'analyse de la courbe des variations de potentiel des aciers sous l'influence d'impulsions électriques de faible intensité, émises dans le béton dans un volume déterminé.

La mesure simultanée du potentiel d'électrode, de la résistance électrique du béton et des variations de potentiel provoqué par l'injection de ces impulsions permet, par calcul, de déterminer la résistance de polarisation. Cette résistance de polarisation peut être convertie en vitesse de corrosion par une relation déduite des lois de Faraday.

La vitesse de corrosion, exprimée en micromètres par an, traduit la perte de section des aciers soumis à la corrosion et, par conséquent, permet d'aborder les questions de durabilité d'une structure.

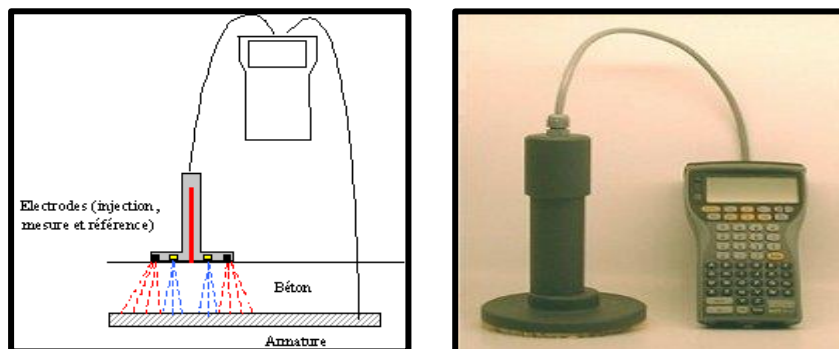


Figure II.1: Le GALVAPULSE de la Société Germann-Instrument.[34]

b) Les Méthodes Optiques [44]

Avec le développement de l'informatique et de la vidéo, ces techniques sont aujourd'hui des méthodes dont l'utilisation est de plus en plus simple, mais il ne faut pas perdre de vue la difficulté d'interprétation qui demande encore aujourd'hui une très bonne connaissance de la mesure et de la physique des phénomènes mis en jeu.

Parmi cette grande famille, nous pouvons citer trois techniques de mesure optiques :

La photogrammétrie, la projection de franges et l'interférométrie. Ces méthodes sont, de manière générale, de plus en plus courantes dans le monde industriel et notamment en génie civil.

c) Les Méthodes Radiographiques [16]

L'intensité d'un faisceau de rayons X ou des rayons γ subit une perte d'intensité en passant à travers un matériau. Ce phénomène est dû à l'absorption ou la diffusion des rayons X ou γ par l'objet exposé. La quantité de rayonnement perdue dépend de la qualité du rayonnement, la densité du matériau et de l'épaisseur traversée. Le faisceau de rayonnement, qui se dégage de la matière, est généralement utilisé pour exposer un film sensible aux radiations afin que les différentes intensités de rayonnement se montrent comme des densités différentes sur le film.

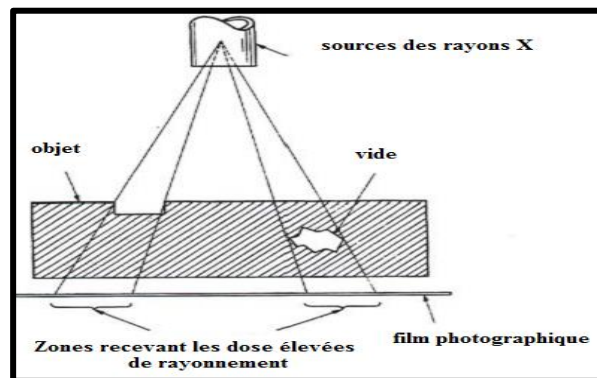


Figure II.2: Principe de la radiographie. [16].

d) Émission acoustique [17]

Une émission acoustique est causée par une déformation plastique ou par la fissuration d'un matériau. Elle crée une onde de contrainte à l'intérieur du matériau qui se propage lorsque ces ondes de contraintes sont captées par un récepteur, ce dernier répond aux mouvements de la surface du béton. Par contre, il existe des difficultés de réception des ondes de contraintes et l'évaluation d'une émission acoustique provenant du béton est très complexe. La principale difficulté d'interprétation de l'émission acoustique provient de la nature rapide et à court terme du signal. Il est donc important de se procurer l'équipement le plus sophistiqué possible, afin de tirer le maximum d'information des signaux.

Tableau II.3 : Exemples des essais utilisés au cours des inspections [3]

Méthode	Principe de l'opération	Applications	User expertise	Avantages	Limitations
émission acoustique (Clifton et al.1982)	La surveillance continue des structures au cours du service, détecter l'imminence d'échec; contrôle la performance de la structure	Lors de croissance des fissures ou des déformations plastique, la libération rapide de l'énergie de déformation produit des ondes acoustiques (du son) qui peut être détectée par des capteurs en contact avec ou attaché à la surface de l'objet testé	Une connaissance approfondie nécessaires pour la réalisation d'essai et l'interpréter les résultats	Surveillance structurelles en fonction des charges appliquées; capable de localiser possibilité de défaillance ; l'équipement est portable et facile à utiliser, Efficace pour les essais de charge	-Essais coûteux, -Peut être utilisé que lorsque la structure est chargée et en cas où on a une Croissance des dégradations ; -L'interprétation de résultats requiert un expert; -Actuellement largement limitée aux laboratoires; -Expérience limitée, -Nécessite des autres travaux.
l'impact acoustique (Clifton et al.1982)	Utilisé pour détecter décollement, délaminations, les vides et les microfissures	Surface de l'objet est frappée avec un outil. Les caractéristiques de fréquence et d'amortissement du bruit résultant donnent une indication de la présence de défauts, l'équipement peut varier d'un simple marteau à un matériel électronique sophistiqué	Faible niveau d'expertise requis pour utiliser le système auditif, mais le système électronique nécessite une formation	L'équipement portables, facile à se produire avec le système auditif; dispositif électronique nécessite plus de matériel	La géométrie et la masse de l'objet testé influent sur les résultats ; normes de référence nécessaires pour les tests électroniques
carottage (ASTM C42)	Détermination directe de la résistance du béton ; L'évaluation du type, condition et la qualité du béton, des agrégats, du ciment et d'autres composants	Réalisation de carottage ; les essais peuvent être effectués sur les carottes pour déterminer la résistance à la compression et à la traction, les propriétés de torsion, le module d'élasticité etc.	Un soin particulier pour éviter l'endommagement des carottes pendant l'opération du carottage ; niveau modéré de l'expertise nécessaires pour tester et évaluer les résultats	La méthode la plus acceptée pour déterminer la force la fiabilité, et la qualité des bétons coulés sur place. Elle est bonne pour examiner les fissures des armatures intégrées et pour l'échantillon pour tests chimiques	Carottage des structures, dommages et réparations peuvent être nécessaires des Essais destructifs
Gamma Radiography (Malhotra1976)	Lieu d'estimation, la taille et l'état des barres d'armature; voir dans le béton, la densité	Basé sur le principe que le taux d'absorption des rayons gamma est affectée par la densité et l'épaisseur de l'éprouvette; les rayons gamma sont émis par la source, pénètre l'échantillon, sortie sur la face et sont enregistrés dans le dossier	L'utilisation de rayons gamma la production d'isotopes est étroitement contrôlée par le CNRC, les équipements doivent être exploités par des inspecteurs agréés	Défauts internes peut être détectée; applicables à la variété des matériaux; enregistrement permanent sur le film; appareils à rayons gamma facilement portable	L'équipement est cher; source de rayons gamma est la santé et la sécurité; nécessite un accès aux deux côtés de l'éprouvette
scléromètre (ASTM C805)	Compare la qualité du béton de différentes zones de l'échantillon, les estimations de la résistance du béton en fonction des courbes d'étalonnage avec une précision limitée	Printemps de masse conduit surface de frappe de béton et de la distance de rebond est donnée dans les valeurs de R; dureté de surface est mesurée et la force est estimée à partir des courbes d'étalonnage fournis par le fabricant de marteau	simple à utiliser, peut être facilement exploité par le personnel de terrain	L'équipement est léger, simple à utiliser et peu coûteux, grande quantité de données peut être rapidement obtenue; bon pour la détermination de l'uniformité du béton et du stress force potentiellement faibles	Résultats affectés par l'état de la surface de béton; ne donne pas de prévision précise de la force; estimations de la force doit être utilisée avec grand soin; étalonnage fréquent des équipements est nécessaire.

I.4.4.2 La Pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END

Pour les caractéristiques géométriques, pour la caractérisation physique et le diagnostic d'état du matériau, pour la détection d'objets et de défauts, et pour la caractérisation mécanique du matériau ou de l'ouvrage

Tableau II.4 : Pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END [5]

Technique utilisée													
	US	IE	EA	OS	TO	RAD	CAP	BF	IR	RHO	PC	VC	γ/X
Épaisseur	C ¹ B ²	A				A							A ²
Repérage d' armatures						B A ³		A ³		A ³			A
Diamètre d' armatures								A					A
Teneur en chlorures						C				C			
Profondeur de carbonatation	C			C									
Taux d' humidité	C			C		B	A		B	B	C		
Porosité	C			C		C				C	C		
Corrosion d' armatures			B								B	A	
Profondeur et étendue du délaminage avec accès par une seule face	C	A	B ⁴	C		B			A ⁵ B	B			C
Microfissuration	C		B ⁴	C	C				C	B			
Macro fissure visible	B		A ⁴	C					C	B			C
Résistance en compression	C	C		C	C					C			
Module d' élasticité en petites déformations (module d' Young)	A	A		A ⁶	A								

1si accès par une seule face, 2si accès par les deux faces, 3si 1' enrobage est faible, 4si le défaut est évolutif, 5étendue du délaminage, 6module de cisaillement G.
 US = ultrasons, IE = impact écho, EA = émission acoustique, OS = onde de surface, TO = tomographie acoustique, RAD = radar, CAP = capacitif, BF = méthodes basse fréquence, IR = thermographie infrarouge, RHO = résistivité, PC = potentiel de corrosion, VC = vitesse de corrosion, γ/X = radiographie, PHG = photogrammétrie, FRA = projection de franges, HOL = holographie, SHE = shearographie.

Représente la pertinence de l'utilisation d'une méthode d'END en fonction du paramètre recherché. Pour chacune des techniques et en fonction de la pertinence de l'utilisation de la méthode, une évaluation est fournie sur la base d'un simple indice A, B ou C. Ainsi, l'indice A indique une notion de « bonne pertinence » au regard du critère étudié, alors que l'indice C révèle un niveau de difficulté rencontré important, voir une incompatibilité ou une impossibilité théorique ou pratique.

II.4.5 Choix des méthodes d'essai

La Sélection détaillée des méthodes d'essai sera basé sur une connaissance des objectifs visés, couplée à une connaissance de limitations d'accès pratiquement obtenus à partir de la visite préliminaire du site ainsi que les limitations des essais. L'inspection visuelle détaillée sera généralement nécessaire pour établir l'emplacement précis de détérioration, et leurs causes probables.

Les considérations importantes dans le choix des méthodes sont les suivantes:

- a) La disponibilité et la fiabilité des étalonnages, qui peuvent être nécessaires pour relier les valeurs mesurées et les propriétés requises. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'aller de l'examen visuel vers l'écrasement des carottes pour réaliser l'étalonnage ;
- b) L'effet des dommages, ce qui porte à la fois l'aspect de surface de l'organe de test et la probabilité de dégâts structurels causée par l'effet destructif de l'essai sur les sections d'ouvrages ;
- c) Limites pratiques, les caractéristiques importantes comprennent la taille et le type d'élément à tester, son état de surface, la profondeur de la zone de test, l'emplacement de l'armature et l'accès aux points de test. D'autres facteurs peuvent également inclure la facilité de transport d'équipement, l'effet de l'environnement sur les méthodes de test et la sécurité du personnel de test et le grand public pendant les tests.
- d) La précision des résultats, ce qui influence non seulement le choix de la méthode d'essai, mais aussi le nombre de points d'essais nécessaires pour obtenir des résultats significatifs.
- e) L'aspect économique, le coût d'examen, des retards doivent être soigneusement liés au coût probable d'un programme de test particulier. Le budget disponible peut également être une contrainte influençant le choix des méthodes et la richesse des essais possibles.

II.4.6 Couplage Des Essai

II.4.7.1 Définition

Toutes les méthodes d'essai qui sont disponibles pour l'évaluation de béton souffrent de limitations, et la fiabilité est souvent remise en question, donc l'utilisation successive, combinée ou simultanée de deux ou plusieurs méthodes peut aider à surmonter certaines de ces difficultés, ainsi que l'information fournie par le couplage sera alors plus riche que la simple somme des informations fournies par chaque méthode

II.4.7.1 Objectif

Les principaux objectifs visés lors de l'utilisation de couplage des essais peuvent être :

- La confiance sera beaucoup augmentée si les résultats et les conclusions sont conformes à partir des méthodes différentes.
- Combinaisons des méthodes sont largement utilisées dans les situations où une méthode est considérée comme un préalable à l'autre
EX : Pour évaluer l'emplacement des armatures on utilise des méthodes simples non destructifs afin d'évaluer l'endroit le plus intéressant pour les essais les plus coûteux ou dommageable
- Précision des estimations faites sur les paramètres mesurés, de façon à conforter des résultats, à diminuer l'incertitude sur les mesures
- Rapidité d'obtention des conclusions de telle sorte que par le couplage, certaines hypothèses puissent être levées

Les tableaux suivants présentent les différents types d'évaluations du béton ainsi que les types des essais nécessaires

Tableau II.5 : Couplage des essais pour l'évaluation des propriétés du béton.[3]

	Impact acoustique (tableau 1.3)	Essai pourcentage des vides (ASTM C457)	teneur en ciment (ASTM C1084)	Essais chimiques	tests de base	Mesures de potentiel électrique (tableau 1.3)	Les mesures de résistance électrique (Table 1.3)	Essais flexion (ASTM C42)	Essais de gel-dégel (ASTM C666)	Gammagraphie (tableau 1.3)	Hygromètre nucléaire (tableau 1.3)	Essai de perméabilité (CRD C48)	L'analyse pétrographique (ASTM C856)	Essai d'arrachement (ASTM C900)	scléromètre (ASTM C805)	Impulsions ultrasoniques (ASTM C597)	Résistance à la pénétration (ASTM C803)
L'acidité				●									●				
Teneur en air		●											●				
Réaction Alkali-carbonate													●				
Réaction Alkali-silice													●				
Teneur en ciment			●	●									●				
Composition chimique				●									●				
La teneur en chlorures				●	●								●				
Résistance à la compression					●									●	●	●	●
Propreté des agrégats				●									●				
Propreté d'eau de gâchage				●									●				
Environnement corrosif				●		●											
Fluage					●												
Densité					●					●							
Allongement					●												
Composants congelés													●				
Module d'élasticité					●											●	
Module de rupture					●			●									
Teneur en humidité					●		●				●						
Perméabilité												●	●				
Résistance à l'arrachement														●			
Qualité des' agrégat													●				
Résistance aux gel et dégel					●				●				●				
Rigidité					●					●			●				
Résistance traction par fendage					●												
Résistance aux sulfates				●									●				
Résistance à la traction					●			●									
Homogénéité	●												●		●		●
Rapport ciment/Eau													●				

Tableau II.6 : Couplage des essais pour l'évaluation des conditions physiques du béton. [3]

	Émissions acoustiques (tableau 1.3)	L'impact acoustique (tableau 1.3)	Essais chimiques	Tests de base (ASTM C42)	Fibre optique (tableau 1.3)	Gammagraphie (tableau 1.3)	La thermographie par infrarouge (tableau 1.3)	Essais de chargement (ACI 437R)	L'analyse pétrographique (ASTM C856)	mesure physique	Radar (tableau 6.3)	scléromètre (ASTM C805)	Impulsions ultrasoniques (ASTM C597)	Ultrasons écho d'impulsion (tableau 1.3)	L'examen visuel (ACI 201.1R, ASTM C823)	Résistance à la pénétration (ASTM C803)
Exsudation									●						●	
dégradation chimique			●						●						●	
La corrosion des aciers			●	●					●					●		
Fissuration	●	●		●	●		●		●	●	●		●	●	●	
Propriétés et épaisseur des sections				●		●				●			●			
Délamination		●		●	●	●	●		●		●		●	●	●	
Décoloration			●						●					●		
Désintégration				●			●	●		●			●		●	
La Distorsion															●	
Efflorescence			●						●						●	
L'érosion									●						●	
Gel-dégel									●						●	
Nid d'abeilles				●	●	●	●		●				●		●	
Eclatements localise															●	
Piquage															●	
Ecaillage				●		●	●								●	
Stratification		●			●									●	●	
Les performances structurelles	●							●							●	
Uniformité du béton					●				●			●	●		●	●

Tableau II.7 : Couplage des essais pour l'évaluation des propriétés de l'acier d'armature. [3]

	Émissions acoustiques (tableau 1.3)	L'analyse chimique (ASTM A571)	Essais des enduits (ASTM A775, G12, 14,20)	mesure d' enrobage	Mesures de potentiel électrique (tableau 1.3)	Gammagraphie (tableau 1.3)	Gammagraphie (tableau 1.3)	Les mesures physiques	Essais de traction (tableau 1.3)	Ultrasonique (table 1.3)	L'inspection visuelle
Adhérence des revêtements d'époxy			●								
ancrage							●				
essai de pliage							●				
résistance à la rupture									●		
La teneur en carbone		●									
la composition chimique		●	●								
Propriétés du revêtement		●									
Enrobage du béton	●			●		●	●	●			
Continuité de revêtement époxy			●								
corrosion					●		●				●
Propriétés et épaisseur de section.							●				
déformations							●				●
allongement									●		
exposition											●
Situation d'armature	●			●		●	●	●			
striction									●		
forme							●				
Résistance des assemblages							●				
résistance à la traction									●		
Epaisseur du revêtement époxy			●								
la résistance des Soudure au cisaillement							●				
élasticité									●		

II.4.8 L'interprétation

L'interprétation est un processus continu à travers les étapes d'investigation qui permettra l'utilisation la plus efficace des ressources sur le site, et conduire à la maximisation de la valeur des informations obtenues.

L'importance de l'interprétation compris entre jugements qualitatifs concernant les caractéristiques observées pendant les relevés visuels, à l'analyse détaillée et l'évaluation statistique des résultats des tests numériques avec évaluation quantitative des propriétés physiques menant à la formulation des conclusions [40].

L'évaluation des résultats des inspections visuelles s'appuiera fortement sur les compétences et le jugement subjectif de l'ingénieur effectuant l'inspection.

II.4.9 L'évaluation

L'évaluation est un processus de détermination de la suffisance d'une structure ou d'un composant pour l'usage prévu par l'analyse logique des 'informations et de données collectées auprès des documents existants, l'inspection sur site, étude de l'état, et des essais de matériaux. Le processus d'évaluation ne peut être généralement normalisé dans une série d'étapes bien définies, car le nombre et le type de mesures varient en fonction de l'objectif spécifique de l'enquête, le type et l'état physique de la structure, l'intégralité de la conception et la disponibilité des documents, et la force et la qualité des matériaux de construction existants.

Évaluations structurelles doivent être effectuées pour déterminer la capacité de charge de tous les éléments structuraux et la structure dans son ensemble. La capacité de la structure à supporter toutes les charges exposent.

II.4.9.1 Dimensions et géométries

Les dimensions réelles de la structure et disposition architectural devraient être effectivement évalué, à cet effet des opérations de sondages peuvent être appliqués pour réaliser les mesures (ex : épaisseurs de certaines parties comme les hourdis en béton) ,ainsi que les écarts entre les dimensions mesurés sur le terrain et ceux indiqués sur les dessins disponibles doivent être évaluées.

II.4.9.2 Evaluation des matériaux :

Les résultats des inspections visuelles sur le terrain, les essais de laboratoire doivent être étudiés pour comprendre d'une façon exacte l'état des matériaux dans la structure en termes de résistance, qualité , durabilité, et l'usage prévu. Afin que les composants de la structure qui

nécessitent des réparations puissent être identifiées et les éléments structurels qui nécessitent le remplacement total doivent aussi être identifiés. Dans cette étape évaluation des recommandations concernant les matériaux de réparation peuvent être fournis.

II.4.9.3 **Evaluation structurale** [3]

En utilisant les informations obtenues de l'enquête de terrain, pour l'évaluation de dimension et de géométrie, matériel, l'évaluation de capacité de charge d'une partie ou de la structure entière doit être déterminée.

Le choix de la méthode d'évaluation dépend de facteurs tels que la nature de la structure et la quantité d'informations connues au sujet de son état actuel. Les choix typiques sont:

1) ***L'évaluation par l'analyse*** : la méthode la plus courante, est recommandée lorsque l'information suffisante est disponible sur les caractéristiques physiques, les propriétés du matériau, l'aspect structurelle, et les charges auxquelles la structure a été ou elle sera soumis.

2) ***L'évaluation par l'analyse et test de charge à pleine échelle,***

3) ***L'évaluation par l'analyse et la modélisation structurelles*** (ACI 437R).

Ces deux sont recommandées dans le cas des conception complexe et le cas de manque d'expérience concernant le système structural ;dans cet cas l'évaluation est faite uniquement par des méthodes analytiques fiables, ou lorsque la nature de désordre actuelle introduit une incertitudes importante sur la richesse des paramètres nécessaires pour effectuer une évaluation analytique, ou lorsque la géométrie et les caractéristiques du matériau des éléments de structure en cours d'évaluation ne peut pas être facilement déterminée.

Les composants structurels, parties de jonction (les nœuds) doivent être identifiés par l'évaluation basée sur l'examen des documents, la dimension et de vérifier la géométrie, l'évaluation du matériel. Les capacités des composantes structurelles doivent être déterminées de préférence par la méthode de génération de force, méthodes sophistiquées telles que des éléments finis

Toutes les charges existantes (permanentes), surcharges, charges de l'équipement et les charges exiger par les règlements appliqués telle que le vent et charge dynamique de séisme doit être envisagée et utilise dans analyses. Le cas échéant, les éléments non structuraux doivent également être évalués pour s'assurer qu'ils sont capables de résister aux charges prescrites et des déformations. L'effet d'éléments non structuraux sur la performance globale de la structure devrait également être envisagé.

II.4.9.4 Evaluation de la cause

C'est de loin l'étape la plus difficile et la plus importante de tout. Il n'est pas possible d'évaluer l'importance des réparations à faire ni de choisir les meilleures méthodes de réparation si la causes des dommages n'est pas connue. Ce qui ne signifie pas que la cause spécifique doit être décelée. En fait, surtout pour le béton, il est fréquent que l'on ne puisse pas l'identifier soit parce que les données pour trouver l'origine du mal sont insuffisantes, soit parce que plusieurs agent destructeurs agissent en même temps. On peut toutefois éliminer des possibilités jusqu'à ce qu'il n'en reste que quelques-unes et choisir alors une méthode de réparation qui améliore l'état présent et empêchera l'extension des dommages dus à tous les agents destructeurs dont on soupçonne l'action [47].

Comme il n'était pas possible de déterminer lequel des quatre agents était responsable des dégâts on choisit une méthode de réparation qui empêchât toute détérioration ultérieure par l'un quelconque d'entre eux. Les résultats obtenus donnèrent entière satisfaction. Toutefois le fait de n'avoir pas pu isoler la cause eut pour conséquence que le cout de la réparation fut sensiblement plus élevé que ce qu'il aurait pu être si la cause avait été déterminée avec précision. C'est ce que se produit en général, et pour des raisons d'économie il est bon de s'efforcer autant que possible d'identifier la ou les causes probables des dégâts avec précision. A cette égard il convient de remarquer si l'on ne réussit pas à déceler la cause des dommages on peut être amené à choisir une méthode de réparation qui soit nuisible plutôt que salutaire. Il n'existe pas de règles ni de méthodes toutes faites pour déterminer la ou les causes de dégradation. Chaque cas pose un problème particulier et doit faire l'objet d'un diagnostic particulier. Toutefois l'expérience permet de dégager un certain nombre de schèmes de principe [47].

Par exemple les fissures dans les murs dues aux tassements des fondations se forment en général en diagonale. La pâte de ciment d'un béton soumis à l'attaque de sulfates a un aspect blanchâtre et terne caractéristiques. Les fissures dues à la corrosion des armatures forment des linges droits parallèles équidistants et laissent apparaitre des traces de rouille.

On apprend aussi très vite ou il faut chercher la corrosion dans les ouvrages métalliques et ou les poutres en bois sont susceptibles de pourrir. En général, pourtant, le diagnostic est difficile à faire et il faut se contenter de savoir parfaitement ce qui peut se détériorer, éliminer les causes possible de difficultés jusqu'à ce que la bonne solution apparaisse. Il conviendra d'étudier.

II.4.9.5 Evaluation des couts

Une évaluation des coûts devrait être réalisée pour toutes les possibilités de réparation ou réhabilitation. Le coût de réhabilitation est soumis à de nombreux facteurs, mais le coût pour certains types de réparations structurelles ou des travaux de renforcement peuvent souvent être raisonnablement estimé sur la base d'expérience antérieure. Une telle estimation peut constituer la base d'une décision initiale concernant la solution appropriée pour être sélectionné et la faisabilité économique d'ensemble du projet. Une plus détaillée des coûts de réhabilitation doivent être documentées, en tenant compte de la localisation du projet et le travail existantes et disponibles et des entrepreneurs qualifiés. Ces coûts doivent être calculés pour l'heure approximative de l'échéancier de construction réels. Il faut reconnaître que les conditions imprévues nécessitant un coût supplémentaire sont courantes dans de nombreux projets de réhabilitation et éventualités adéquate doit être fournie. Dans le cas où les coûts estimés dépassent le budget disponible, un autre cycle de réductions possibles doit être étudié. Le programme de réhabilitation définitive peut alors être modifié et approuvé par le propriétaire, qui doivent être informés que les coûts réels peuvent être déterminés qu'après une préparation de documents contractuels détaillés (plans et devis) et après l'obtention d'offres fermes d'entrepreneurs. Si le coût de la mise à niveau est déterminé à être excessif, d'autres utilisations possibles de la structure devrait être étudié, ou une recommandation faite à la poursuite de son utilisation actuelle ou pour l'élimination de son utilisation.

II.5 CONCLUSION

L'évaluation de l'état des ouvrages aux points de vue matériaux, état structurelles et fonctionnalité ainsi que la détermination précise des causes engendrant les désordres dans les ouvrages d'art sont des operation très compliquées puisque les désordres sont dans la plupart des cas difficiles à analyser et à évaluer car leurs origines peuvent être diverses et nous conduisent parfois à remonter jusqu'à la conception de l'ouvrage, mais ont une tres grande importance, constitue la base nécessaire pour le choix d'une procedure de remédier « stratégie de réparation adéquate » .

Les divers matériaux et méthodes à assurer la réparation des ouvrages dégradés font l'objet du prochain chapitre, Mais il est nécessaire que ces matériaux soient effectivement employés pour que la durabilité soit assurée.

CHAPITRE III

Matériaux Et Méthodes De Réparations

III.1 INTRODUCTION

La dégradation des ponts c'est un état qui influe directement sa fonctionnalité, ses caractéristiques géométriques, sont aspect d'art, une influence qui nécessitera une intervention rapide sur l'ouvrage afin d'améliorer et maintenir ses aspects.

Les méthode et techniques de réparations sont très élaborées et de plus en plus variées, leur utilisation demande un savoir-faire et une maîtrise sans failles des moyens de plus en plus sophistiqués. Le choix d'une technique de réparation est fonction de sa faisabilité, des délais nécessaires, des couts directs (démolition, réparation et travaux provisoires) et des couts indirects (déviations de la circulation, incidence, ...etc.).

III.2 Pour Quoi La Réparation

Au départ, l'état général des ouvrages d'art se révèle bon « *un pont récemment construit est en bon état* » mais décroît régulièrement par insuffisance d'entretien, en générale l'ouvrage laissé à l'abandon finit par être en mauvais état, Par le déficit d'entretien de patrimoine, le processus de dégradation des ouvrages s'est accéléré plus que le service et la sécurité de certains d'entre eux est devenue douteux. Leur coût de rénovation va augmenter avec le retardement d'intervention, ce qui aura pour conséquence de générations aux futures des dépenses qu'elles ne pourront pas être supportables. Les ouvrages d'art, pour la plupart déjà anciens et conçus selon des normes ancien aujourd'hui sont dépassées, ne souffrent pas seulement d'un important déficit d'entretien, mais également d'une usure conséquente liée à un trafic de plus en plus lourd, de plus en plus dense et à une forte progression des agressions chimiques. A terme, sans intervention conséquente, des limitations de charges pourraient être introduites et des fermetures d'axes routiers pourraient purement et simplement être rendues nécessaires par le manque de sécurité par rapport aux normes en vigueur. Contrairement à d'autres, cette demande de crédit ne concerne pas des opérations d'entretien constructif, chargé de remédier à un manque d'entretien courant, mais doit permettre des opérations d'assainissement et de renforcement d'ouvrages, situations qui se présentent nécessairement à un moment ou à un autre dans la vie de telles infrastructures.

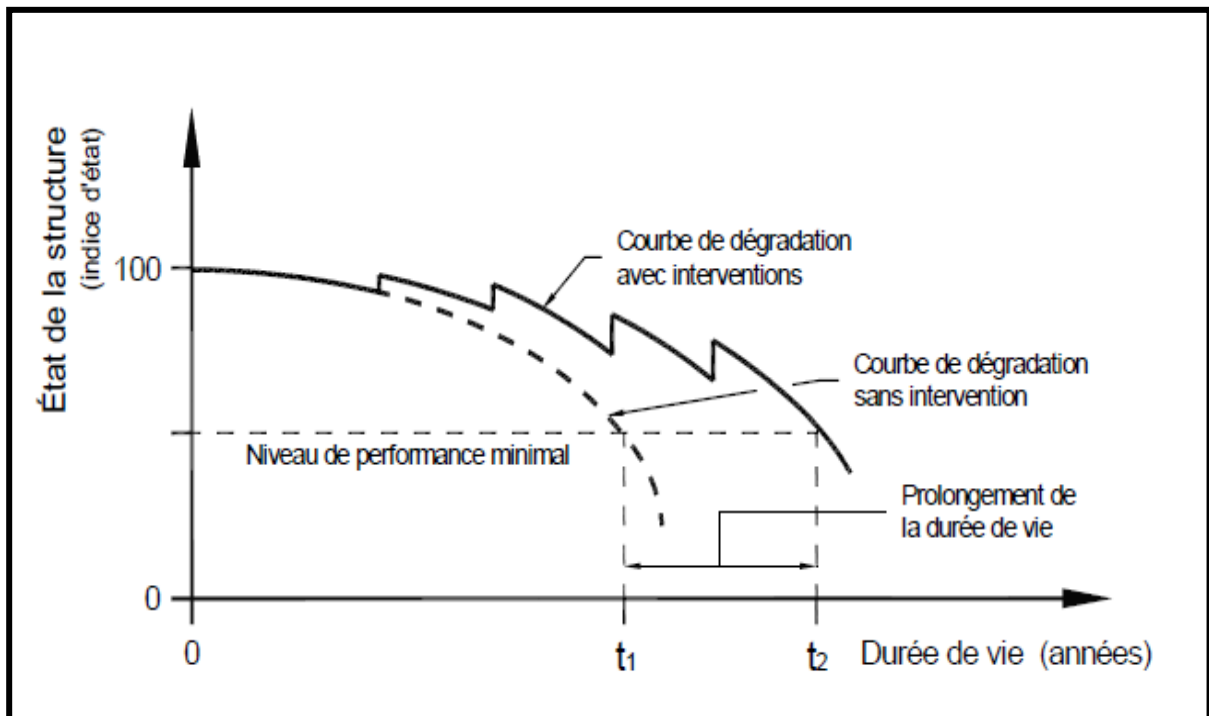


Figure III.1: Courbes de dégradation d'une structure [33].

Donc en générales on applique des réparations pour les raison suivantes

1. restaurer et augmenter la force;
2. restaurer et augmenter la rigidité;
3. améliorer les performances fonctionnelles;
4. fournissent l'étanchéité;
5. améliorer l'apparence de la surface du béton;
6. améliorer la durabilité;
7. empêcher le développement d'un environnement corrosif à l'armature.

III.3 Déférénts Types D'entretien

On distingue trois types d'entretien :

- **Entretien courant :**

Travaux ne demandant pas une qualification quelconque du personnel, ni un équipement spécifique. Il pourra être réalisé par le personnel de la subdivision au moyen de leur outillage habituel. Ces travaux consistent habituellement en des opérations de :

- nettoyage des sommiers d'appuis, nettoyage des appareils d'appuis (lubrification aussi des appareils d'appuis métalliques) de chaussée, des joints de chaussée, avaloirs, gargouilles, déboisement et enlèvement de végétation, ...etc.
 - protection des remblais contre l'érosion (gabionnage, pierre), protection des fondations contre l'affouillement par gabionnage, peinture localisée sur éléments de tablier métallique, ...etc.
 - remplacement d'éléments détériorées des couvertures de trottoirs, platelage métallique de passerelle, de glissières de sécurité, lampadaires, ...etc.
 - réparation de désordres superficiels, d'origine non structurelle tel que rejointoiement, éclats de béton, réparation localisée de système d'évacuation d'eau, ...etc.
- **Entretien spécialisé :** c'est l'ensemble des opérations d'entretien nécessitant :
 - des moyens d'accès particuliers : échafaudages, nacelles, ...
 - des engins et moyens de levage : pelles, vérins hydrauliques, ...
 - l'emploi d'une main d'œuvre spécialisée.
 - L'emploi de produits de réparation spécifiques : mortiers préparés, résines, produits divers de réparation, peinture de protection, ...etc.
 - L'emploi de moyens de mise en œuvre appropriés : machine pour injection de coulis et mortiers, machine pour béton projeté, finisher, compacteurs, ...etc.

Ce genre d'opérations d'entretien, qui mettent en œuvre des moyens particuliers et parfois spécifiques, est réalisé généralement par des entreprises spécialisées.

III.4 Choix Des Méthodes Et Matériaux De Réparations

C'est l'étape la plus difficile et qui exige une connaissance approfondie ainsi un très bon jugement de l'ingénieur entre les variétés de méthodes d'intervention, des matériaux et des pratiques reconnues. Donc on peut définir cette étape comme une décision multicritères, dans laquelle on vise le choix et la combinaison entre les méthodes et les matériaux jugée techniquement faisable pour atteindre efficacement le but poursuivi par les opérations de réparations avec le moindre coût.

III.4.1 Critères de choix des méthodes de réparation

Ce sont l'ensemble des facteurs influant notre choix et favorisant une méthode et un matériau par rapport à les autres, on peut distinguer :

- a) Le cout de réparations ainsi tous les frais complémentaires d'entretien de réparations ;
- b) Type des dégradations : si les dégâts sont relativement peu nombreux et isolés, des réparations partielles sont à préconiser. Si les dégâts sont étendus, il faut envisager de reprendre l'ouvrage dans son ensemble ;
- c) La sécurité structurale, avant, pendant et après la réparation ;
- d) La disponibilité des matériaux de réparation et les capacités des entrepreneurs dans l'utilisation des matériaux spéciale ou les procédures exceptionnelles avec succès ;
- e) Les conditions d'exploitation de l'ouvrage donc il faut s'assurer que les réparations, pendant leur exécution ne gêneront pas sérieusement l'utilisation de l'ouvrage ;
- f) L'importance de l'ouvrage, durée de vie souhaitée pour les réparations, les conditions d'exploitation de l'ouvrage ;
- g) Les contraintes de chantier tell que les difficultés d'accès, l'absence des surfaces nécessaires pour l'application des méthodes de réparation, les conditions climatique défavorable ;
- h) Les changements apportés par les réparations sur l'aspect esthétique, ou sur le comportement des éléments (l'accroissement de section d'un élément ce qui implique une augmentation de la rigidité, modifie la distribution des efforts et des moments....)
- i) La combinaison la plus économique des méthodes et des matériaux jugée techniquement faisable.

III.4.2 Les matériaux de réparation

III.4.2.1 Bétons Conventionnels [46]

Les réparations profondes en béton conventionnel sont généralement utilisées lorsque la surface à réparer est plus grande que 1000 cm² et la profondeur dépasse 150 mm ou lorsque la profondeur de la réparation dépasse de 25 mm le niveau inférieur des aciers d'armature.

Il s'agit d'un matériau de réparation très économique.

- Il est préférable d'amener la surface du vieux béton à l'état avant d'appliquer le nouveau béton (pré-saturation de plusieurs heures);
- Un bon mûrissement est essentiel pour assurer une bonne durabilité et pour minimiser la fissuration due au retrait de séchage.

- Le périmètre de la zone à réparer doit être scié sur une profondeur d'au moins 25 mm
- Les bétons conventionnels peuvent être utilisés avec plusieurs types de techniques de mise en place: utilisation de coffrages conventionnels, projection par voie humide, projection par voie sèche, et pompage.
- Il est important d'utiliser un béton de réparation durable dont les propriétés physico-chimiques (module élastique, coefficient de dilatation thermique) sont similaires à celles du béton existant.

III.4.2.2 Les latex [14]

Le terme latex, qui désignait à l'origine le liquide sécrété par certains végétaux, se rapporte maintenant à une vaste famille d'émulsions de polymères synthétiques mise en solution dans l'eau. Les latex (composés de monomères et non de polymères) se distinguent en cela des autres résines, que l'on incorpore au béton à l'état frais et dont on provoque la polymérisation à l'intérieur de la matrice. Cette différence fondamentale explique la grande simplicité de mise en œuvre du mortier ou du béton de latex : il suffit d'ajouter le latex au mélange frais.

a) Les mortiers latex [14]

Les mortiers de latex contiennent généralement entre 10 et 20% de latex par rapport à la masse de ciment. Les latex confèrent au mortier une adhérence importante sur des supports même lisses, une amélioration de la plasticité permettant une réduction de la quantité d'eau de gâchage, une amélioration de l'imperméabilité, une diminution du module d'élasticité et une augmentation de la résistance à la traction. Les mortiers au latex se révèlent donc d'excellents matériaux pour réparer les structures.

b) Résine époxy

Ce sont des composées organique qui à l'aide de durcissements appropriés, constituent des produits mécaniquement et chimiquement résistants, et dotés d'excellentes propriétés d'adhérence. On peut les utiliser pour faire adhérer du béton à des surfaces, ou pour ressouder des portions d'une section de béton en service fissurées ou détachées. Une fois durci, le composé ne se ramollit pas, ne coule pas et ne suint pas – du moins dans les conditions d'emploi ordinaires

• Application [47]

a) Collage des fissures ou de portions de béton détachées

Théoriquement si une zone de béton s'est détachée de la masse de l'ouvrage, il est possible de la recoller en enduisant les deux surfaces en contactes du composé adhésif ; et en les assemblant ensuite. Dans la pratique, cette méthode est généralement trop onéreuse, et on remplace

d'habitude la partie épaufrée par du béton neuf en utilisant un composé de collage à base de résine.

b) Réparation des surfaces épaufrées [47]

On peut utiliser la résine pour faire adhérer une réparation de béton de ciment Portland, ou même utiliser cette résine comme liant du béton servant à la réparation.

Quand on a besoin d'un faible volume de matériau ; quand il s'agit de réparer des sections de faible épaisseur, ou quand l'ouvrage doit être remis en service avant que le béton ait eu le temps de durcir, on ne peut pas faire appel au béton de ciment classique et il faut utiliser le composé organique comme liant. Dans les autres cas, il est moins onéreux de faire appel au béton classique et de le coller à l'ouvrage existant avec un enduit de résine adhésive.

III.4.2.3 Les Matériaux Composites

III.4.2.3.1 Définition

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les *renforts* qui sont noyés dans une *matrice* dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible, assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

D'une manière générale un matériau composite se constitue par :

III.4.2.3.2 Les Charge [15]

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

D'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

III.4.2.3.3 Les Matériaux De Renfort[15]

C'est le renfort qui constitue l'armature ou le squelette et qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est par définition, de nature filamenteuse (fibre minérale ou organique) allant de la particule allongée à la fibre continue, La fibre de renfort apporte donc toujours la tenue mécanique de la structure composite (tandis que la matrice apporte la forme et la tenue chimique) et peut représenter un taux massique de 20 à 80%.

Tableau III.1 : Caractéristiques des fibres de renfort.[15]

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

III.4.2.3.4 La Matrice :

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

III.4.3 Les Méthodes de Réparation

III.4.3.1 Remplacement Du Béton Altéré [28]

Lorsque la détérioration du béton est importante, le remplacement du béton altéré par du nouveau béton est nécessaire. Lors de l'enlèvement des matériaux détériorés, il faut s'assurer de ne rien laisser qui pourrait empêcher l'accrochage du nouveau matériau à l'ancien. Afin de délimiter les zones à enlever, on pratique des traits de scie de 25 à 50 mm de profondeur tout autour de celle-ci et on procède ensuite à sa démolition. Parmi les nombreuses techniques d'enlèvement des matériaux, on retrouve: le brossage, le repiquage, le sablage, l'hydro-démolitions le décapage et le lavage.

Après l'enlèvement des matériaux, il faut nettoyer soigneusement le substrat. Le nettoyage se fait à l'aide d'un jet de sable suivi d'un jet à l'eau et à l'air propulsé. Pour finir, le surplus d'eau restant à la surface du béton est éliminé en utilisant un jet à l'air.

Les armatures qui se retrouvent à découvert sont inspectées, nettoyées et remplacées si nécessaire. Le nettoyage des armatures consiste à enlever la rouille et à les recouvrir de couches de peinture époxydique pour les protéger.

Afin d'assurer une bonne adhérence avec le nouveau et l'ancien matériau, un agent de liaisonnement doit être appliqué après avoir complété la préparation et le nettoyage de la surface à réparer et juste avant la mise en place du nouveau matériau. Les mortiers à base de ciment portland et les coulis sont souvent utilisés. Les produits à base de latex ou des résines époxydes sont utilisés lorsque la situation demande un temps de cure rapide.

III.4.3.2 Adjonction d'armatures complémentaires [51]

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Dans tous les cas, les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation. Un étalement et un déchargement de l'ouvrage à réparer peuvent éventuellement être nécessaires. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. Il faut donc porter une attention particulière à la disposition et à l'ancrage de ces armatures.

Les armatures complémentaires peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément (par exemple, en les disposant dans des engravures dimensionnées en fonction du diamètre de l'acier et des caractéristiques du produit d'enrobage ; Figure III.2) ou en surépaisseur (le treillis soudé constitue alors souvent une bonne solution Figure III.3).

La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé, ou projeté. Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire.

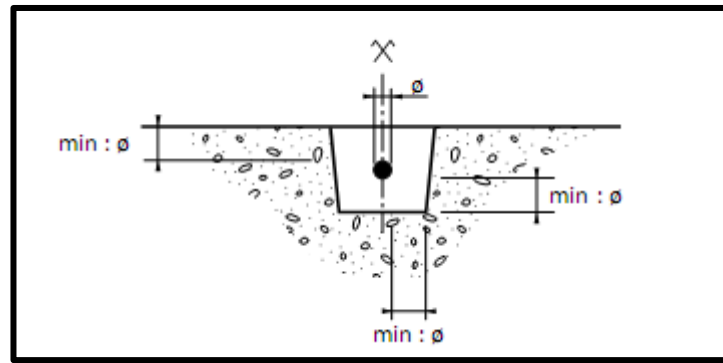


Figure III.2: Armatures supplémentaires en engravure

(Celle-ci pouvant être en sous-face).[51]

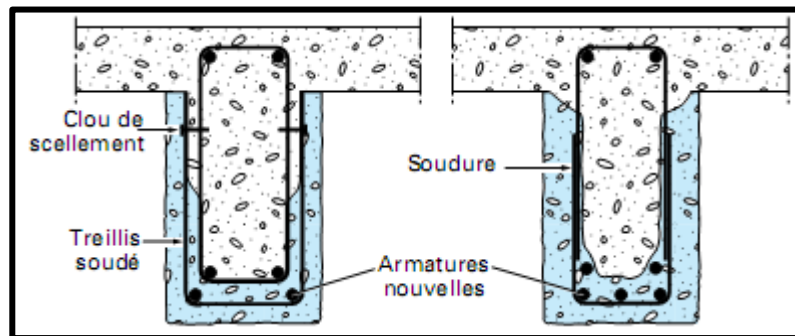


Figure III.3: Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre. [51]

III.4.3.3 Renforcements et réparation par Matériaux de composite :

Toute mise en œuvre de matériaux composites sur une structure endommagée nécessite d'abord un ragréage de la surface à réparer. Celle-ci doit être plane et propre. Dans la plupart des cas, une injection de fissure et un traitement de surface par sablage sont réalisés.

III.4.3.3.1 Mise en œuvre par enroulement filamentaire

La fibre est produite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin. La longueur de fibres continues peut varier de 600 m à 5 km (soit 0,8 g au mètre linéaire). Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes (**Figure III.4-a**). Le principal avantage de ce procédé est l'automatisation complète du système de pose (figure b). Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel. Cette méthode a surtout été développée au Japon, et elle est aujourd'hui utilisée à travers le monde.

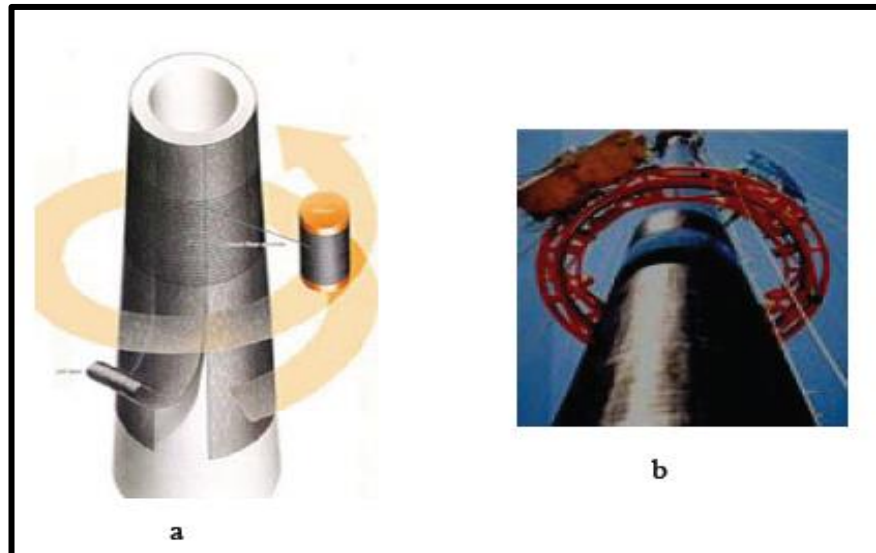


Figure III.4: Les principes de l'enroulement [47]
 a) principe de l'enroulement filamentaire, b) enroulement automatisé

III.4.3.3.2 Mise en œuvre par stratification directe de tissus sec [47]

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après reprofilages, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine, en utilisant des polymères qui polymérisent à température ambiante, il est possible de réaliser une stratification directe, en respectant les étapes suivantes (Figure III.5) :

- préparation de la surface, application de la couche primaire,
- application d'une première couche de polymère époxyde,
- application d'une première couche de tissus secs,
- application d'une seconde couche de polymère époxyde, protection, finition.



Figure III.5: Mise En Œuvre Par Stratification Directe.

Ce procédé présente l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée, mais le renforcement acquiert toute sa résistance au bout d'une semaine et le contrôle de la qualité de l'application doit être soigné suivant les conditions de mise en œuvre. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis. Les principaux paramètres qui doivent être suivis sont les températures et l'humidité du support. L'ensemble de ces paramètres contribue à la modification des propriétés mécaniques du composite en place.

III.4.3.3 Le collage de plaques composites [47]

Les plaques composites sont des produits finis présentés sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est 100 x 1 mm, leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limitée. Le procédé de collage est le suivant (**Figure III.6**) :

- nettoyage à l'acétone de la face de collage de la plaque,
- traitement de surface à réparer par sablage,
- traitement par eau sous pression et meulage,
- nettoyage de la surface par un dépoussiérage,
- le polymère époxy est appliqué sur la plaque de composite,
- la plaque est ensuite pressée sur la surface, l'excédent de colle est enlevé,
- une pression à l'aide d'un sac à vide est appliquée jusqu'à complète polymérisation du polymère.



FIGURE1. PROCEDE PAR COLLAGE DE PLAQUES (SIKA, 1996)

Figure III.6: Procède Par Collage De Plaques (SIKA, 1996).

III.4.3.4 Le Renforcement Au Moyen Des Profiles Métalliques [18]

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes. L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées. L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage.

Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles.



Figure III.7: Renforcement De Poteaux Au Moyen De Profiles Métallique. [18]

III.4.3.5 Béton Projeté

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires [50]

a) *Procédé par voie humide*

Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance.

Le procédé par voie humide est surtout utilisé lorsque les volumes à produire sont importants. Le contrôle de la qualité est plus simple avec ce procédé, puisqu'en utilisant un béton conventionnel, le dosage des constituants du mélange est connu.

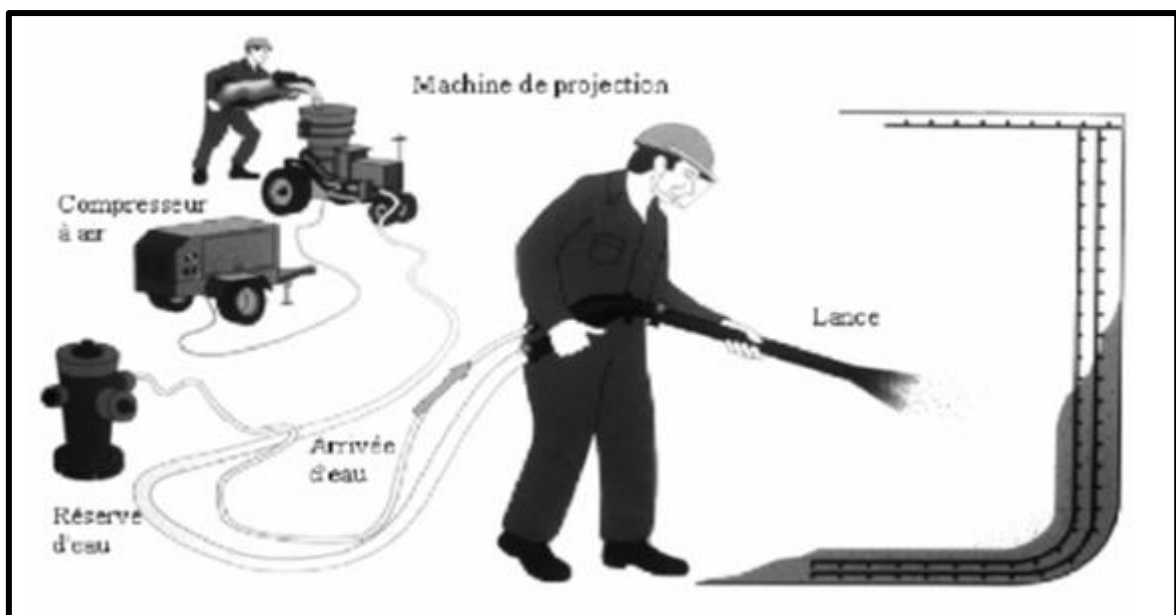


Figure III.8: Projection Par Voie Humide.

b) Procédé par voie sèche :

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est-à-dire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance. L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance par l'entremise d'une bague perforée, cette bague permet le mélange de l'eau avec les matériaux.

Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface. La **Figure III.9** présente l'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie sèche. Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux. En effet, comme le contact du ciment et de l'eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible dans l'appareillage si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées peuvent être facilement obtenues avec ce procédé puisqu'il permet d'atteindre de faibles rapports eau/liant.

Le désavantage du procédé sec est que le dosage de l'eau dans le mélange se fait directement à la lance, par le lancier, ce qui complique le contrôle de la qualité.

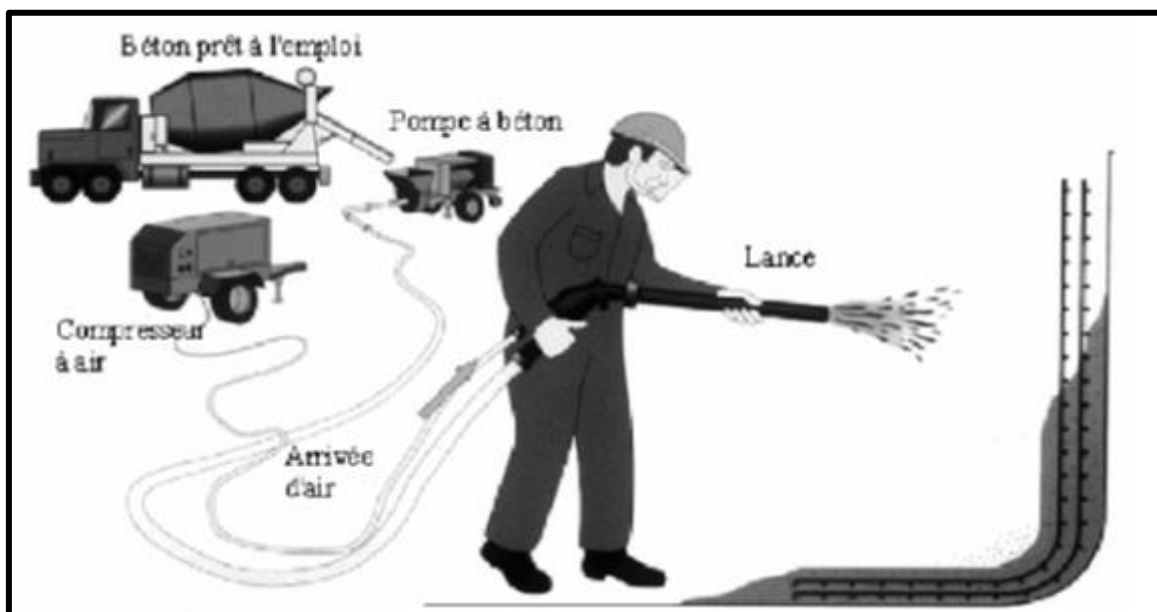


Figure III.9: Projection Par Voie Sèche.

III.4.3.6 La Précontrainte Additionnelle

La précontrainte additionnelle est souvent la solution souhaitable quand une partie importante d'un membre doit être renforcé ou lorsque les fissures qui se sont formées doivent être fermées. Cette technique utilise des torons de précontrainte ou des barres utilisées pour l'application des contraintes de compression, l'ancrage adéquat fournis par des éléments mis à l'extérieur de l'élément. Cette procédure se diffère suivant le tracé de précontrainte utiliser qui peut être rectiligne ou polygonal

- **Tracé rectiligne** [1]

Uncâblage rectiligne est plus pratiques et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimations

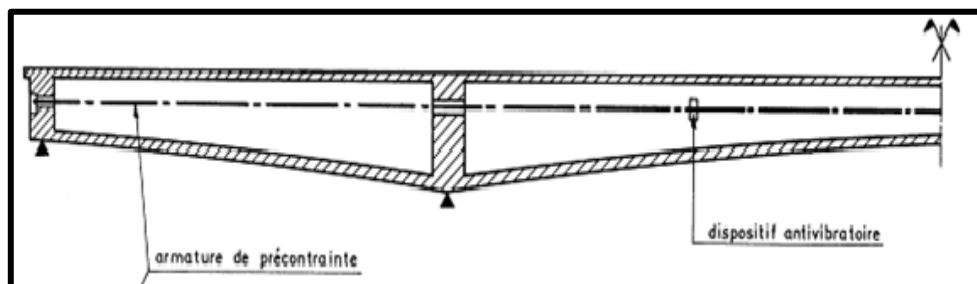


Figure III.10: Traces Rectiligne.

- **Tracé polygonal** [8]

Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet du précontraint tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant. Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante car la plus efficace.

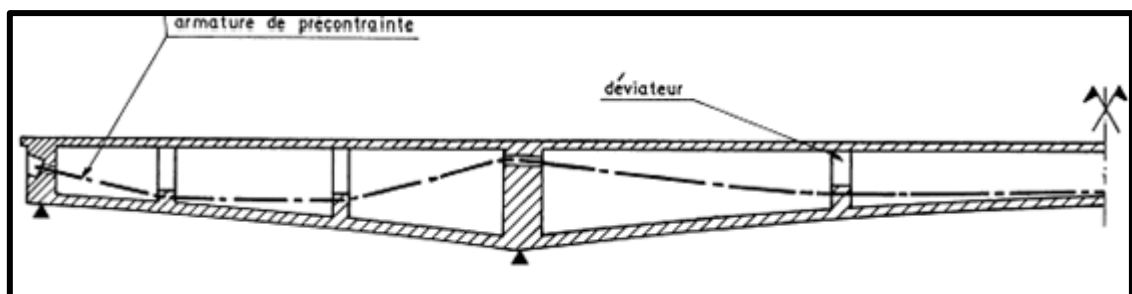


Figure III.11: Traces Polygonal.

III.5 Les Traitements Des Ouvrages

III.5.1 Ré-alkalinisation Du Béton Carbonate [19]

Le principe de protection électrochimique de réalcalinisation est montré dans la Figure III.12. La technique de réaction est basée sur le même principe que la technique d'extraction des ions chlore : elle consiste aussi à appliquer un courant électrique continu entre une anode temporaire placée sur la surface du béton et l'acier. La méthode de réalcalinisation est appliquée lorsque le problème de corrosion est provoqué par la carbonatation du béton d'enrobage. L'objectif de cette technique est de redonner au béton carbonaté la valeur de pH qui permet la repassivation des aciers.

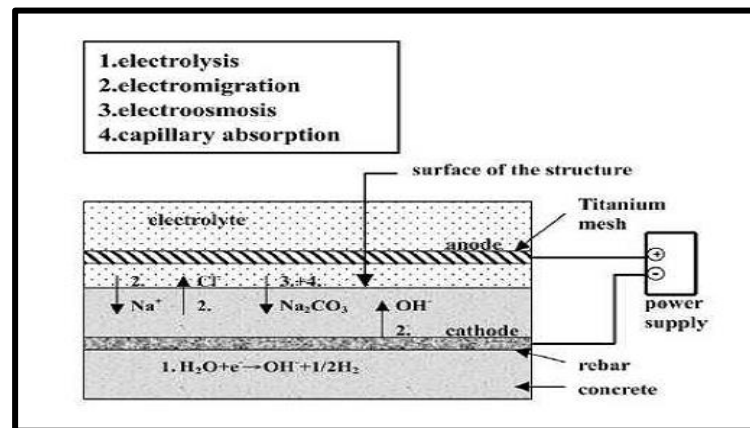


Figure III.12: Illustration Du Processus Electrochimique De Relatinisation.[58]

Pour effectuer cette technique, une solution basique ou alcaline est appliquée sur le parement de façon à pénétrer à l'intérieur du béton. La formation des OH^- à la surface de l'acier augmente aussi le pH dans cette zone.

Un électrolyte à base de carbonate de sodium est largement utilisé lors d'une application de cette technique. La pénétration de cet électrolyte à l'intérieur du béton peut être faite par diffusion, absorption capillaire et électro-osmose.

III.5.2 Extraction Electrochimique Des Ions Chlores

La première application d'extraction électrochimique des ions chlore a eu lieu en 1973.

Le « *Kansas Département Of Transportation (KDOT)* » a extrait les ions chlore en utilisant une anode de cuivre. Ensuite cette technique a été appliquée pour traiter un pont contaminé par les chlorures en utilisant une densité du courant très élevée de 23 à 28 A/m² pendant 24 heures.

- **Principe de méthode**[48]

La technique d'extraction électrochimique des ions chlore, ou déchloration, consiste à faire passer un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier (Cathode). Ce courant provoque le déplacement des ions chlore chargés négativement vers l'anode extérieure (**Figure III.13**). Lorsque les ions chlore arrivent à la surface du béton, ils passent dans l'électrolyte et peuvent donc être enlevées définitivement du béton. Le niveau actuel de courant appliqué lors d'un traitement d'extraction est de 1 à 5 A/m². Cette technique, contrairement à la protection cathodique, est temporaire avec une période d'application de 4 à 5 semaines.

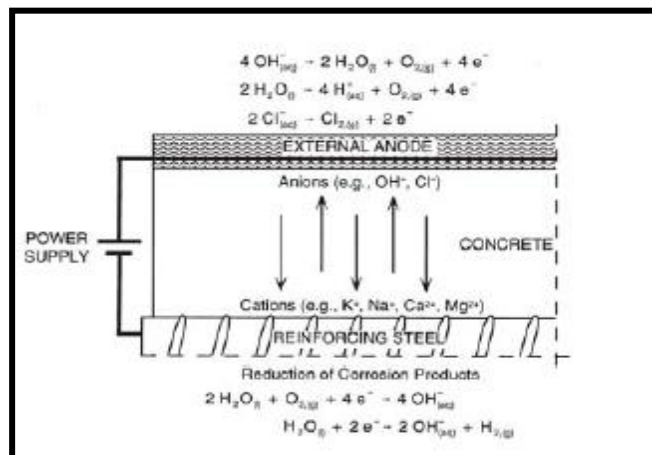


Figure III.13: Schéma D'application D'un Traitement d'ECE.[48]

Les points positifs de l'application de cette technique sont :

- abaissement de potentielle thermodynamique de l'acier ;
- augmentation de la teneur en ions hydroxyle et en conséquence augmentation du pH autour de l'armature ;
- - diminution de la teneur en ions chlore près de l'acier.

III.5.3 La Protection Cathodique

- **Principe**[8]

Cette méthode de protection consiste à abaisser en tout point de l'armature, le potentiel (potentiel de structure) de ce métal jusqu'à une valeur dite potentiel de protection, qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature. Ce potentiel ne doit pas être trop négatif, sinon l'eau interstitielle du béton pourrait se décomposer par électrolyse. De l'hydrogène pourrait alors se former et fragilise les aciers à haut résistance, tels que les armatures de précontrainte.

La polarisation est presque systématiquement obtenue grâce à une alimentation à base tension, en courant continue ou plus souvent redressé, dont le pôle négatif est relié à l'armature et le pôle positif à une anode placée à la surface du béton d'enrobage

- **Procédés de protection cathodique** [58]

Divers procédés sont utilisés pour appliquer une protection cathodique des aciers dans les bétons aériens. Seuls les deux types les plus courants sont détaillés ici.

Le premier type de procédé utilise comme anodes des revêtements conducteurs (peinture conductrice, métallisation du béton à l'aide de zinc) mis sur le parement de béton.

Le second type concerne des anodes qui sont placées à la surface du béton puis enrobées de béton souvent projeté il s'agit le plus souvent de treillis de titan traité (dit 'activé'), qui est maintenu sur le béton par des fixations isolantes, espacées de 0.60m environ.

III.6 Exemples Internationales Sur Les Actions De Réhabilitation Des Ponts :TableauIII.9 [4]

Cas N°	Membre	Domage	Problème - Causes	Mesures de réhabilitation
<i>Danemark</i>	Poutre	-Eclatement de la partie inférieure de la poutre latérale préfabriquée. -Corrosion des boulons des ancrages soutenant la poutre latérale. -Délamination	-Attaque par sels/Chlorures -Gel/Dégel -Mauvais drainage	Remplacement de l'ancienne poutre latérale préfabriquée par une poutre latérale coulée en place
<i>Norvège</i>	Pile	-Fissures dans le béton -Corrosion des armatures dans la -zone d'éclaboussures	Attaque par sels/Chlorures	Déchargement de la pile, élimination de la couche d'enrobage en béton par hydro démolition, mise en place de nouvelles armatures et remplacement de la couche d'enrobage en béton
<i>Royaume Uni</i>	Appuis et fondation	Fissures et corrosion des armatures dans le béton Délamination	Attaque par sels/Chlorures Mauvaise exécution	Réparation de surface avec du béton de polymère et couche de protection avec peinture résistante aux chlorures
<i>Japon</i>	Tablier	Fissures dans le béton	Alcali-réaction	Injection d'époxy, étanchéité
	Piles	Fissures dans le béton, corrosion des armatures		Renforcement par tôles collée
<i>Japon</i>	Dalle du tablier	Fissures dans le béton / corrosion des armatures	Attaque par sels/chlorures, Mauvais drainage, Mauvaise exécution (défaut d'enrobage)	Remplacement du béton détérioré par hydro-démolition et nouveau mortier polymère coulé en place
<i>Italie</i>	Poutre	Dégradation importante du béton avec corrosion considérable des aciers	Attaque par sels/chlorure, Gel/Dégel, Attaque sulfatique, Carbonatation	Réparation de surface, injection d'époxy, étanchéité, et armatures additionnelles
	Appuis et fondation			Etanchéité, chemisage et renforcement par FRP
	Appareil d'appui	Fonction insuffisante		Remplacement de l'appareil d'appui
<i>Mexique</i>	Dalle du Tablier	Fissures dans le béton	Attaque par sels/chlorures Carbonatation sur chargement Mauvaise exécution	Injection d'Epoxy
	Appuis et fondation	Fissures dans le béton, Corrosion des armatures		Injection d'Epoxy

III.7 CONCLUSION

La réparation des ouvrages est devenue aujourd'hui une nécessité économique et un impératif technique dans la gestion des patrimoines. Elle implique des entreprises spécialisées qui cumulent une grande expérience, une maîtrise des moyens matériels et jouissants de compétences humaines de qualité.

Elle permet à moindre cout de réhabiliter des ouvrages et assurer ainsi leur état de service initial son ce qui nous permettre d'économiser par ne pas recourir à la construction nouvelle.