

I.1 Introduction

Le comportement chimique des bétons vis-à-vis des milieux extérieurs dépend de plusieurs facteurs, qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler (composition des différents constituants (ciment, granulats, technique de mise en œuvre, âge de béton, conditions climatique, nature des agents agressifs), qu'il soit minéral ou biologique.

Cette approche est celle de la physiologie que celle de la pathologie, c'est-à-dire d'analyser et comprendre les mécanismes de dégradation, mais aussi les mécanismes de défense du ciment hydraté face à l'agression chimique [7].

I.2 Notion sur la durabilité

La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons [1].

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité [5]. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

La perméabilité est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte la figure I.1. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.

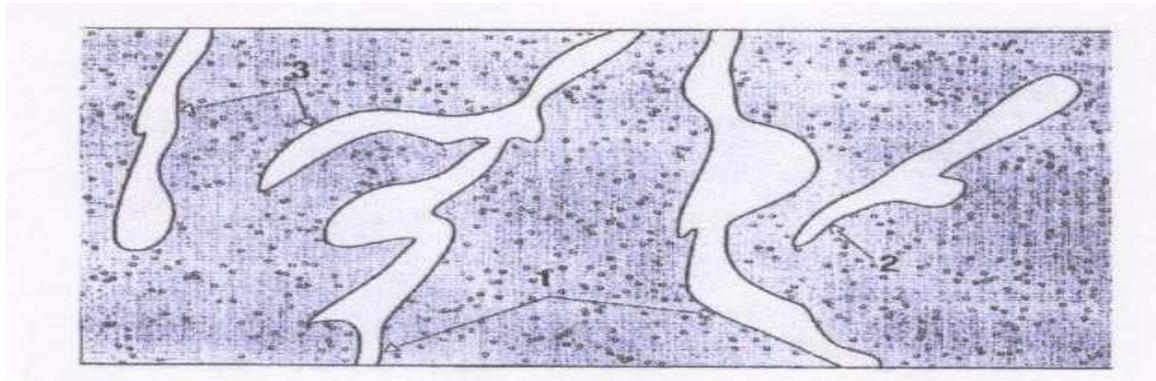


Figure I.1 : Représentation schématique d'un solide poreux

Les plastifiants et les additions minérales fournissent une grande variété de moyens pour faire des bétons ayant un niveau de résistance à la compression fixée. Les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés, le cas des cendres volantes, le laitier, la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité. Cela peut apporter en soi un gain important vis-à-vis la durabilité [1].

I.3 Sévérité et interaction des Agents Agressifs

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

- Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique.
- Les liquides inorganiques ou organiques qui, indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.
- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses.
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies [1].

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratés ne

sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

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

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture [4].

I.4 Généralités sur les bétons

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore.

Ce choix universel est fondé sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité, c'est-à-dire le bon comportement dans le temps face aux actions des charges et aux agressions physico-chimiques de l'environnement, constituent les principaux critères techniques. Les critères économiques sont évalués à partir de la disponibilité et du coût des matières premières, de la facilité d'emploi et du prix de revient du matériau en œuvre.

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix :

- ✓ Il est constitué de matériaux naturels primaires largement distribués à la surface de la terre.
- ✓ Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'utilisation d'une main-d'œuvre rapidement formée.
- ✓ Il permet une adaptation facile aux formes les plus variées puisque, mis en place dans des moules ou coffrages, il en épouse les volumes, aussi complexes soient-ils, permettant ainsi les plus grandes audaces architecturales.

- ✓ Ses capacités de résistance dépassent celles des meilleures roches naturelles.
- ✓ Sa durabilité est plus que séculaire lorsqu'il est correctement formulé et mis en

- ✓ œuvre ; il résiste bien aux effets d'environnements corrosifs et, en particulier, à l'action de l'eau de mer ; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies.
- ✓ Son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau irremplaçable dans le domaine de la construction.

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau et de faibles quantités d'adjuvants. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après durcissement, un produit solide dont les propriétés mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique fabriqué essentiellement à partir de minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

I.5. Constituants d'un béton

I.5.1. La pâte du ciment :

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux. La pâte du ciment se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs.

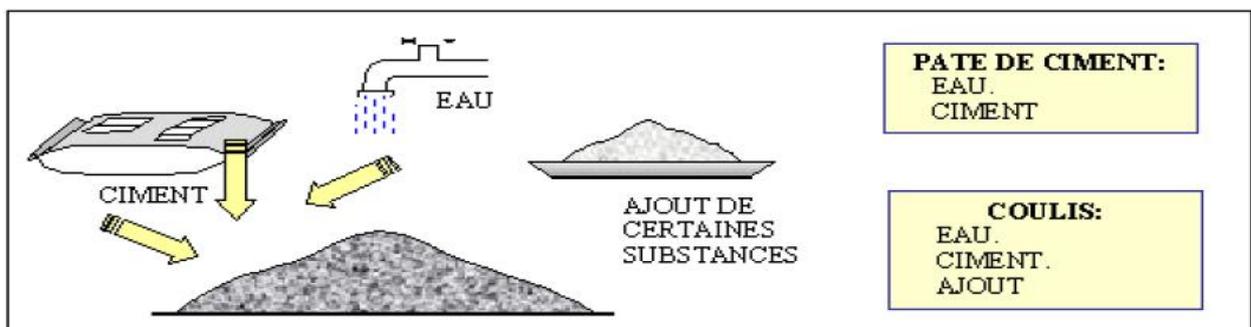


figure I.2. Les constituants des pâtes et des coulis de ciment

Elle est formée par:

- * Les hydrates (C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates)
- * Des grains de ciment non-hydraté
- * Des espaces capillaires
- * Des bulles d'air

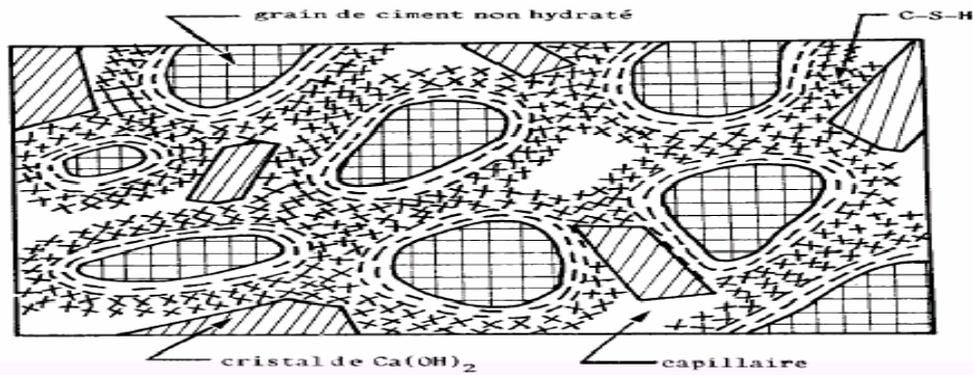


Figure 1.3. : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté

I.5.2. Le Ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450–1550 °C, température de fusion. Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

*Le ciment joue dans la construction les rôles suivants:

- Assurent la cohésion des éléments de maçonnerie en les reliant entre eux.
- Assurer la prise, le durcissement.
- Dans le béton participe au bouchage des vides, c'est-à-dire à l'accroissement de la compacité.
- L'étanchéité à l'eau en augmentant les dosages

I. 5. 2.1.Types de ciment

✧ Ciment CRS

Composition : résulte du broyage du clinker et du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de fillers en faible quantité (<3%). La teneur en clinker est au minimum 97%.

LE CIMENT CRS (Figure I.4) (ciment résistant aux sulfates) est constitué de :

- * **95% de clinker.** Des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment

- * **Du sulfate de calcium** sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.



Figure I.4 : Ciment CRS

✧ **Ciment CPJ**

Composition : résulte du mélange de clinker en quantité au moins égale à 65% et d'autres constituants tels que laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers (un ou plusieurs) dont le total ne dépasse pas 35%.

Ciments Portland composé (Figure I.5) (CEM II) ajout de cendres pouzzolaniques ou autres dans la composition. S'emploie pour mortier de maçonnerie devant être étanche à l'eau (murs de caves, murs de fondations, quais,...)



Figure I.5. ciment CPJ

✧ **Les ciments au laitier**

Composition : trois types de ciments comportent des pourcentages de laitier assez importants; il s'agit du ciment de laitier au clinker (CLK), du ciment au laitier et aux cendres (CLC), du ciment de Haut-fourneau (CHF).

✧ **Les ciments à maçonner**

Composition : résultent d'un mélange à proportions variables de constituants de liants hydrauliques (clinker, laitier, pouzzolane,...etc.) avec une proportion d'inertes (< 50%). Le ratio de laitier doit être inférieur à 50% du poids des constituants actifs.

✧ **Le ciment prompt**

Composition : est obtenu par cuisson, à température modérée (1000 ÷ 1200 °C) d'un calcaire argileux d'une grande régularité. La mouture est plus fine que celle des ciments Portland.

✧ **Le ciment alumineux fondu**

Composition : résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des CPA.

✧ **Les ciments blancs**

Composition et caractéristiques : la teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et Kaolin) débarrassées de toute trace d'oxyde de fer. Les caractéristiques sont analogues à celles des ciments Portland gris.

I. 6. Les Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle [15]. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton utilise généralement des granulats roulés de rivières. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, le risque de blocage dans un milieu fortement ferrillé augmente lorsque le D max augmente [16]. Ainsi, le D max des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

I.7. Les sables

Les sables sont des granulats de dimension maximale « D » n'excédant pas 5mm.

On distingue:

- les sables naturels ou alluvionnaires
- les sables artificiels produits par concassage d'une roche massive au niveau d'une carrière.

On peut classer les sables selon trois paramètres dont:

a) La granularité : permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- Sables fins.
- Sables moyens.
- Sables grossiers.

b) La propreté et la teneur en fines : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

c) La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit:

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.10
- Sables calcaires.

Dans le cas d'utilisation de sable de site terrestre, il est recommandé d'éliminer la couche superficielle généralement souillée (salie) de matières organiques qui affectent son mouillage par l'eau de gâchage.

I. 8. L'eau

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [17] :

- ☞ 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- ☞ 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

Au-delà de son rôle lors de l'hydratation, l'eau demeure présente dans le béton et continue de modifier la microstructure. Le béton est susceptible de sécher ou d'absorber l'humidité environnante. Les mouvements d'eau dans le béton sont responsables de plusieurs problèmes de durabilité dont les phénomènes liés au gel et au transport d'agents agressifs. Le comportement de l'eau dans le béton est influencé par les ions en solution et par la dimension des pores dans lesquels elle est contenue.

*** Quelques méthodes de composition des bétons**

L'étude de la composition d'un béton aboutit à un mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau, pour réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage.

Nombreuses sont les méthodes qui ont pour résultats des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux. Des méthodes sont à granularité continue et d'autre à granularité discontinue. Les premières conduisent à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant en général des résistances en compression un peu supérieures mais parfois au détriment de l'ouvrabilité. La plus part des méthodes employées sont à granularité continue.

De nombreux spécialistes se sont penchés sur cette question. Mais quelques méthodes sont plus utilisées parmi elles nous pouvons citer :

- ✓ Méthode de Bolomey,
- ✓ Méthode de Faury .
- ✓ Méthode de Valette.

I. 9 . Influence des propriétés des matériaux entrant dans la fabrication du béton

a) Type de ciment

Certains types de ciment offrent de meilleures performances en présence d'eau de mer ou de granulats potentiellement réactifs. En milieu marin, il peut être nécessaire d'utiliser un ciment type 50 à faible teneur en C3A. Pour limiter les risques de réaction alcalis-granulats on peut choisir un ciment à faible teneur en alcalis.

b) Type de granulats

Certains granulats sont gélifs, c'est-à-dire qu'ils sont sensibles à l'action des cycles de gel dégel. Il faut donc éviter de les utiliser dans les bétons exposés au gel. Il existe aussi des granulats qui peuvent réagir avec les alcalis du ciment pour former des produits expansifs qui peuvent faire fissurer le béton (réaction alcalis-granulats). Il existe des essais d'acceptation qui permettent d'identifier les granulats potentiellement réactifs.

c) Ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers)

Les ajouts minéraux peuvent modifier considérablement le comportement du béton exposé à un environnement donné. Ils peuvent parfois améliorer ou diminuer la durabilité du béton. Les effets sont fonction du type et du dosage de l'ajout minéral.

I. 10. Influence des propriétés physico-chimiques et des paramètres de formulation du béton

a) Résistance à la compression et à la traction

Une résistance à la compression élevée est généralement un indice de bonne qualité du béton :

Elle est généralement le signe d'un rapport E/C faible qui produit généralement une pâte de ciment durcie de meilleure qualité (porosité et perméabilité plus faibles). Une bonne résistance à la traction est souhaitable pour la résistance au gel. La résistance à la compression peut être utilisée pour spécifier un niveau de maturité minimal avant la première exposition en milieu agressif (résistance minimale à 28 jours).

b) Choix Du Rapport Eau/Ciment (E/C) Ou Eau/Liant (E/L)

Le rapport E/C est un paramètre fondamental qui contrôle la plupart des propriétés physicochimiques du béton. Le E/C exerce un rôle prépondérant dans presque tous les mécanismes de destruction qui peuvent affecter le béton. Du point de vue de la durabilité, une réduction du E/C est presque toujours bénéfique car elle entraîne une diminution de:

- ✓ Porosité de la pâte de ciment hydraté
- ✓ Perméabilité de la pâte et du béton

I. 11. Causes d'une mauvaise durabilité

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques.

Les dommages d'origine mécanique sont causés par les chocs, l'abrasion, l'érosion ou la cavitation. Les attaques chimiques externes sont principalement causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates ou le gaz carbonique ainsi

que par de nombreux liquides et gaz d'origine naturelle ou industrielle. Les causes physiques de détérioration comprennent les effets d'une température élevée ou les cycles gel dégel.

L'action destructrice peut être de nature très variée et peut manifester de façon directe ou indirecte. Il convient de noter avant toute chose que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause: le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais, lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront. Pour cette raison, il est quelque fois difficile d'attribuer la détérioration à une cause particulière, mais la qualité du béton, au sens le plus large du terme (quoique la perméabilité mérite une attention spéciale), doit presque toujours être prise en considération.

En effet, à l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes associés à la durabilité font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton.

I. 12. Aspects affectant la durabilité

I. 12.1. Attaque par les sels/chlorures

L'attaque par les sels/chlorures est un phénomène où la corrosion des éléments en acier dans le béton est accélérée par la présence d'ions chlorure ; ceci mène à la fissuration et à l'écaillage du béton, dus au gonflement des produits corrodés, à la réduction de la section des aciers, et finalement à des performances dégradées de la structure. Les ions chlorures qui accélèrent la détérioration proviennent soit initialement des matériaux de construction, soit plus fréquemment de l'environnement extérieur.

La présence de sels dès l'origine peut être due à l'utilisation d'un sable de mer insuffisamment lavé ou du chlorure de sodium utilisé comme accélérateur du durcissement du béton. Les sels apportés provenant de l'extérieur, peuvent avoir pour origine le sel contenu dans les embruns maritimes ou l'utilisation de sels de Déverglaçage.

I. 12.2. Gel/Dégel

Le dommage dû au gel/dégel est un phénomène où l'écaillage du béton d'enrobage, de fines fissures et l'éclatement du béton apparaissent à cause de l'alternance répétitive gel/dégel. La réduction de la section transversale du béton peut accélérer la corrosion des aciers. La fine fissuration et l'écaillage, qui entraîne la détérioration de la pâte du béton, a souvent lieu lorsque la qualité du béton est faible ou lorsque l'air est insuffisamment entrainé. L'éclatement du béton se produit lorsque la qualité des agrégats est faible.

I. 12.3. Carbonatation

Le CO₂ présent dans l'air pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures et, en présence d'eau dans les pores, abaisse le pH (initialement de 13) de la solution interstitielle du béton à 9 par réaction avec la pâte de ciment hydratée et Notamment la portlandite :



I. 12.4 Alkali-réaction

L'alkali réaction est un phénomène où des agrégats contenant des minerais de silice et roche de carbonate réagissent avec les composants alcalins du ciment pour générer des gels qui absorbent alors l'eau et gonflent, entraînant ainsi des fissurations significatives du béton. Il y a deux types d'alkali réaction :

- * Alkali-Silicate réaction, qui est la plus courante au Japon,
- * Alkali-Roche Carbonate réaction.

Les agrégats qui réagissent avec les composants alcalins pour produire des gels sont appelés agrégats réactifs

I. 12.5 Action des ions sulfate

La détérioration due à l'action des ions sulfate peut être due à des causes externes ou internes.

Quand elle est due à des causes externes, la détérioration est un type d'érosion chimique dans le béton. Lorsque le béton est exposé aux sulfates de sodium, de

calcium, de magnésium, etc., leur réaction avec le Ca(OH)_2 du ciment produit le gypse, et la réaction du gypse avec C3A génère l'ettringite, provoquant un gonflement significatif conduisant à la détérioration du béton. Ce problème ne se manifeste que dans des environnements particuliers tels que dans les installations chimiques, les installations d'eau usées, ou dans les sols pollués.

Quand elle est due à des causes internes, les dommages visibles sont similaires à ceux créés par l'alcali-réaction.

I. 13. L'attaque sulfatique

I. 13.1 Historique

Cela fait plus de 70 ans que de nombreuses attaques par les sulfates, présents naturellement dans le sous-sol, ont été constatées sur les fondations d'ouvrages en béton en milieu marin. Les dégradations de ces massifs de fondation sont attribuées en partie à la réaction des sulfates avec les hydrates de la matrice cimentaire. Dès les années 1950, les premières réglementations en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique recommandaient l'utilisation de béton à faible rapport Eau/Ciment, à taux de C3A limité et à ajouts pouzzolaniques.

Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne.

Les sulfates qui sont à l'origine de la destruction des ouvrages en béton peuvent être présents naturellement dans les sous-sols, intégrés dans la préparation du béton ou provenir de l'industrie (chimique et pétrochimique) suite à une pollution. Les sulfates se trouvent également associés aux alcalins dans les sels (sulfates de sodium, potassium, calcium et magnésium). On trouve aussi, dans le cadre du stockage des déchets radioactifs, des sulfates dans le déchet lui-même, ou dans les eaux de ruissellement ayant traversé des zones sulfatées (eau séléniteuses, eau d'infiltration, pluies d'acides,...).

Cinq critères majeurs de recherche dans le domaine de l'attaque sulfatique ont été définis comme prioritaires par Cohen:

- * Etablir des tests accélérés d'attaques sulfatiques, permettant de tester rapidement la résistance des pâtes de ciment vis-à-vis de certains facteurs reconnus et ce de manière normalisée,
- * Etablir une liste d'indicateurs appropriés à mesurer ou à contrôler pendant les essais d'attaque sulfatique,
- * Etablir des critères qui permettent d'affirmer de façon claire si le matériau a réussi le test,
- * Etablir une méthodologie systématique pour l'analyse des données,
- * Etablir une relation entre la durabilité de la pâte de ciment et celle du béton.

La détérioration des propriétés mécaniques du béton, qu'elle soit évaluée visuellement, mise en évidence par une décroissance de la résistance du matériau ou encore par des mesures d'expansion volumique, est la conséquence des réactions chimiques et des modifications microstructurales causées par l'attaque sulfatique. Il apparaît alors primordial de réaliser un contrôle des propriétés physico- chimiques du matériau soumis à une attaque aux sulfates mais aussi de le faire avant que la détérioration de celui-ci ne soit trop avancée (i.e. forte expansion).

I.13.2. Attaques du béton par les sulfates

I.13.2.1. Définition

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique 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 lors que les conditions externes sont réunies.

I.13.2.2 Mécanismes de base

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physicochimiques:

1-Expansion.

2- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

* Les mécanismes de destruction sont fonction de la concentration et de la Source des ions sulfates (le cation qui leur est associé) dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment.

* L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs (Fig I. 6)

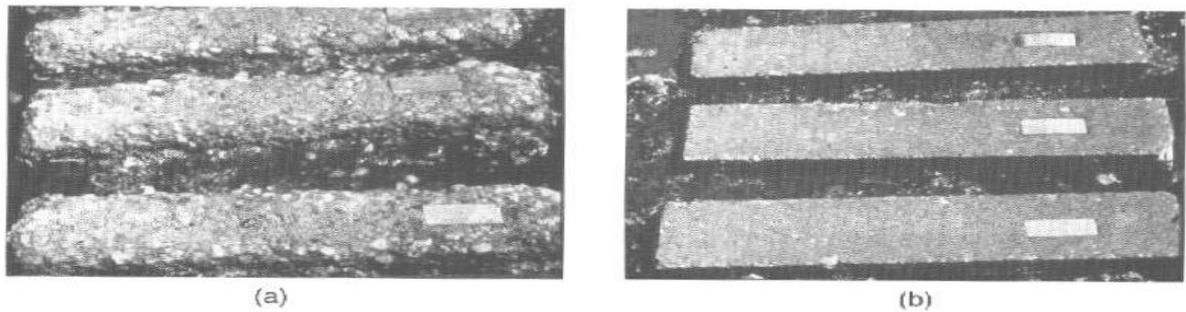


Figure. I. 6. éprouvettes de béton dégradées après 5 ans de contact avec des sols riches en sulfates

a: E/C = 0,50

b: E/C = 0,39

- * Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère de rythme de destruction.
- * Ces expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables
- * L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface.
- * Ces effets sont alors dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

I.13.2.3. Les deux types d'interactions chimiques

- * Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.
- * Les dégradations peuvent survenir suite à la formation de produits expansifs.
- * Les expansions peuvent résulter de la formation d'ettringite secondaire (l'ettringite primaire n'est pas expansive).

1. Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates). Dans le cas du sulfate de sodium:



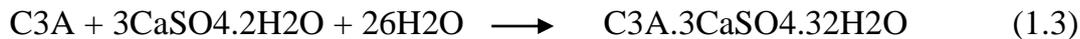
NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des C-S-H.

CaSO₄.2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces

internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

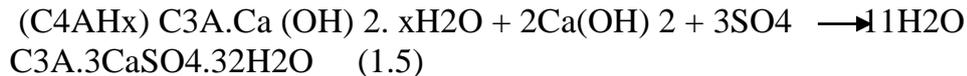
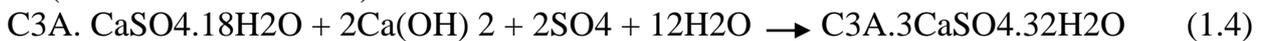
2. Formation d'ettringite secondaire :

✓ à partir du C3A anhydre résiduel:



✓ - à partir des aluminates hydratés:

(monosulfoaluminates)



- * Dépendant de la composition de la solution interstitielle, (particulièrement de la concentration en portlandite), la cristallisation de l'ettringite secondaire peut être expansive.
- * La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois Supérieures (suivant qu'il s'agit du C3A ou du C4AH13) au volume du solide initial (Fig. I. 7).

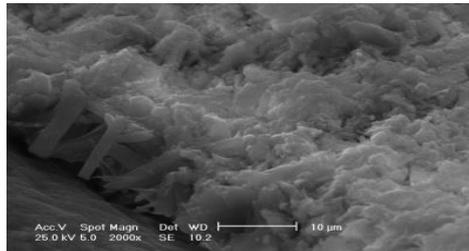


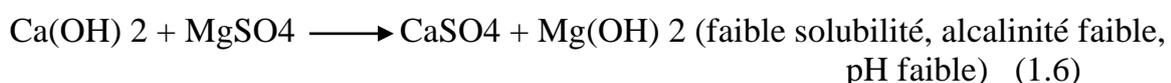
Figure. I. 7. Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topo chimiquement

- * Dans les ciments qui libèrent moins de portlandite (CHF, CLK - ciment avec laitier), l'ettringite précipite à partir de la solution dans les vides interstitiels du béton et la cristallisation en aiguilles n'est pas expansive (Fig. I. 8).



Figure. I. 8. Ettringite bien formée non expansive précipités à partir de la solution

➤ Le sulfate de magnésium est très agressif (double action)





Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



- ☞ L'attaque par le sulfate de calcium ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou $CaSO_4$ dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.
- ☞ L'attaque par le sulfate de sodium (très soluble) (Na_2SO_4) entraîne la formation d'ettringite secondaire expansive.
- ☞ Le sulfate de potassium (K_2SO_4) peut aussi être agressif. Le rythme d'attaque est similaire à celui du sulfate de sodium.
- ☞ La plupart des sulfates métalliques solubles ($FeSO_4, \dots$) peuvent être agressifs (notamment en présence de certaines bactéries).
- ☞ Problèmes de soulèvement des dalles sur des fondations contenant des shales pyritiques.

I.13.2.4 .Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton

-La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment.

-Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qui ralentie la pénétration des sulfates et de l'ion qui leur est associé.

-Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C_3A du ciment (Fig. I. 9)

Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en C_3A du ciment est faible.

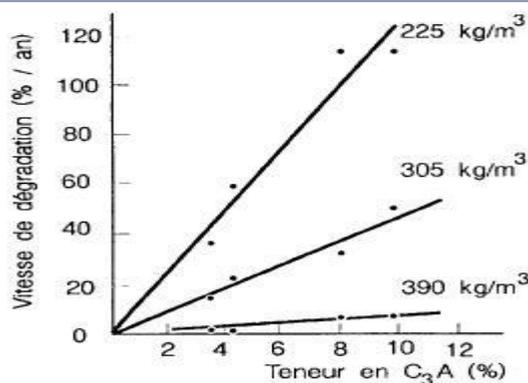


Figure. I. 9. Influence du dosage en ciment et de la teneur en C_3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na_2SO_4 à 10%).

- ❖ Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates.

- ❖ Moins de ciment => teneur en C3A plus faible dans le béton.
- ❖ Perméabilité plus faible
- ❖ Fumée de silice et cendres volantes: Moins de Ca(OH)_2 dans la pâte de ciment hydraté (réaction pouzzolanique)
- ❖ Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates

I.13.2.5.Facteurs influençant l'ettringite :

La formation d'ettringite est très dépendante de la teneur en aluminates de calcium et de la quantité de chaux disponible, cette dernière ayant une influence significative sur la solubilité de l'ettringite. En conséquence, la nature du ciment est une condition essentielle à la limitation du risque de formation d'ettringite expansive, donc la limitation de l'attaque sulfatique consiste à utiliser un ciment ayant un faible pourcentage de C3A, c'est-à-dire un ciment portland résistant aux sulfates, ou réduire la quantité de Ca(OH)_2 dans la pâte de ciment hydraté en utilisant un ciment à base de laitier de haut fourneau de pouzzolane. Ces mesures préventives sont utiles, mais il est encore plus important de prévenir la pénétration de sulfates dans le béton : on y parvient en confectionnant un béton aussi dense que possible dont la perméabilité est aussi faible que possible.

I.14.Action des acides

I.14.1.Introduction :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques: l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques l'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- ❖ les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- ❖ les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agro- alimentaires
- ❖ les réseaux d'égouts.

I.14.1.Sources des acides :

Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre et effluents des industries chimiques peuvent contenir de l'acide sulfurique. La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation de H₂S (gaz) qui peut être transformé en acide sulfurique par l'activité bactérienne.

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ.

Le Ca (OH)₂ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les CSH peuvent aussi être attaqués. Le béton peut être attaqué par des liquides dont le pH est inférieur à 6.5, mais cette attaque ne devient grave que pour des pH inférieur à 5.5 ; en dessous de 4.5, l'attaque devient très sévère.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant de CO₂ libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO₂ n'est pas agressif parce qu'une partie de ce CO₂ est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer de la dégradation de la surface exposée du béton. Quoique les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H₂S par des bactéries anaérobies.

Ce composé n'est pas en lui-même un agent destructeur, mais il est dissout par le mince film d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique. L'attaque apparaît donc au dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment

durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton.

Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer.

L'acide sulfurique est un acide très agressif qui réagit avec la chaux libre Ca (OH)₂ dans le béton et forme un gypse (Ca SO₄.2H₂O). Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite (3CaO.AI₂O₃.3CaSO₄.32H₂O) moins soluble de produit de réaction.

Ces composés très expansifs causent la pression interne dans le béton, qui mène à la formation aux fissures. La surface corrodée devient molle et blanche. Quand la corrosion continue, la structure en béton corrodé perd sa propriété mécanique. La diminution du dosage du ciment dans le béton peut être bénéfique, à condition, bien sur, que la masse volumétrique du béton reste intacte.

I.14.2.Mécanisme d'attaque :

Le béton est très alcalin en nature. Il est extrêmement susceptible à l'attaque par l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de « béton lavé » et la porosité augmente. L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction de ce dernier et la partie d'hydroxyde de calcium (Ca (OH) ₂) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous :



Acide hydroxyde de calcium sel de calcium eau

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques,

nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous:



Acide sulfurique + hydroxyde de calcium \longrightarrow sulfate de calcium + eau.
(Le produit de sulfate de calcium contribue à l'attaque de sulfate).

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment La deuxième phase étant la réaction acide silicate de calcium hydraté. Cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

Conclusion :

Puisque les matériaux à matrice cimentaire sont poreux, la plupart des phénomènes physiques et chimiques, associés à des agressions chimiques externes sur une pâte de ciment, s'effectuent par l'intermédiaire de cette porosité.

L'étude bibliographique menée nous a permis de définir avec exactitude que L'ajout des additions minérales actives (telles que les cendres volantes, pouzzolane naturelle,...) a un apport bénéfique sur les propriétés de durabilité des bétons réalisés à base de ciments avec ajouts. Ces ajouts présentent un remède efficace pour les différentes dégradations des bétons, à savoir une meilleure résistance aux acides, aux sulfates et à l'eau de mer. La contribution des ajouts minéraux vis-à-vis des attaques chimiques est due à :

Réduction de la teneur en chaux et C3A du mélange, suite à la consommation partielle de la portlandite libérée par l'hydratation des silicates du ciment Portland,

L'accroissement de la compacité des hydrates, et réduction de la porosité, ce qui entraînent une réduction de la perméabilité et des coefficients de diffusion. Les additions minérales améliorent la résistance des bétons aux altérations chimiques par la dilution des aluminates la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compacts.