



**ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX
DEPARTEMENT GENIE CIVIL**

Pathologie des bâtiments

« Partie 1 – Matériaux »

Ce support résumé complète la présentation en Power Point

Mehrez Khemakhem

Version 1 - Septembre 2012

SOMMAIRE

Chapitre 1 : généralités sur la pathologie	3
1 Généralités	3
2 Pathologie des constructions – différentes sources	4
3 Le diagnostic – les solutions – les moyens – les matériaux	5
4 Les mécanismes de dégradation	7
5 Le matériau béton – rappel	8
6 Notions de durabilité du béton	13
Chapitre 2 - Carbonatation du béton	17
1 Processus de carbonatation	17
2 Conséquences de la carbonatation	19
3 Comment mesurer la carbonatation de façon simple	19
4 Comment s'en prémunir et comment la prévoir	20
Chapitre 3 : la corrosion des armatures	22
1 Corrosion des aciers	22
2 Mécanismes de corrosion	22
Chapitre 4 : bétons en milieu sulfaté	27
1 Historique	27
2 Généralités	27
3 Les sources des sulfates	28
4 Les mécanismes de réaction	29
5 Manifestations externes et diagnostic	31
6 Paramètres conditionnant la tenue des bétons	31
7 Les normalisations et recommandations	32
Chapitre 5 : l'alcali-réaction	34
1 Historique	34
2 Mécanismes de réaction	34
3 Paramètres de réaction	36
Chapitre 6 : autres sources de pathologie	38
Le béton et l'eau	38
La lixiviation	40
Le retrait du béton	42
Chapitre 7 : analyses des pathologies	44
1 Démarche diagnostic	44
2 Démarché diagnostic relative aux dégradations dues aux attaques sulfatique et a l'alcali-réaction	44

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LA PATHOLOGIE

1. GENERALITES :

Les ouvrages sont construits pour assurer une ou plusieurs fonctions. Il importe que la ou les fonctions puissent être remplies en permanence sans mettre en danger la sécurité des exploitants. Aussi, les conditions d'exploitation doivent rester optimales sur le plan confort, esthétique, facilité d'accès,...

Dès sa mise en service, un ouvrage subit diverses dépréciations résultant de son utilisation et de l'environnement. Sa valeur commerciale et/ou son aptitude au service diminue alors plus ou moins rapidement suivant sa qualité initiale et l'entretien qui lui est apporté. Un ouvrage peut également après un certain temps ne plus satisfaire les besoins ou attentes de ses utilisateurs. Il peut encore subir des dommages plus ou moins importants suite à une utilisation non appropriée (surcharge, ...) ou des conditions environnementales exceptionnelles (inondations, incendie, tremblement de terre, choc,..). Le domaine d'activité de la maintenance (rénovation ou conservation) des ouvrages englobe toutes les opérations conduites sur un ouvrage dès sa mise en service et jusqu'à sa démolition visant à maintenir, rétablir, rénover ou améliorer sa valeur d'utilisation. Chronologiquement les divers types d'interventions sur un ouvrage durant son existence et leur effet sur sa valeur d'utilisation sont présentés à la figure 1. A ces interventions, il faut également ajouter les activités de surveillance d'un ouvrage qui sont aussi de ce domaine.

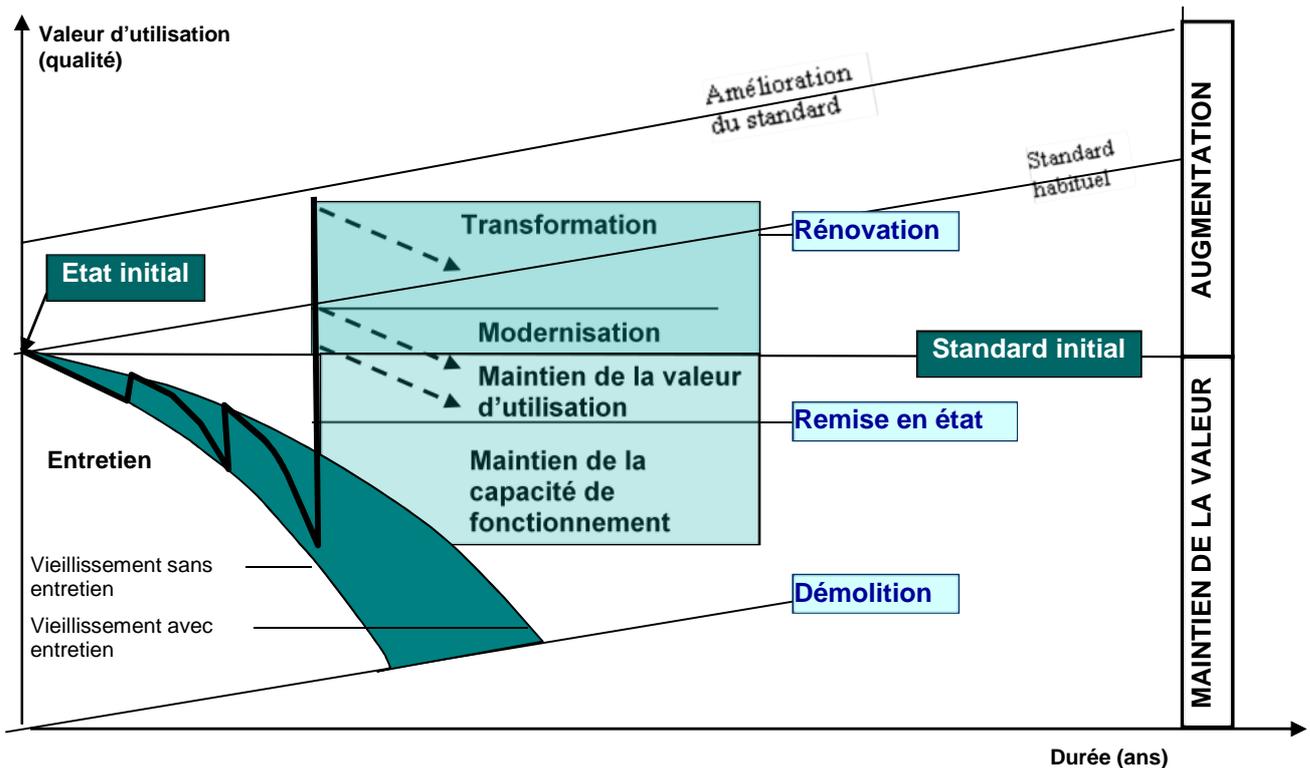


Figure 1 : Processus chronologiques des mesures d'entretien, de réhabilitation et de rénovation des constructions

Les ouvrages sont construits pour assurer une ou plusieurs fonctions. Il importe que la ou les fonctions puissent être remplies en permanence sans mettre en danger la sécurité des exploitants. Aussi, les conditions d'exploitation doivent rester optimales sur le plan confort, esthétique, facilité d'accès,...

Or, comme toute construction humaine, les ouvrages vieillissent. Le vieillissement peut être normal ou rapide. Cela dépend de plusieurs facteurs tels que :



- y a-t-il des malformations d'origine : défauts de conception ou d'exécution ?
- y a-t-il un entretien normal de l'ouvrage ou non ?
- l'ouvrage est-il normalement exploité ?
- dans quel environnement se trouve l'ouvrage ?
- y a-t-il des interventions quelconques sur l'ouvrage ?
- y a-t-il un changement d'affectation du local ?
- y a-t-il des phénomènes naturels exceptionnels qui ont affecté l'ouvrage (séisme, inondation,...) ?
- quelle est la durée de vie prévue pour l'ouvrage ?
- etc...

Un ouvrage vieillit normalement s'il a été bien conçu, bien construit, bien entretenu, bien exploité et se trouvait dans un environnement non agressif. Toutefois, espérer la pérennité de l'ouvrage serait utopique. Un ouvrage peut être conçu pour 5, 10, 20, 50, 100,... ans mais jamais pour une durée illimitée. Dans tous les cas, la sécurité doit être garantie.

2. PATHOLOGIE DES CONSTRUCTIONS - DIFFERENTES SOURCES :

Les pathologies d'un ouvrage ou d'une construction sont différentes selon :

- la nature de l'ouvrage ou de la construction : maison individuelle, bâtiment, pont, silo, mur de quai, barrage,... Ils ne sont pas soumis ni aux mêmes sollicitations ni aux mêmes environnements ;
- les conditions d'exploitation : trafic important ou occasionnel, milieu naturel (gel, chaleur, humidité,...) ;
- l'âge de l'ouvrage.

Les désordres ou pathologies peuvent être séparément ou ensembles liés :

- à la conception,
- à l'exécution,
- à l'exploitation,
- au manque d'entretien,
- à des causes accidentelles.

Certains désordres peuvent apparaître même avant l'exploitation de l'ouvrage (mauvaise conception ou exécution).

• **désordres liés à la conception :**

La conception est la responsabilité de l'architecte, du bureau d'études ou parfois de l'entreprise si elle conçoit certaines parties d'ouvrages.

Les erreurs de conception sont au niveau des plans, des calculs, des préconisations, des plannings, de l'ordre des interventions,....

- *pour les plans* : dimensions erronées, discordances, mauvaise représentation,...
- *pour les calculs* : charges d'exploitations non adaptées à l'ouvrage, données géotechniques incomplètes,...
- *pour les préconisations* : mauvaise description dans les cahiers des charges, cuvelage, barbacanes oubliées dans un mur de soutènement, étanchéité, enduit, grillagé,...



- pour l'ordre des interventions : discontinuité, reprise de bétonnage,....
- pour le planning : certaines tâches devront se réaliser avant d'autres.

Les désordres liés à la conception intéressent plusieurs parties de l'ouvrage et sont liés à l'adaptation du sol, à la couverture, aux façades, à la structure.

a/ l'adaptation du sol : on y trouve

- les erreurs affectant les fondations superficielles ou profondes. Les principales erreurs sont liées au mauvais choix du type de fondation ou à une profondeur insuffisante de l'assise. Cela est dû principalement à une méconnaissance du sol ou une mauvaise interprétation de l'étude du sol.
- les erreurs affectant les murs enterrés : les désordres sont dus à une absence du cuvelage, une absence du drainage, une absence du revêtement d'étanchéité,...
- les erreurs affectant le dallage sur terre plein : les désordres sont dus principalement à un mauvais compactage du sol d'assise. La conception intervient dans le choix de la solution qui peut être non appropriée au terrain.

b/ la structure : on y trouve

- les erreurs affectant les poutres et plancher : flèche excessive, armatures insuffisantes à l'effort tranchant,
- Les erreurs affectant les éléments en porte à faux : armatures mal placées, armatures mal ancrées,...
- Les éléments en charpente métallique ou en bois : absence de contreventement, instabilité de forme des éléments,....

c/ les façades : on y trouve

- hétérogénéité des parois au niveau des linteaux et chaînages,
- absence de chaînage,
- choix du revêtement extérieur inadapté au support ou à l'environnement,...

• **désordres liés à l'exploitation :**

Les conditions d'exploitation d'un ouvrage doivent être conformes à celles spécifiées lors de la conception et du calcul. Les désordres peuvent survenir :

- d'une charge d'exploitation supérieure à celle prévue,
- des conditions hydrométriques (présence d'eau permanente),
- intervention sur un élément de structure,...

• **désordres liés au manque d'entretien :**

Ce sont les pathologies liées principalement au manque d'entretien :

- des systèmes d'alimentation et d'évacuation des eaux,
- des systèmes de ventilation,
- de l'entretien des éléments extérieurs : fenêtres portes,...
- à l'entretien de la toiture terrasse et des surfaces extérieures (balcons, terrasses,...).

3. LE DIAGNOSTIC – LES SOLUTIONS – LES MOYENS – LES MATERIAUX :

Une fois le désordre constaté, plusieurs étapes sont à franchir qui sont principalement :

• **le diagnostic :**

Il permet de montrer la source de la pathologie. Les moyens utilisés pour un diagnostic sont :

- l'examen visuel,
- l'analyse des conditions d'exploitation et leur recollement avec les conditions optimales,
- l'utilisation d'équipements d'analyse et de mesures,
- le contrôle de l'évolution de la pathologie.

- **le choix de la solution :**

Plusieurs choix sont possibles en fonction de la situation. On y trouve :

- la réparation superficielle et la protection extérieure,
- la reconstitution du béton armé,
- le traitement par injection,
- le renforcement structurel,
- la reprise en sous œuvre,
- la protection cathodique

- **les moyens :**

Un choix d'une solution suppose la possibilité de l'appliquer. Certaines techniques demandent des applications spéciales ou même des procédés brevetés.

- **les matériaux :**

Les matériaux utilisés pour la réparation sont principalement :

- des mortiers et des coulis à base de liants hydrauliques, de résines synthétiques ou les deux ensemble,
- des plaques métalliques,
- des lamelles ou tissus en fibres synthétiques,
- des câbles,
- des peintures,....

EXEMPLES DE DESORDRES



4. LES MECANISMES DE DEGRADATION :

Les pathologies affectant un ouvrage proviennent de problèmes liés aux matériaux ou des problèmes liés aux systèmes constructifs.

Pour les matériaux, se sont principalement des problèmes physico-chimiques liés à la nature même des matériaux, à leur confection, à leur mise en œuvre et à l'environnement dans lequel ils se trouvent.

Pour les systèmes constructifs, ils intéressent la structure et ses différents composants au niveau de l'infrastructure ou de la superstructure.

En allant du plus bénin au plus grave, il est possible de distinguer :

- les défauts sans conséquences importantes, telles que variations de teintes sur un même parement, efflorescences, taches noires, fuites de laitance, bullage, marbrures, fissures superficielles, ... ;
- les défauts indiquant que l'évolution risque de se faire anormalement : carbonatation, ressuage, nids de cailloux, faïençage,... ;
- les défauts indiquant une évolution plus ou moins avancée : écaillage, fissuration, délamination...;
- les défauts traduisant une modification du fonctionnement de la structure et ayant donc une incidence structurale : fissuration importante, déformation excessive... ;
- les défauts structuraux indiquant la proximité d'un état limite ultime et nécessitant une restriction de l'usage de l'ouvrage, voire sa mise hors service.

Les principaux désordres rencontrés peuvent être attribués : au «vieillessement», au « manque d'entretien », à des « causes accidentelles », à des « erreurs de conception », « de construction », « de réparation »...

Cette classification est importante pour instruire le dossier mais, pour traiter les désordres, il est préférable de classer les causes d'abord selon les mécanismes mis en jeu, c'est-à-dire selon qu'ils sont la conséquence :

- d'altérations d'origine physique ;
- d'altérations d'origine chimique ;
- de sollicitations mécaniques excessives.

Il faut préciser, ensuite, si les causes sont :

- d'origine purement mécanique ;
- issues d'erreurs de conception, d'exécution ou de gestion (par exemple, insuffisance d'entretien, erreur commise lors d'une réparation...).

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles,
- une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau.

La phase d'incubation s'arrête :

- soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un "volume critique" provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfatique),
- soit lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l'enrobage est carbonaté).

La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

Le tableau 2 donne une statistique (Française) des origines des dommages dans les structures en béton armé.

Tableau 2 : origines des dommages dans les structures béton

Origines	Description	%
Technologiques (composition du béton)	1 - Béton de qualité inadéquate 2 - Attaque chimique du béton 3 - Corrosion de l'armature (protection insuffisante) 4 - Utilisation d'un composant inadéquat	42
Constructives (mise en œuvre)	1 - Négligence lors des contrôles sur le chantier 2 - Absence de contrôle ou ignorance des règles de l'art	22
Conceptuelles	1 - Calcul des contraintes erronées 2 - Estimation des déformations insuffisantes	12
Surcharges	Ouvrages calculés pour d'autres surcharges que celles qu'ils supportent	8
Fondations	Fondations inadéquates	7
Accidentelles (ou non !)	Incendie, explosion	4
Destruction	1 - Par addition d'au moins 2 des causes précédentes 2 - Par rupture d'une structure voisine	5

5. LE MATERIAU BETON - RAPPEL :

Le béton est un mélange de granulats, d'eau, de ciment et d'air. La pâte est composée par le ciment et l'eau (peut être adjuvantée) est durcissante dans le temps.

a/ la pâte hydratée :

Le ciment est constitué principalement de **Clinker Portland (K)** : C'est un constituant obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450 °C, d'un mélange approprié de **calcaire et d'argile** en proportion moyenne **80 % - 20 %**. Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- **le silicate tricalcique, $3CaO.SiO_2$, que l'on écrit C_3S** ; (60 à 65 %)
- **le silicate bicalcique, $2CaO.SiO_2$, que l'on écrit C_2S** ; (20 à 25 %)
- **l'aluminate tricalcique, $3CaO.Al_2O_3$, que l'on écrit C_3A** ; (8 à 12 %)
- **l'aluminoferrite tétracalcique $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, que l'on écrit C_4AF** (8 à 10 %)

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Le ciment HRS (Haute résistance aux sulfates) est défini par les normes NT 47.01 et NT 47.26. Sa particularité est teneur en C₃A < 3% et la somme C₄AF + 2 C₃A < 20%.

Dès le contact de l'eau avec la poudre d'un liant (t_0), l'hydratation commence et les propriétés de la pâte obtenue sont évolutives dans le temps. Au départ, c'est la période dormante de l'hydratation où la température stagne et la consistance évolue lentement. A partir d'un certain moment, l'hydratation devient plus active et on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité avec élévation de la température. Ce moment est appelé **début de prise (t_1)**. La **fin de prise** correspond au moment où la pâte devient un bloc rigide (t_2). Au début de prise, des ponts d'hydrates commencent à lier les grains du liant. A la fin, les grains de sont tous solidarisés. C'est le début du **durcissement**.



Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide. Pour un ciment donné, si le début de prise est de 3h30 à 20 °C, il sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C et de 30 min à 35 °C.
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs aux valeurs minimales fixées par la norme, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

Le durcissement est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément (tableau 1).

Tableau 1 : Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker

N	Constituant	Comportement des constituants purs	Chaleur dégagée en cal/g
1	C₃S	- fait prise et durcit rapidement - haute résistance atteinte à court terme	120 cal/gr
2	C₂S	- réagit lentement - haute résistance atteinte à long terme	62 cal/g
3	C₃A	- prise de façon très désordonnée et rapide - faible résistance Rq : pour réguler la prise du C₃A, il faut ajouter du gypse,	207 cal/gr
4	C₄AF	- faible résistance	100 cal/g

1 cal = 4.186 j

Le graphique ci-dessous (fig. 2) montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

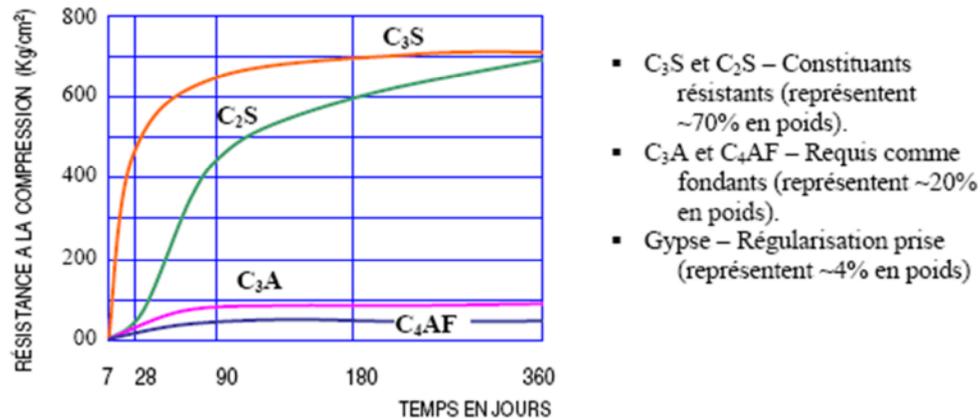


Figure 2 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP.

La **chaleur d'hydratation** est une autre manifestation des réactions d'hydratation. Elle augmente, en général, avec la classe de résistance du ciment, le dosage, la température initiale. Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée
- la nature des constituants: les ciments CEM 1 comportant presque exclusivement du clinker et dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires
- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C₃A) et silicate tricalcique (C₃S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte
- la température extérieure.

L'échauffement du béton qui en résulte, d'autant plus important que l'isolation naturelle (béton de masse) ou provoquée (coffrage isolant) est plus grande, provoque une accélération de l'hydratation au jeune âge.

L'hydratation du ciment produit des hydrates baignés par une solution interstitielle basique. Dans le béton armé, le pH élevé de la pâte protège normalement les armatures de la corrosion : c'est le phénomène de passivation.

Après hydratation avec l'eau, les hydrates comprennent : Les silicates de calcium hydratés (C-S-H), les aluminates hydratés, la chaux hydratée (**portlandite**), de l'eau adsorbée sur certains cristaux et des impuretés.

- Les C-S-H : occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Le C-S-H est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide. Le pH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). À des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation alors des transformations peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- La chaux hydratée (CH ou portlandite) : occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5. Elle participe peu au développement de la résistance du béton.
- Les aluminates hydratés : Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes Ettringite ou Monosulfoaluminates.

La pâte de ciment hydraté est formée par :

- Les hydrates
- Des grains de ciment non hydraté

- Des espaces capillaires
- Des bulles d'air

On y retrouve après hydratation (fig. 3) :

- Des grains de ciment (10 à 80 μm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
- Des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau
- Des hydrates
- Les pores de gel ne sont pas représentés (trop petits) et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur la figure au dessous.

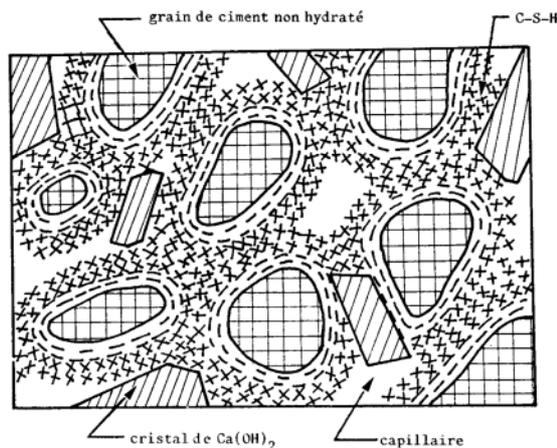


Figure 3

b/ la porosité :

La **porosité** du béton est constituée de plusieurs familles de *vides* dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'angström (Å).

Par ordre décroissant de diamètre on retrouve (fig. 4):

- **Les vides d'air, les cavités et les défauts de compactage** (diamètre > 1mm). Ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.
- **Les bulles d'air entraînées** ($10 \mu\text{m} < \text{diamètre} < 1 \text{ mm}$)
- **Les pores capillaires** ($0,01 \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5 \mu\text{m}$) : Si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros. Ce sont surtout le volume total et la dimension des pores capillaires qui influencent le plus la perméabilité du béton.
- **Les pores de gel** (diamètre < 40 Å) : Les pores de gel contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillets de C-S-H. Cette eau est relativement stable et il est difficile de l'extraire par séchage. Les pores de gel n'ont pas une grande influence sur la perméabilité

Relation entre teneur en solides et structure des pores						
Grandeur en m	Substance solide	Sorte de Pores	Type de Pores	Rayon des Pores	Absorption d'humidité par	
$10^0 = 1 \text{ m}$	Gravier	Pores de compactage	Pores grosses	$> 2 \text{ mm}$	Capillarité	
10^{-1}						
$10^{-2} = 1 \text{ cm}$	Sable	Cavités	Macro-capillaires	2 mm		en secondes
$10^{-3} = 1 \text{ mm}$						
10^{-4}	Ciment (Poudre)	Pores capillaires	Meso-capillaires	50 μm		en jours
10^{-5}						
$10^{-6} = 1 \mu\text{m}$	Silicafume (Poudre)	Pores de gel	Micro-capillaires	2 μm	en années	
10^{-7}						
10^{-8}	Gel de ciment (hydrat.)	Pores de gel	Meso-Pores	50 nm	Condensation	
$10^{-9} = 1 \text{ nm}$						
			Micro-Pores	2 nm	Absorption	

Figure 4 : différents types de pores

Défaut de compactage



La porosité interne du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton :

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques,
- Toutes les perméabilités (eau, ions, gaz)
- Durabilité

Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue.

Le rapport **eau/ciment** exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

Supposons que l'on utilise une très **grande quantité d'eau** pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles.

Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les

grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire. La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées.

On peut montrer que pour un rapport **E/C de 0.42** environ, **il y a juste assez d'eau pour hydrater complètement tout le ciment.**

La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. La discontinuité des pores améliore la perméabilité du béton (fig. 5).

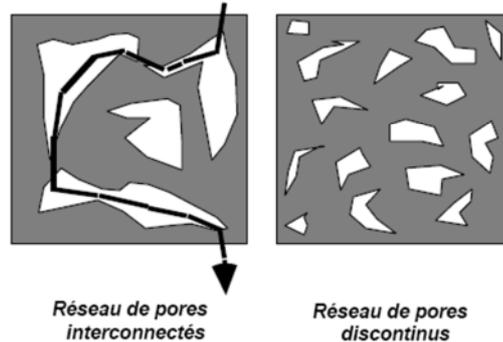


Figure 5

6. NOTIONS DE DURABILITE DES BETONS

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

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

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.

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

Pour s'assurer de cette durabilité, pendant longtemps, les bétons ont été spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Aujourd'hui, la durabilité est appréhendée en considérant un ensemble de propriétés dont, bien sûr, la résistance mécanique à 28 jours. Les autres caractéristiques prises en compte visent à assurer l'adéquation entre les propriétés physico-chimiques du béton et les contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage. Les caractéristiques à prescrire pour garantir la pérennité des ouvrages sont désormais plus complètes et plus précises.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter encore mieux la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

Les nouveaux textes normatifs relatifs au béton prennent en compte la DURABILITÉ en s'appuyant sur la notion de CLASSES D'EXPOSITION.

Ils imposent au prescripteur de définir les actions dues à l'environnement auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque PARTIE D'OUVRAGE va être exposé pendant la DURÉE D'UTILISATION de la structure.

Ces actions dues à l'environnement sont regroupées en CLASSES D'EXPOSITION.

Le choix des classes d'exposition de chaque partie de l'ouvrage est de la responsabilité du prescripteur.

La précision des données permettant la détermination des classes d'exposition est fondamentale pour chaque ouvrage. La détermination des classes d'exposition permet d'optimiser les performances du béton et sa durabilité en sélectionnant avec précision les caractéristiques en termes de formulation et de performance des bétons, parfaitement adaptées aux environnements dans lesquels ils vont se trouver.

La norme NF EN 206-1 définit (article 4.1 : Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement) 18 classes d'exposition regroupées en 6 classes par risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis (tableau 3).

Tableau 3 : classes d'exposition

	CLASSES D'EXPOSITION	
	XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
RISQUE DE CORROSION	XC	Corrosion induite par carbonatation
	XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine (sel de déverglaçage)
	XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
ATTAQUES	XF	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
	XA	Attaques chimiques

A. X0 : Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique) :

Cette classe ne peut concerner que les bétons non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm.

B. XC : Corrosion induite par carbonatation

Ces classes s'appliquent au béton contenant des armatures et exposé à l'air et à l'humidité. Les conditions d'humidité peuvent être considérées comme le reflet de l'humidité ambiante, sauf s'il existe une barrière entre le béton et son environnement.

- *XC1 : Sec ou humide en permanence.*
- *XC2 : Humide rarement sec*
- *XC3 : Humidité modérée*
- *XC4 : Alternance d'humidité et de séchage*

C. XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage. :

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé :

- *XF1 : Faible saturation en eau sans agent de déverglaçage.*
- *XF2 : Faible saturation en eau avec agents de déverglaçage.*
- *XF3 : Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage.*
- *XF4 : Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage.*

D. XS : Corrosion induite par des chlorures présents dans l'eau de mer.

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis aux chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

- *XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer. Cette classe est à utiliser pour les structures situées à moins de 1 km de la côte (AN).*
- *XS2 : Immergé en permanence.*
- *XS3 : Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.*

E. XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine.

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis au contact d'une eau autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage entraînés par des véhicules.

- *XD1 : Humidité modérée.*
- *XD2 : Humide, rarement sec.*
- *XD3 : Alternance d'humidité et de séchage.*

F. XA : Attaque chimique.

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface ou les eaux souterraines :

- *XA1 : Environnement à faible agressivité chimique.*
- *XA2 : Environnement d'agressivité chimique modérée.*
- *XA3 : Environnement à forte agressivité chimique.*



A chaque classe d'exposition correspondent des spécifications sur la composition des bétons.

Classe d'exposition	Aucun risque	Carbonatation				Corrosion par les chlorures						Environnement avec substances chimiques agressives		
						Eau de mer			Autres chlorures					
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XA1	XA2	XA3
E/C maxi		0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.55	0.50	0.45
Classe de résistance minimale	12/15	20/25	30/37	30/37	35/45	35/45	35/45	35/45	30/37	30/37	35/45	30/37	30/37	35/45
Dosage min en ciment (kg/m ³)		260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	320	360
Autres prescriptions												Ciments résistants aux sulfates		

Un même béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition différentes. Dans ce cas, le béton doit respecter la sélection des plus sévères exigences définies pour chaque classe. Dans les chapitres qui suivent, le tableau ci-dessus sera plus détaillé.

Ainsi, l'ingénieur doit concevoir et réaliser des constructions durables dans un environnement donné. La durabilité devient pour lui un objectif de qualité et son métier d'ingénieur consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût.

Chapitre 2 : CARBONATATION DU BETON

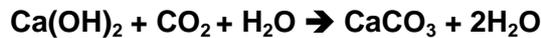
1. PROCESSUS DE CARBONATATION :

Lors de la fabrication du béton, la quantité d'eau introduite pour l'hydratation de son ciment est toujours supérieure à la quantité nécessaire. De ce fait, le ciment hydraté est toujours un milieu poreux dont les pores sont d'abord remplis d'eau qui se chargent en ions pour respecter l'équilibre chimique avec les hydrates du ciment (portlandite, C-S-H,...). Lorsque le matériau cimentaire sèche à l'air libre, il se désature en eau et les pores se remplissent partiellement d'air.

Le CO₂ naturellement présent dans l'atmosphère est alors susceptible de diffuser à travers la phase gazeuse du ciment.

Le CO₂ présent dans la phase gazeuse des pores se dissout dans la solution interstitielle pour former des ions carbonates qui réagissent principalement avec les ions calcium Ca²⁺. La portlandite Ca(OH)₂ formée durant le durcissement du béton et le dioxyde de carbone créent du carbonate de calcium (CaCO₃).

D'un point de vue chimique cette réaction se présente ainsi :



→ Baisse du pH à une valeur qui peut atteindre 8.3 si tout le Ca(OH)₂ est totalement carbonaté → aciers non protégés (fig.1)

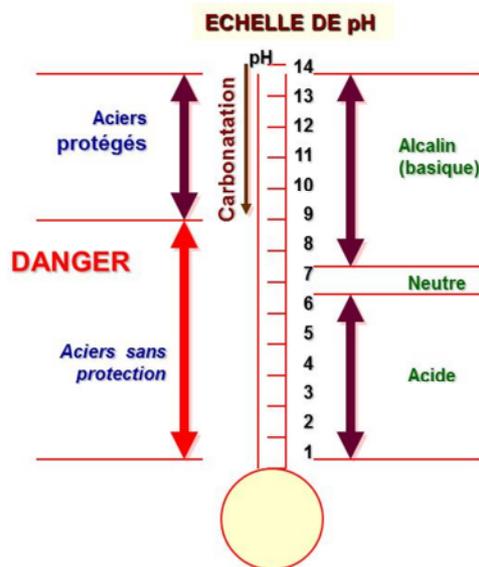


Figure 1

La carbonatation relève d'un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.

Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la corrosion du métal peut commencer en produisant notamment des espèces plus volumineuses que les matériaux initialement présents. Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées (fig. 2). Toutefois, la carbonatation augmente l'imperméabilité du béton grâce au colmatage de certains pores par le carbonate : l'absorption capillaire est réduite et la résistance mécanique est meilleure.

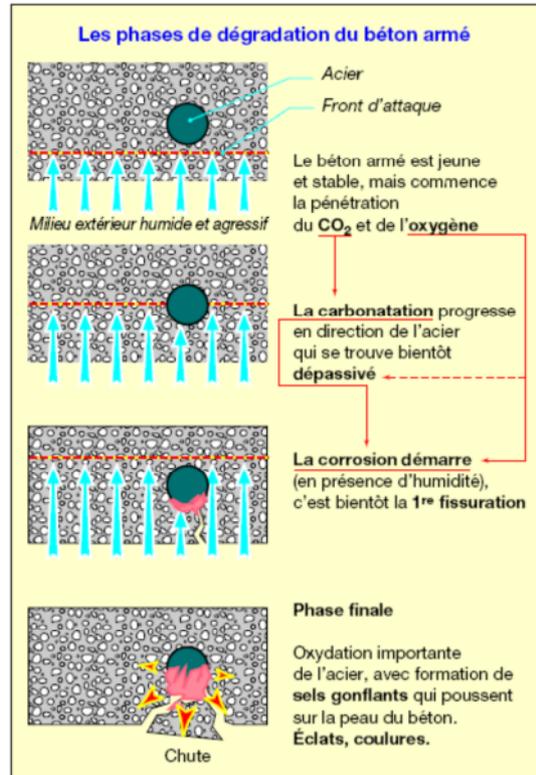


Figure 2

L'humidité relative de l'air joue un rôle important sur la vitesse de carbonatation. Pour les bétons courants, elle est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 % et presque nulle en atmosphère sèche ou saturée en eau. La carbonatation est par conséquent plus importante sur les surfaces protégées que sur celles exposées à la pluie. Une importante concentration en CO_2 est également un facteur augmentant la vitesse de carbonatation.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur (fig. 3). Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder.

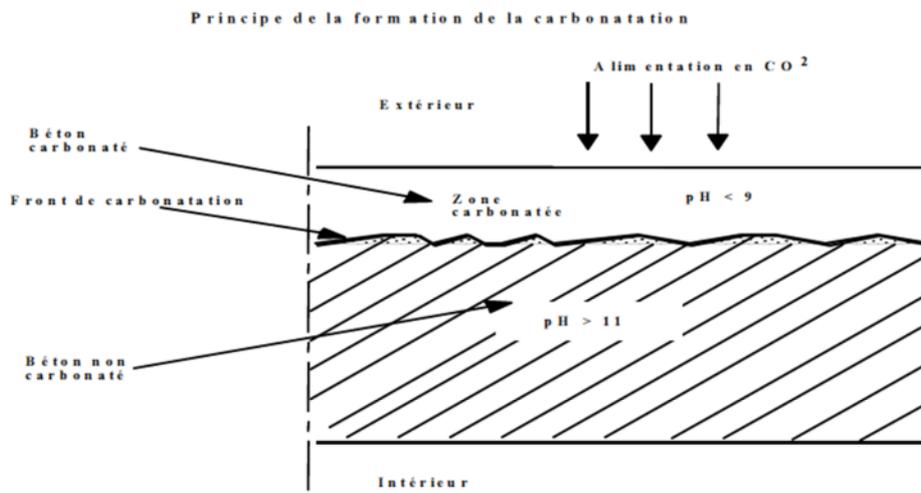


Figure 3

La vitesse de carbonatation obéit un processus de diffusion du CO_2 atmosphérique à travers la couche de carbonates formée. Elle suit une loi linéaire en fonction de la racine carrée du temps :

$$\text{Profondeur de carbonatation} = E = K \cdot \sqrt{t}$$

K = 0.5 pour un béton normal

K = 0.2 à 0.3 pour un béton de qualité, compact

2. CONSEQUENCES DE LA CARBONATATION :

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel des fissures et des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure (fig. 4).



Figure 4

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert.

3. COMMENT MESURER LA CARBONATATION DE FAÇON SIMPLE ?

La détermination de cette profondeur de carbonatation s'effectue sur une coupe fraîche de béton. Après dépoussiérage, on pulvérise un colorant sensible au pH, la phénolphthaléine. Celle-ci vire au rouge violacé au contact de matériaux dont le pH est supérieur à 9,2 et demeure incolore pour les faibles valeurs de pH, c'est-à-dire pour les zones carbonatées (fig. 5).

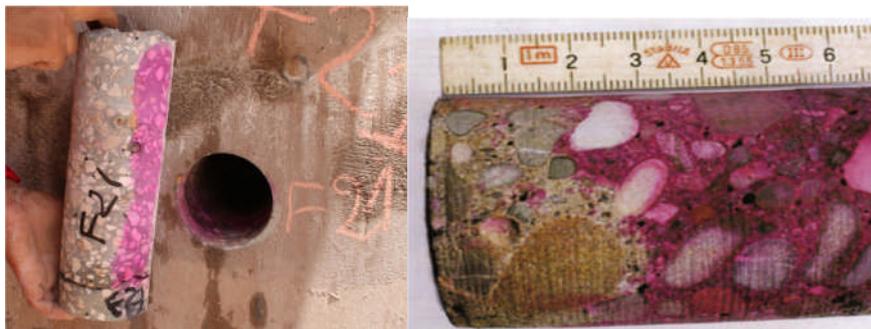


Figure 5

Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau.

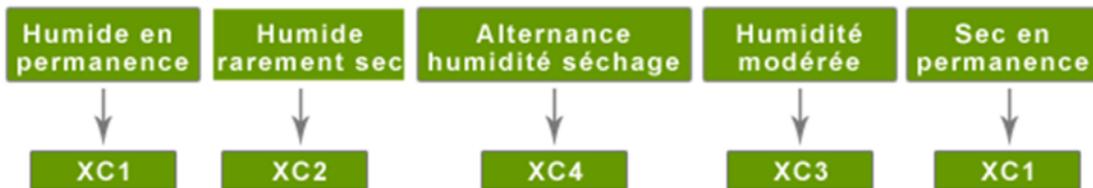
Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages.

Il existe d'autres techniques de mesure de la profondeur de carbonatation, plus précises, mais plus lourdes à mettre en œuvre. A l'exemple de la microscopie optique sur lames minces, de la méthode isotopique ou encore de la microscopie électronique à balayage.

4. COMMENT S'EN PREMUNIR ET COMMENT LA PREVOIR ?

Pour des conditions d'exposition données, la cinétique de carbonatation d'un béton est en relation avec sa porosité, et par conséquent avec ses caractéristiques mécaniques, puisque ces deux paramètres sont étroitement liés.

Ainsi, pour des bétons présentant des résistances à la compression supérieures ou égales à 50 MPa à 28 jours, comme notamment les BHP, la cinétique de carbonatation est très faible. Dans cette optique, la norme européenne EN 206-1 fixe des paramètres de formulations (dosages en liant, rapport Eau/Liant) et une classe de résistance minimale, pour qu'un béton se comporte de façon durable vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation du béton d'enrobage. Cette norme définit quatre classes d'exposition notées XC1 à XC4, dont l'agressivité est fonction de l'humidité et de l'existence de cycles d'humidification/séchage.



Classe d'exposition	Carbonatation			
	XC1	XC2	XC3	XC4
E/C maxi	0.65	0.60	0.55	0.50
Classe de résistance minimale	20/25	30/37	30/37	35/45
Dosage mini en ciment (kg/m3)	260	280	280	300

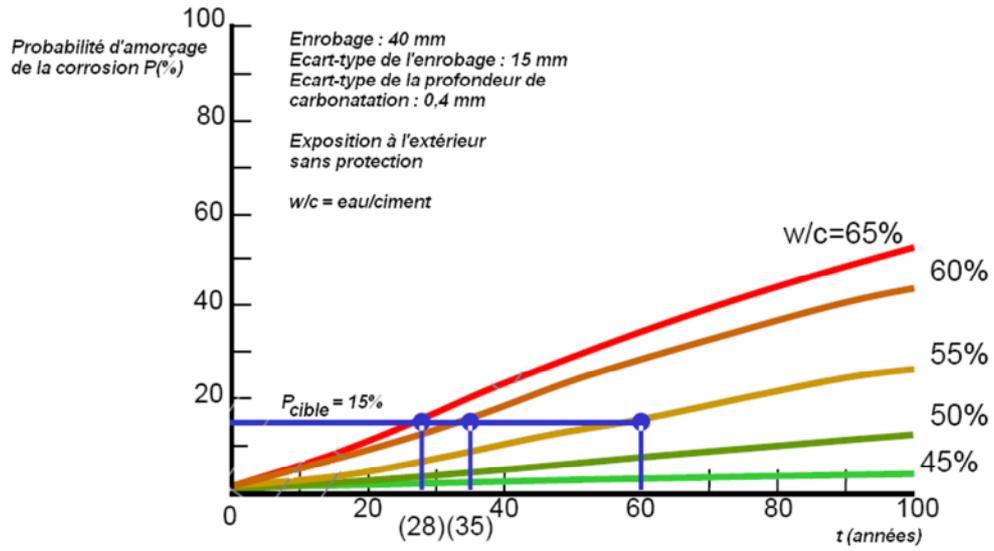


Figure 6 : Probabilité d'amorçage de corrosion suite à la carbonatation en fonction de E/C

Source : Jean-Armand Calgaro, Colloque international Sciences de l'Ingénieur et Développement du Maghreb, Hammamet, mars 2008

Chapitre 3 : CORROSION DES ARMATURES

1. LA CORROSION DES ACIERS :

Le contact de l'acier avec l'oxygène ou l'eau entraîne la corrosion de l'acier qui engendrera la formation de sels de fer en couches superposées sur le métal. La particularité essentielle de ces composés étant de se former avec une forte augmentation de volume (gonflement). La réaction entraîne successivement la fissuration, puis l'éclatement de la mince couche de béton recouvrant l'armature. Ce processus peut se manifester rapidement dans le cas d'armatures très mal enrobées, car la carbonatation est capable d'atteindre plusieurs centimètres de profondeur dès les premières années, dans certains bétons.

Le contact avec l'eau (béton immergé, pluie) va mouiller la paroi sur les premiers 2 à 3 cm de profondeur. Si le béton n'est pas hydrofugé, s'il est fissuré ou éclaté, il y aura contact de la barre d'acier avec l'eau et le phénomène de corrosion se manifestera (fig. 9).

La présence du chlore (dans les sels) accélère la cinétique de corrosion. Le chlore attaque l'acier.

2. MECANISMES DE LA CORROSION

2.1 - Cinétique de la corrosion

En terme de cinétique, l'évolution peut être schématisée en deux phases (modèle de Tuutti) :

- *l'amorçage* : initialement, l'acier est passivé par le béton d'enrobage. L'amorçage correspond à la phase conduisant à la dépassivation de l'acier (transformation du béton d'enrobage par carbonatation ou pénétration d'ions chlores) ;
- *la propagation de la rouille* : cette phase correspond au développement des réactions d'oxydation à la surface des armatures. Le gonflement qui en résulte induit des contraintes pouvant fissurer et provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

Dès la destruction du béton d'enrobage, on estime que la capacité fonctionnelle de l'ouvrage est entamée, même si la réduction de la section des armatures ne contribue pas encore à produire des défauts structurels.

2.2 - Nature électrochimique de la corrosion

La destruction de la couche passive et l'attaque du métal s'effectuent par un mécanisme de piles électrochimiques nécessitant de l'oxygène et de l'eau. Cette corrosion électrochimique implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique pour constituer une pile (fig. 1).

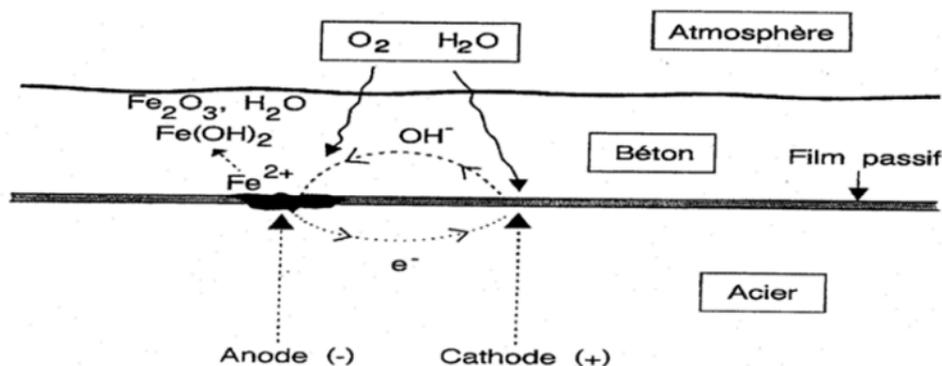


Figure 1 : Mécanisme de la corrosion électrochimique

A l'anode se déroule le processus de dissolution du métal :

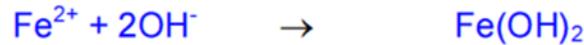


Dans un milieu neutre ou alcalin, les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés à la cathode par réduction de l'oxygène :



L'anode et la cathode à la surface du métal sont reliées par le métal conducteur qui permet le passage des électrons, tandis que le milieu électrolytique environnant assure le transport des ions par diffusion et referme le circuit de la pile.

Les ions ferreux réagissent ensuite avec les ions OH^{-} pour former de l'hydroxyde ferreux légèrement soluble :



Les réactions se poursuivent en présence d'oxygène pour donner $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et Fe_2O_3 , puis une oxydation lente conduit aux oxydes hydratés $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (goethite et lépidocrocite) et à la magnétite Fe_3O_4 (fig. 2). La rouille est formée d'un mélange de ces trois constituants.

Rôle des chlorures

La vitesse de corrosion de l'acier dans le béton est plus élevée en présence d'ions chlore (eau de mer ou sels fondants) :

- le premier effet des chlorures est de diminuer la résistivité de la solution électrolytique dans le béton ;
- un deuxième effet se manifeste au niveau de la surface métallique par un mécanisme d'amorçage de la corrosion dû soit à la dépassivation de la couche superficielle, soit à la migration des chlorures à travers le film d'oxyde.

Le mécanisme de la corrosion est présenté ci-dessous (fig. 2). L'attaque du métal est localisée en des points particuliers, les piqûres, qui constituent les sites anodiques, les sites cathodiques étant constitués par le film passif environnant.

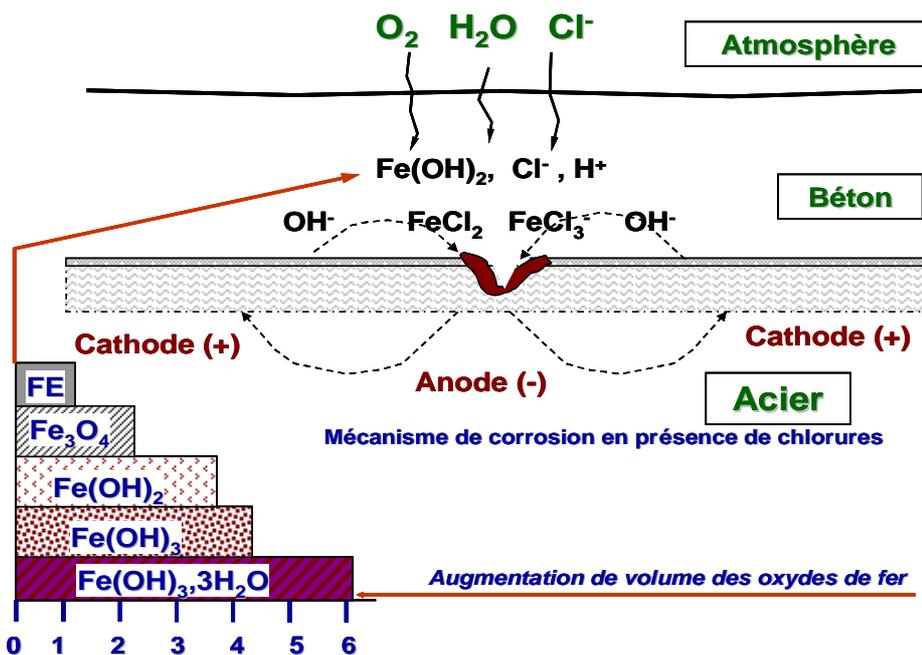


Figure 2 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures

Le seuil critique de dépassement à partir duquel s'amorce la corrosion de l'acier correspond à un rapport Cl^-/OH^- de 0,6. Il correspondrait à un changement de nature des produits d'oxydation.

Si la concentration en ions chlorure, au contact des armatures, dépasse les seuils suivants (seuils admis par la communauté scientifique), il y a chute brutale du pH et la corrosion des armatures se développe :

- au moins 0,4% du poids du ciment de la formule du béton ;
- au moins de 0,04 à 0, 1% du poids du béton suivant son dosage en ciment.

On notera aussi que lorsque la teneur en chlorures est très élevée dans un béton (ouvrage à la mer), il peut se produire une dissolution des armatures sans gonflement apparent (formation de rouille dite «verte»). Cette corrosion, par l'absence de toute manifestation visuelle, bien que rare, est redoutable.

En l'absence de fissures, la vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité du béton. Elle décroît avec le rapport E/C de façon exponentielle et dépend de la concentration environnante en sels.

La durée d'amorçage dépend du coefficient de diffusion des chlorures libres dans le béton (et par conséquent de sa structure poreuse).

2.3 - Détermination de l'état de corrosion

Pour déterminer l'état d'un ouvrage, il faut connaître :

- son état de corrosion (sections résiduelles des aciers) ;
- l'épaisseur d'enrobage ;
- les teneurs en agents agressif présents dans le béton (profondeur de carbonatation, teneur et profondeur de pénétration des chlorures, porosité, résistivité, alcalins).

On peut ensuite recalculer l'ouvrage en tenant compte des sections d'acier résiduelles et de l'augmentation des charges permanentes.

L'état de corrosion de l'ouvrage peut être déterminé par la mesure du potentiel de corrosion de l'armature, mesure effectuée par rapport au potentiel d'une électrode de référence selon le dispositif indiqué sur la figure suivante.

Ces potentiels de corrosion des armatures peuvent être reliés à des probabilités de corrosion qui définissent l'urgence de la réparation (fig. 4 et tableau).

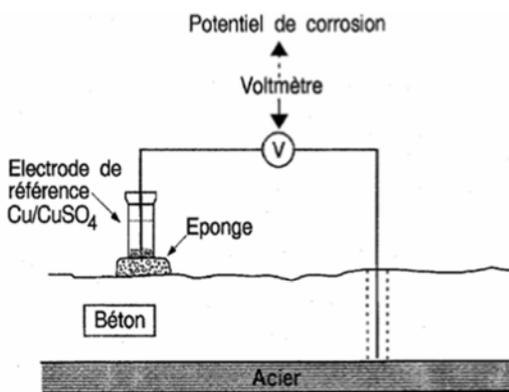


Figure 3

Tableau 2

Probabilité de corrosion p (%)	Potentiel de corrosion E_c (Volts)
P < 5	$E_c > -0.20$
P = 50	$-0.35 < E_c < -0.20$
P > 95	$E_c < -0.35$

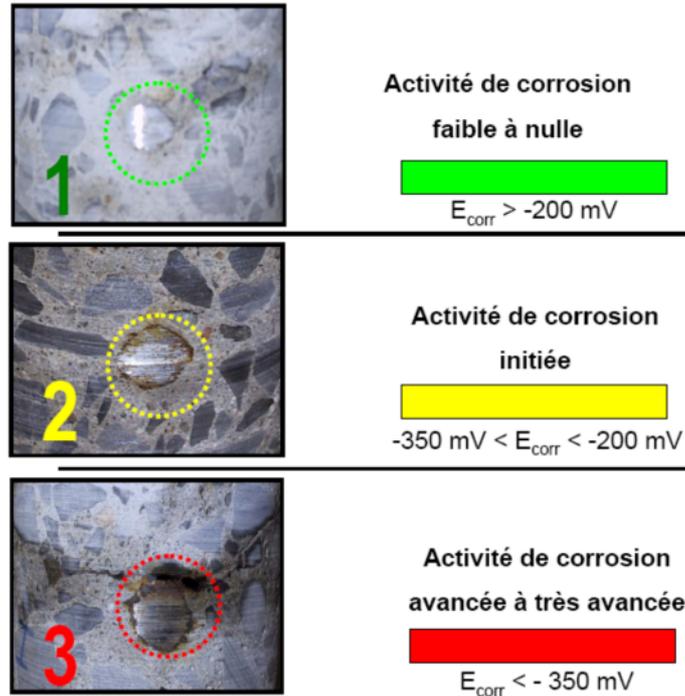


Figure 4

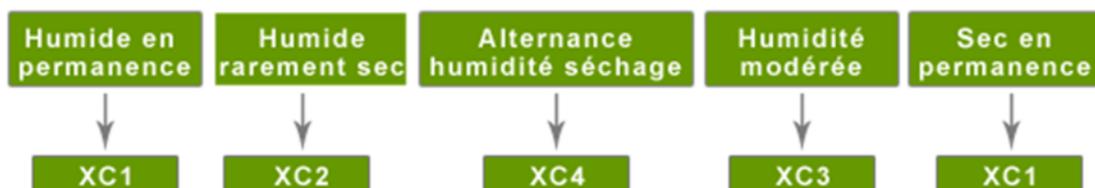
2.4 – Prévention de la corrosion

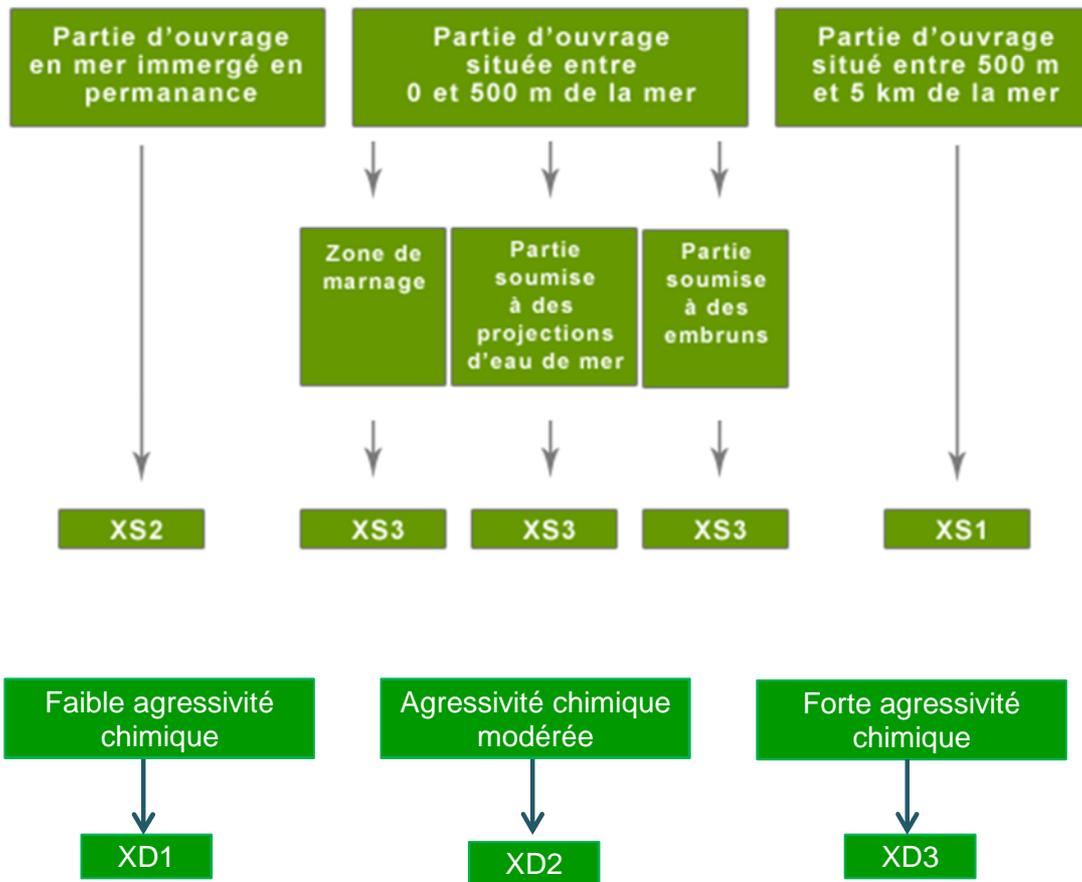
Tout ce qui peut contribuer à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de la dépassement par réduction de la cinétique de pénétration des agents agressifs (dioxyde de carbone et chlorures).

La prévention de la corrosion se fait normalement par le respect des recommandations portant essentiellement sur la qualité et l'épaisseur du béton d'enrobage. Toutefois, pour assurer la durabilité des armatures d'un béton soumis à des conditions sévères, des mesures supplémentaires peuvent être envisagées. Toutes ces mesures ont pour but de supprimer la pile galvanique.

Tableau 2 : classes d'exposition

	CLASSES D'EXPOSITION	
	XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
RISQUE DE CORROSION	XC	<u>Corrosion</u> induite par carbonatation
	XD	<u>Corrosion</u> induite par les chlorures ayant une origine autre que marine (sel de déverglaçage)
	XS	<u>Corrosion</u> induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
ATTAQUES	XF	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
	XA	Attaques chimiques





Chapitre 4 : BETONS EN MILIEU SULFATE

1. HISTORIQUE

L'action des sulfates sur les bétons est connue depuis longtemps. En 1887, CANDLOT avait constaté des désordres importants sur les mortiers des fortifications de Paris qui se trouvaient en contact avec les eaux gypseuses.

Ces désordres correspondaient à des phénomènes d'expansion consécutifs à la formation d'aiguilles d'ettringite. Ces cristallisations étaient localisées aux interfaces pâte-granat, dans les pores et dans les fissures.

2. GENERALITES

La réaction sulfatique correspond à l'action des sulfates (provenant du milieu extérieur ou présents dans le béton), sur les aluminates contenus dans la pâte de ciment. Cette action se traduit par la formation de gypse, puis d'**ettringite** (voire de thaumasite), qui présentent un caractère gonflant et conduisent à l'altération des caractéristiques mécaniques du béton.

On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Elles se différencient essentiellement par les conditions de leur formation :

- L'ettringite de formation primaire (a) qui ne provoque pas d'expansion,
- l'ettringite de formation secondaire (b) qui peut provoquer une expansion,
- l'ettringite de formation différée (c) consécutive à une élévation de température subie par le béton au cours de son histoire, qui peut aussi provoquer une expansion dans les bétons.

L'ettringite est un trisulfoaluminate de calcium hydraté de formule : $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$

L'attaque sulfatique ne se produit que lors d'un apport suffisant en sulfates. Ces sulfates, sous forme liquide ou gazeuse, proviennent souvent de pollutions industrielles ou urbaines. Ils peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire.

Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout sont organisées en un réseau de mailles, on parle de *faïençage* (fig. 1).

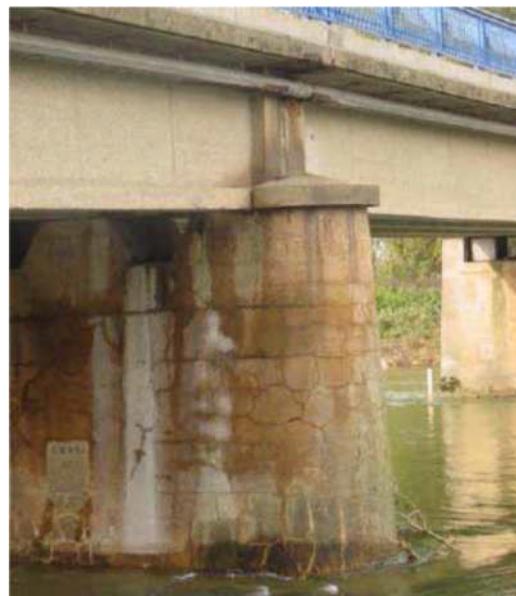


Figure 1

L'ettringite secondaire peut apparaître, au MEB, sous forme massive et mal cristallisée aux interfaces pâte – granulats ou sous forme de fines aiguilles de type «oursins» dans les pores ou les fissures (fig.2).

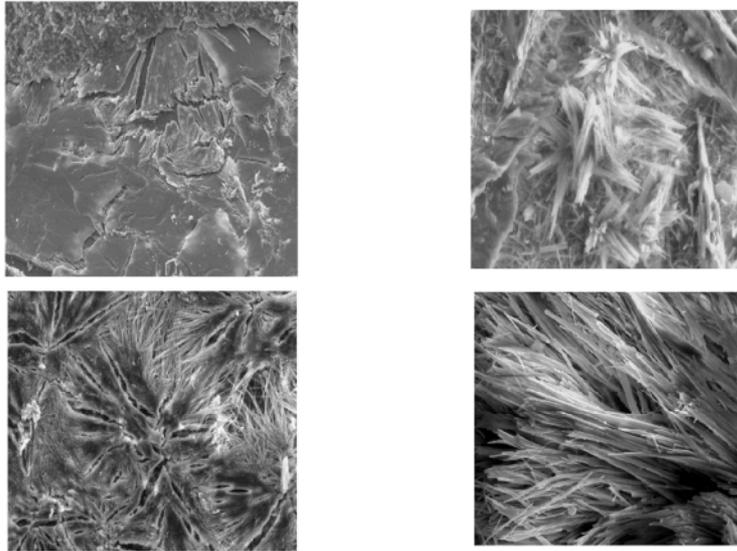


Figure 2

3. LES SOURCES DE SULFATES

L'ettringite est une réaction naturelle qui se produit à l'intérieur du béton, soit au moment de l'hydratation du ciment, soit de manière différée

Les sources des sulfates peuvent être internes ou externes (fig. 3).

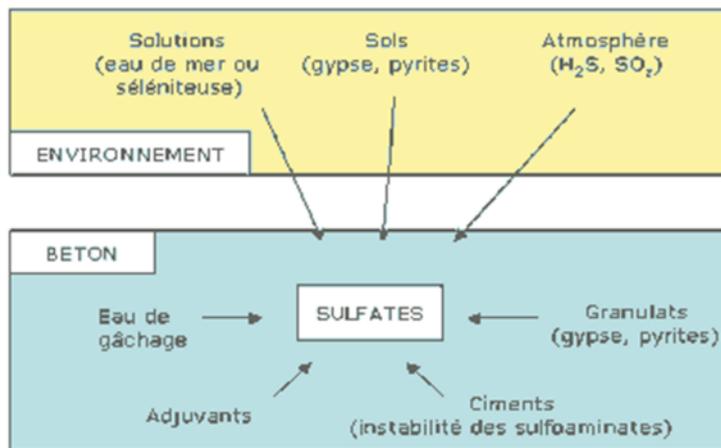


Figure 3

3.1 - Les sources externes

Dans le milieu extérieur au béton, les principales sources de sulfates sont :

- **Les sols**

Les sulfates constituent un élément nutritif des plantes. Leur concentration est généralement assez faible (entre 0.01 et 0.05 % du sol sec). Toutefois, dans certaines régions où le sous-sol peut contenir du gypse ou de l'anhydrite, les valeurs peuvent être bien plus élevées (supérieures à 5 %).

Les sols alluviaux et argileux sont également susceptibles de contenir des pyrites (FeS) qui peuvent s'oxyder en sulfates au contact de l'air et de l'humidité.

Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique au contact de l'air de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes, ...).

- **Les eaux souterraines séléniteuses**

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO_4^{2-} . La concentration en ions de l'eau va dépendre de la solubilité du sulfate qui dépend de la température et de la présence d'autres sels. Les sulfates présents sont souvent des sulfates alcalins ou de magnésium (les concentrations élevées en sulfates dans des eaux souterraines peuvent aussi être la conséquence de pollutions industrielles).

- **L'eau de mer**

L'eau de mer renferme des ions variés mais c'est l'action du sulfate de magnésium qui peut entraîner le plus de désordres d'origine chimique dans un béton.

3.2 - Les sources internes

A l'intérieur même du béton, les granulats peuvent fournir des sulfates. C'est essentiellement le cas des granulats contenant des pyrites (sulfures de fer) plus ou moins bien cristallisées qui peuvent s'oxyder, ou des granulats gypseux (la teneur en soufre total des granulats, exprimée en SO_3 , est limitée en France à 0.4 %).

Les sulfates peuvent être présents sur les granulats suite à une pollution accidentelle (déchets de plâtre par exemple).

Les sulfates peuvent provenir aussi de la phase liante dans le cas où la formation d'ettringite primaire a été empêchée (pièces étuvées ou massifs de bétons pour lesquels la température au moment de la prise a dépassé les 70°C).

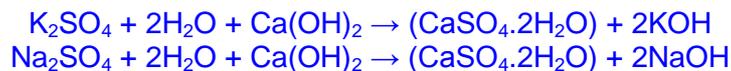
4. LES MECANISMES DE REACTION

4.1 - Sulfates provenant du milieu extérieur

Schématiquement, la formation de l'ettringite se produit en deux étapes :

a) *Formation de gypse secondaire*

Les sulfates peuvent pénétrer dans les pores du béton sous forme ionique. Ils réagissent dans la pâte de ciment avec la portlandite pour former du gypse, en solution aqueuse, et de l'hydroxyde alcalin. Le mécanisme est le suivant :



Le volume du solide précipité représente un peu plus du double de celui des produits de départ et une expansion peut se manifester.

b) *Formation d'ettringite secondaire*

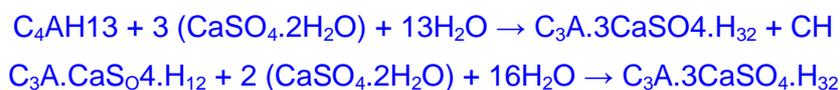
Ce gypse secondaire réagit avec les aluminates présents dans la pâte de ciment durcie pour former de l'ettringite secondaire. Plusieurs scénarios sont envisageables :

- à partir des reliquats de C_3A anhydre :



Le volume molaire du produit formé est trois fois plus élevé que celui du produit initial.

- à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}) ou du monosulfoaluminate de calcium hydraté ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$) :



Le volume molaire du produit formé peut atteindre **huit fois** celui du produit initial.

4.2 - Sulfates provenant des granulats

L'oxydation des pyrites mal cristallisées entraîne localement la formation d'acide sulfurique. Cet acide au contact de la pâte de ciment va réagir avec la portlandite pour former du gypse (gypse secondaire). Le gypse dissous peut ensuite réagir avec les aluminates du ciment présents dans la pâte (la réaction peut cependant être modifiée en présence d'argiles).

4.3 - Cas particulier du milieu marin

Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes.

• Action des chlorures

Les chlorures peuvent être à l'origine d'altérations du liant : le chlorure de magnésium ($MgCl_2$) réagit avec la portlandite pour former de la brucite ($Mg(OH)_2$), qui peut conduire à une expansion, et le chlorure de calcium ($CaCl_2$) réagit avec les aluminates pour former du monochloroaluminate (instable) puis de l'ettringite.

• Action du sulfate de magnésium

Il a une double action sur les bétons :

- formation d'ettringite expansive par réaction avec les aluminates ;
- formation de brucite par substitution $Mg^{2+}-Ca^{2+}$ dans la portlandite. Cette substitution s'effectue également dans les C-S-H qui se transforment progressivement en silicates de magnésium hydratés (M-S-H) sans propriétés liantes.

• Actions simultanées des différents ions

Les actions de chacun des ions présents ne sont pas cumulatives. En effet, par exemple, le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former de l'ettringite. Cette ettringite peut elle aussi se transformer, en présence de silice dissoute et de carbonates, en thaumasite, qui présente aussi un caractère gonflant.

4.4 - Cas particulier de l'ettringite différée

L'ettringite est instable aux températures supérieures à 70-90°C. C'est pourquoi dans de telles conditions de température qui peuvent se rencontrer lors des traitements par étuvage ou au cœur de pièces massives de béton, l'ettringite ne se forme pas ou se décompose. Le retour à la température ordinaire provoque la formation d'ettringite différée (Delayed Ettringite Formation ou DEF suivant la terminologie anglo-saxonne) pouvant avoir un caractère expansif (fig. 4).

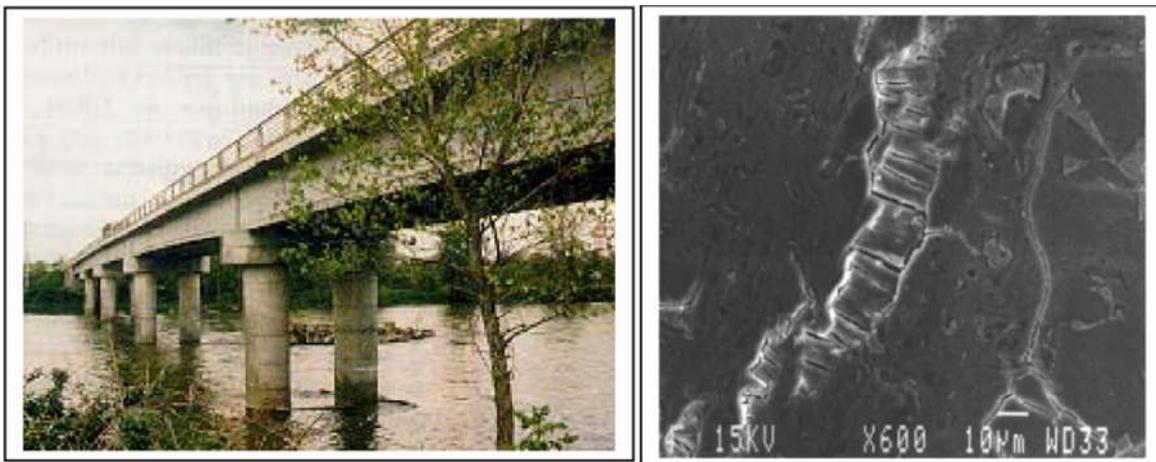


Figure 4

Indépendamment de la température, les conditions de formation de l'ettringite différée sont une humidité relative élevée, une teneur en SO_3 du ciment élevée ($\geq 4\%$) auxquelles on peut ajouter la teneur en alcalins dont dépend également la solubilité de l'ettringite (les teneurs élevées en oxydes alcalins favorisent la décomposition de l'ettringite et l'expansion différée). L'existence d'une réaction alcali-granulats est également susceptible d'accentuer l'expansion due à la formation d'ettringite différée : la consommation des alcalins par la réaction alcali-granulats conduit à une diminution de la solubilité du composé et facilite sa précipitation.

On considère que les sulfates, combinés dans un premier temps sous forme de monosulfoaluminates ou adsorbés par les C-S-H, réagissent avec des aluminates "libres" pour former une ettringite dite "différée", elle aussi expansive mais d'apparence amorphe. Cette ettringite différée peut se transformer ultérieurement en ettringite secondaire qui précipite dans les défauts de la structure.

5. MANIFESTATIONS EXTERNES ET DIAGNOSTIC

Dans la plupart des cas, en début de réaction, il est observé une fissuration de surface du béton de type polygonale. Cette fissuration accentuant la pénétration des sulfates, la réaction est accélérée. Cela conduit, de manière quasi irrémédiable, à une destruction du béton.

L'établissement du diagnostic peut se faire par observation au microscope électronique à balayage de carottes de bétons prélevées dans l'ouvrage (recherche de cristallisations d'ettringite secondaire).

La détermination de la teneur en sulfates des échantillons (dosage chimique), les caractéristiques du ciment et des granulats utilisés (microscopie optique et électronique) et l'analyse en sulfates des sols et eaux environnants l'ouvrage doivent permettre de préciser l'origine des sulfates (donnée est obligatoire avant d'envisager une réparation).

6. PARAMETRES CONDITIONNANT LA TENUE DES BETONS

6.1 - Sulfates venant de l'extérieur

Les dégradations ne sont à redouter dans un **environnement sulfatique** que si les sulfates peuvent accéder par diffusion jusqu'aux aluminates de calcium de la pâte de ciment hydraté.

Les précautions suivantes doivent permettre d'augmenter la durée de vie de ces bétons dans cet environnement agressif.

- Choisir un béton le moins perméable possible :
 - dosage en ciment suffisant ;
 - rapport Eau/Liant faible.
- Choisir un ciment à faible taux de C_3A :
 - Ciment HRS conforme à la norme NT 47.27 ;
 - un rapport $\text{C}_3\text{A}/\text{SO}_3$ inférieur ou égal à 3.
- Utiliser des additions minérales à caractère pouzzolanique.

6.2 - Sulfates internes

Actuellement, il suffit de limiter les apports de sulfates par les granulats, le liant, l'eau,....

6.3 - Ettringite différée (DEF)

Cette ettringite ne semblant se former que dans des bétons étuvés ou massifs (température

dépassant les 60°C lors de la prise) soumis à une forte humidité, il convient de :

- Pour les bétons étuvés :
 - limiter la température d'étuvage à 60°C ;
 - utiliser des additions pouzzolaniques.
- Pour les bétons massifs :
 - utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation ;
 - substituer une partie du ciment par des additions pouzzolaniques.

7. LES NORMALISATIONS ET RECOMMANDATIONS

La norme EN 206 définit trois classes correspondant aux degrés d'attaque chimiques - faible (XA1), modérée (XA2) et forte (XA3) - à partir de sept caractéristiques chimiques, lorsque l'attaque chimique s'effectue par des sols naturels, les eaux de surface ou l'eau de mer.



Valeurs limites pour les classes d'exposition en cas d'attaque chimique (XA1 : attaque faible, XA2 : attaque modérée, XA3 : attaque forte).

Élément en béton	XA1	XA2	XA3
SO ₄ ²⁻ mg/l dans l'eau	≥200 et ≤600	≥600 et ≤3000	>3000 et ≤6000
SO ₄ ²⁻ mg/kg dans le sol en général	≥2000 et ≤3000	>3000 et ≤12000	>12000 et ≤24000
pH de l'eau	≤ 6.5 et ≥ 5.5	< 5.5 et ≥ 4.5	< 4.5 et ≥ 4.0
Degré d'acidité du sol	20 °C Baumann-Gully		
CO ₂ mg/l dissolution de calcaire dans l'eau	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100
NH ₄ ⁺ mg/l dans l'eau	≥ 15 et < 30	≥ 30 et < 60	≥ 60 et < 100
Mg ²⁺ mg/l dans l'eau	≥ 300 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000 jusqu'à saturation

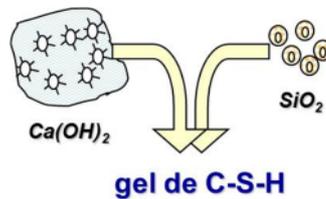
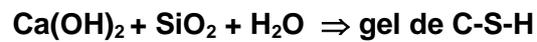
Classe d'exposition	Environnement avec substances chimiques agressives		
	XA1	XA2	XA3
E/C maxi	0.55	0.50	0.45
Classe de résistance minimale	30/37	30/37	35/45
Dosage mini en ciment (kg/m ³)	300	320	360
Autres prescriptions	Ciments résistants aux sulfates		

REACTION AVEC LES SULFATES : moyens préventifs

- La fumée de silice (5 à 10%) permet la fixation de la portlandite et améliore la perméabilité
- Les ciments plus de 40% (CLK ou CHF) de laitier ont une bonne résistance aux sulfates car ils libèrent moins de portlandite
- Béton de qualité de classe minimale 30/35 et un fort dosage en ciment HRS
- Un faible rapport E/C, une bonne formulation et une bonne mise en œuvre garantissent une faible porosité → Meilleure résistance aux sulfates
- Pour les milieux très agressifs (exposition très sévère), utiliser un ciment de classe 42.5

FUMEE DE SILICE : Modes d'action

- Augmentation de la compacité en remplissant les pores capillaires vue l'extrême finesse de la poudre: 100 000 grains de silice micronique pour recouvrir un grain de ciment
- Réagir avec la portlandite pour donner de nouveaux gels de C-S-H



Chapitre 5 : L'ALCALI REACTION

1. HISTORIQUE

Le premier cas d'expansion lié à l'alcali-réaction a été identifié par STANTON dans un barrage californien aux Etats Unis en 1940. Le problème est reconnu dans presque tous les pays du monde mais son importance reste fort variable d'un pays à l'autre.

Les **réactions alcali-granulat** (RAG) constituent une famille de réactions dans le béton entre les ions alcalins contenus dans les pores du ciment et les granulats.

Elles conduisent à l'attaque des agrégats et à la formation de gels hydrophiles. Cette attaque se traduit par une diminution des propriétés mécaniques du béton (résistance à la compression, à la flexion, modification du module d'Young) et par un gonflement caractéristique.

2. MECANISMES DES REACTIONS

Les réactions alcali-granulat (RAG) constituent une famille de réactions dans le béton entre les ions alcalins contenus dans les pores du ciment et les granulats.

Elles conduisent à l'attaque des agrégats et à la formation de gels hydrophiles. Cette attaque se traduit par une diminution des propriétés mécaniques du béton (résistance à la compression, à la flexion, modification du module d'Young) et par un gonflement caractéristique.

Cette réaction n'advient que si trois conditions sont remplies (fig. 1) :

- les granulats sont réactifs,
- il y a suffisamment d'alcalins (Na_2O , K_2O),
- il y a suffisamment d'eau pour permettre le transport des ions.

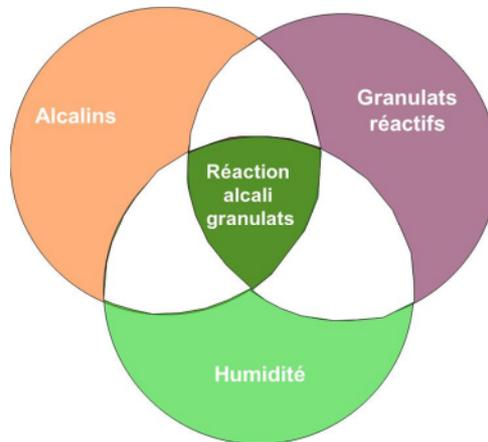


Figure 1

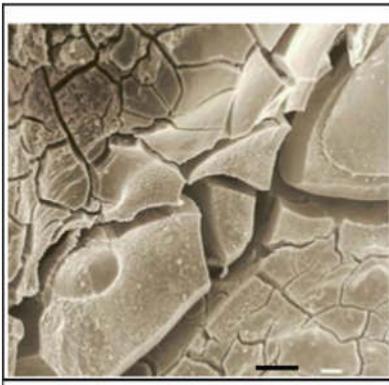
La pathologie et les manifestations externes se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants (fig. 2 et 3):

- une fissuration,
- un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures,
- des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels translucides,
- des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement,

- des mouvements et déformations,
- des colorations ou décolorations.



Figure 2



MEB : Gel craquelé silico-calco-alcalin dans un béton dégradé par la réaction alcali-silice (les craquelures sont dues principalement à la dessiccation du gel)

Figure 3

La norme XP P 18-540 classe conventionnellement les granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction :

- soit comme non réactifs (NR) ;
- soit comme potentiellement réactifs (PR) ;
- soit comme Potentiellement Réactif à effet de Pessimum (PRP).

La dénomination NR : s'applique à des granulats pour bétons hydrauliques qui, quelles que soient leurs conditions d'utilisation, ne conduiront pas à des désordres par alcali-réaction.

La dénomination PR : s'applique à des granulats susceptibles, dans certaines conditions, de conduire à des désordres par alcali-réaction.

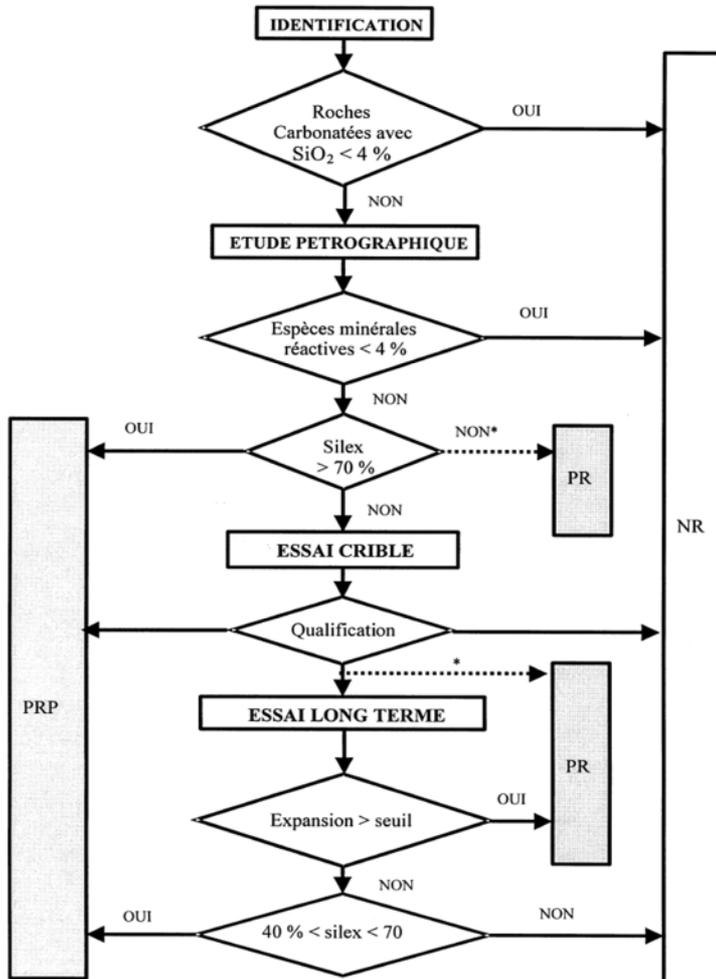
La dénomination PRP : s'applique à des granulats qui, bien que riches en silice réactive, peuvent être mis en œuvre sans risque de désordres si leur utilisation satisfait aux conditions décrites dans le document «Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction»

L'opération de qualification doit être conduite de manière à conclure quant à la réactivité d'un granulats ou d'un mélange granulaire vis à vis des alcalins.

La démarche demande avant toute autre opération que soit réalisée une identification puis une étude pétrographique des matériaux étudiés.

L'attention est attirée sur l'importance de la représentativité de l'échantillon pour que l'opération de qualification puisse s'appliquer au lot à qualifier.

Suivant les informations recueillies, la qualification pourra être obtenue directement, ou en mettant en œuvre l'essai crible, ou en ayant recours à l'essai long terme.



Source : FD P 18-542

Il existe trois types d'alcali-réaction (selon les phases réactives) :

- **les réactions de type alcali-silice** : certains minéraux du groupe de la silice (silice amorphe ou micro-cristalline) se retrouvent en déséquilibre thermodynamique par rapport au gisement (problème lié au pH élevé du béton) et peuvent réagir avec les alcalins.
- **les réactions de type alcali-silicates** : elles se produisent en présence de granulats polyphasés complexes, métamorphiques, sédimentaires ou ignées. Ce type de réaction ne formerait pas ou peu de gels siliceux mais provoquerait plutôt l'exfoliation et l'expansion de certains minéraux phylliteux.
- **les réactions de type alcali-carbonates (dédolomitisation)** : elles sont dues à la décomposition de cristaux de dolomite disséminés dans certains granulats calcaires et aux pressions exercées par l'exfoliation ultérieure de minéraux argileux qui sont à proximité de ces cristaux de dolomite (et aussi aux pressions de cristallisation de la brucite et de la calcite particulièrement aux interfaces pâte – granulats).

3. PARAMETRES DES REACTIONS

Trois paramètres fondamentaux conditionnent les réactions alcali-silice :

- **une teneur critique en minéraux réactifs** (silice amorphe ou mal cristallisée, quartz

déformés, microquartz, tridymite, cristobalite et opale)

- **une teneur en alcalins suffisante** dans le béton, apportée par le ciment (0,1 à 1,4%), les granulats (feldspaths, micas), les adjuvants (jusqu'à 2% dans certains naphthalènes et mélamines sulfonés) mais aussi l'extérieur (sels fondants, eau de mer). Les recommandations (LCPC ; 1994) limitent à 3.5 kg/m^3 de Na_2O équivalent la teneur maximale en oxydes alcalins dans les bétons contenant des granulats potentiellement réactifs ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$).
- **une humidité relative ambiante suffisante** (supérieure à 85%).
- **la température** : aux environs de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, les réactions sont très fortement accélérées.
- **les cycles d'humidification-dessiccation** (gel-dégel, zones de marnage, variations saisonnières), accélèrent les réactions.
- **le temps** : la fissuration du béton peut apparaître entre 5 et 40 ans.

Chapitre 6 – AUTRES SOURCES DE PATHOLOGIES

Sans eau, pas de béton. L'eau est le catalyseur de la prise du béton, mais son excès détériore les qualités et la durabilité du béton. Le Lerm* explique le rapport être qui existe entre l'eau, le ciment et le béton.

Laboratoire **MATIÈRE** de la

Pathologie Le béton et l'eau

L'eau est un constituant indispensable à la confection des mortiers et bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

1 > Quel est le rôle de l'eau dans la fabrication du béton ?

Le clinker, constituant de base des ciments contemporains, correspond à une poudre composée par des phases minérales anhydres (silicates de calcium C_2S/C_3S , aluminat tricalcique C_3A et aluminoferrite tétracalcique C_4AF) issues de la cuisson d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argiles. Les types de ciments définis par la norme NF EN 197-1 sont constitués par des proportions variables de clinker, d'additions minérales (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, fumées de silice, filler...) et de régulateur de prise (sulfates de calcium). Le mélange de ciment et d'eau conduit à la prise et au durcissement par formation de constituants hydratés (silicates de calcium hydratés C-S-H, portlandite, aluminates et sulfo-aluminates de calcium hydratés).

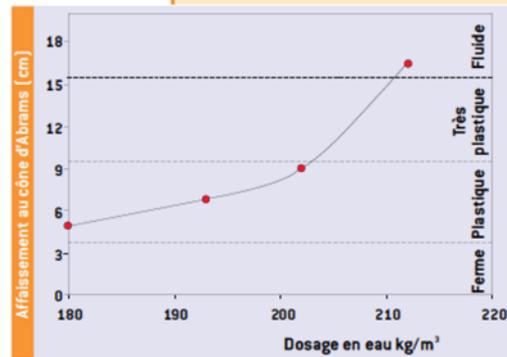
À l'état frais, la quantité d'eau dans le mélange (ciment - granulat - eau) conditionne entre autres la maniabilité et l'ouvrabilité du béton. Ainsi, pour des dosages en ciment et en granulats constants, la maniabilité et l'ouvrabilité seront d'autant plus facilitées que le dosage en eau sera important. Mais, à partir d'un seuil de dosage en eau, variable en fonction des formulations, les risques de ségrégation et de ressuage sont importants.

À l'état durci, de nombreux paramètres, notamment pris en compte dans les critères de durabilité, sont influencés par la quantité d'eau de gâchage incorporée lors de la mise en œuvre du béton : résistances mécaniques, porosités, perméabilités, coefficients de diffusion, etc. Pour des dosages en ciment et en granulats constants, les caractéristiques du béton seront d'autant plus performantes que le dosage en eau sera faible.

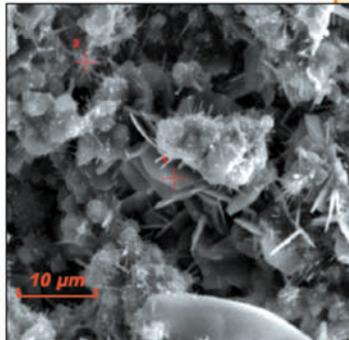
La mise au point d'une formulation de béton consiste donc à trouver le meilleur compromis, en fonction du contexte, entre les caractéristiques souhaitées du matériau à l'état frais, et les critères imposés à l'état durci. Le paramètre de formulation pris en compte pour parvenir à cet objectif est le rapport $Eau_{efficace} / Liant_{équivalent}$.

2 > Comment limiter l'apport en eau pour augmenter les performances des bétons ?

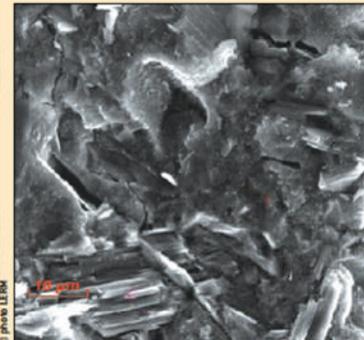
La quantité d'eau de gâchage étant un des paramètres essentiels agissant sur les caractéristiques des bétons à l'état frais et à l'état durci, l'industrie chimique s'est intéressée à la possibilité de mettre au point des adjuvants permettant de faciliter la mise en œuvre des bétons, leur résistance et leur durabilité. En France, ces adjuvants (plastifiants et superplastifiants) sont apparus dans les années 1970, mais se sont



Exemple d'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en eau pour un même dosage en ciment (d'après Meusel et Rose, 1983)



Détail de la microstructure d'un béton poreux à rapport pondéral $Eau_{efficace} / Liant_{équivalent}$ élevé



Détail de la microstructure d'un béton compact à faible rapport pondéral $Eau_{efficace} / Liant_{équivalent}$

Effets des plastifiants et superplastifiants

Plastifiants - réducteurs d'eau

Valeurs données par rapport à un témoin non adjuvanté

- Réduction du dosage en eau : $\geq 5 \%$
- Résistance à la compression à 7 et 28 j : $\geq 110 \%$

Superplastifiants - haut réducteur d'eau

Valeurs données par rapport à un témoin non adjuvanté et à consistance constante

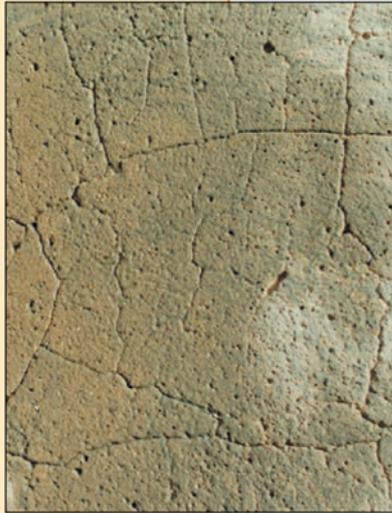
- Réduction du dosage en eau : $\geq 12 \%$
- Résistance à la compression à 1 j : $\geq 140 \%$
- Résistance à la compression à 28 j : $\geq 115 \%$

Valeurs données par rapport à un témoin non adjuvanté et à dosage en eau constant

- Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams à partir d'une valeur initiale de 30 +/- 10 mm : $\geq 120 \text{ mm}$
- Affaissement au cône d'Abrams après 30 mn : $\geq 20 \text{ mm}$

Source - "Les Bétons : bases et données pour leur formulation" (Éditions Eyrolles)

Le béton et l'eau



Parement fissuré par un phénomène de retrait accentué par un excès d'eau de gâchage

développés lentement en raison d'un manque de recul et de reconnaissance officielle. Ces produits sont des dispersants qui déflocculent les grains fins (ciment, addition minérale, filler, fraction fine des sables) et peuvent également développer des effets retardateurs ou accélérateurs de prise. Ils se présentent sous forme liquide ou solide (poudre), et sont incorporés dans l'eau de gâchage ou à la fin du malaxage. Leur plage d'utilisation, comprise entre 0,2 % et 3 % du poids de ciment, permet d'optimiser la quantité d'eau de gâchage et les résistances mécaniques [voir tableau].

Il est par exemple possible de réaliser des bétons très fluides de classe de résistance B 80 à B 100 avec des rapports $E_{u, efficace} / Liant_{équivalent}$ de l'ordre de 0,30 à 0,35. Comparativement, un béton courant C 25/30 à C 30/37 est formulé avec des rapports pondéraux $E_{u, efficace} / Liant_{équivalent}$ compris entre 0,5 et 0,6.

3 > Quelles peuvent être les conséquences d'ajouts d'eau non maîtrisés ?

Les ajouts d'eau non maîtrisés peuvent se produire au cours de bétonnage par temps chaud, de délais de livraison ou de mise en œuvre accrue. Dans tous les cas, ces ajouts d'eau ont pour but de

compenser une perte de maniabilité et d'ouvrabilité.

Les conséquences d'ajouts d'eau non maîtrisés (sur chantier ou en centrale à béton) sont les suivantes :

- a • une diminution des performances mécaniques du béton ;
- b • une augmentation de sa porosité concomitante avec une augmentation de ses propriétés de transfert (perméabilité, diffusivité, etc.) ;
- c • par voie de conséquence, une diminution de sa durabilité par augmentation des cinétiques de pénétration du CO_2 atmosphérique (risques de corrosion par carbonatation), des chlorures (risques de corrosion par action des chlorures), des sulfates et des alcalins (risques de réactions endogènes nécessitant un apport externe d'humidité) ;
- d • augmentation des phénomènes de retrait ;
- e • diminution de la résistance aux cycles gel/dégel ;
- f • risques de ségrégation et de ressuage.

4 > Que dit la réglementation ?

En France, la réglementation applicable en matière de formulation de bétons est la norme NF EN 206-1 qui tient compte des expériences européennes, mais qui reste attachée à la connaissance française du béton par l'intermédiaire de son annexe nationale. Cette norme fixe les règles précises concernant la spécification, la production, la livraison et le contrôle de la conformité des bétons.

Elle donne des classes de consistance pour le béton à l'état frais, et fixe la quantité d'eau maximale de gâchage en fonction de la classe d'expositions du béton, par l'intermédiaire du rapport pondéral $E_{u, efficace} / Liant_{équivalent}$. Par exemple [voir article "Normes & Règles dans ce même numéro], pour un béton devant être mis en œuvre pour une classe d'expositions XS 1 (béton exposé à un air véhiculant du sel marin) où un des principaux risques est l'amorçage de la corrosion par les chlorures, la limite supérieure du rapport pondéral $E_{u, efficace} / Liant_{équivalent}$ est fixée à 0,55.

Cette norme interdit tous les apports d'eau non maîtrisés, mais elle autorise en revanche une tolérance sur le dosage du ciment, de l'eau, des granulats, des additions minérales et des adjuvants. Pour la quantité d'eau de gâchage, cette tolérance est de +/- 3 % par rapport au dosage requis.

Pour faire face à d'éventuels problèmes de bétonnage par temps chaud, des formulations dérivées peuvent être utilisées en faisant varier le dosage des constituants dans une plage généralement comprise entre 5 et 10 % par rapport aux dosages de la formulation nominale. Dans tous les cas, ces formulations dérivées doivent, comme la formulation nominale, faire l'objet d'épreuves d'étude et de convenance afin de s'assurer qu'elles répondent bien au cahier des charges demandé.

Christophe Carde – Directeur Technique du LERM*

*En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons.



Phénomène de ségrégation lié à un excès d'eau de gâchage associé à une vibration excessive

La lixiviation correspond à un "lessivage" des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides, acides en comparaison du béton. Christophe Carde, directeur technique du LERM nous en explique les mécanismes.

Connaissances fondamentales

La lixiviation

1 > Qu'est ce que la lixiviation des bétons ?

Le phénomène de lixiviation des bétons correspond dans les grandes lignes à un lessivage des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides. Les constituants hydratés de la pâte de ciment des bétons forment un milieu basique, le pH de leur solution interstitielle étant de l'ordre de 13. Dans ces conditions, la majorité des milieux fluides présente un caractère acide vis-à-vis du béton, entraînant ainsi des déséquilibres chimiques susceptibles d'aboutir notamment à une mise en solution des hydrates. Les milieux, naturels ou pas, pouvant conduire à des phénomènes de lixiviation correspondent aux eaux pures, aux eaux douces, aux pluies acides, et aux milieux plus franchement acides (acides minéraux et organiques, eaux résiduares). Le pouvoir lixiviant d'un milieu est proportionnel à son acidité vis-à-vis du béton.

Les recherches conduites sur ce sujet au cours des deux dernières décennies concernaient essentiellement la durabilité des bétons constitutifs des conteneurs de déchets radioactifs pouvant, au cours de leur histoire, être soumis au ruissellement des eaux de pluie et d'infiltration.

2 > Quelles sont les mécanismes de la lixiviation ?

La dégradation des bétons par action d'un milieu fluide peut mettre en jeu :

- des phénomènes mécaniques liés à l'action érosive de leur circulation sur le béton,
- des phénomènes physiques permettant le transport des espèces ioniques sous l'effet de gradients de concentration (diffusion) ou de pression (perméation),
- des phénomènes chimiques liés à des variations de concentration engendrant des sursaturations ou des sous saturations conduisant à des dissolutions ou à des précipitations.

Le phénomène de lixiviation ne constitue donc qu'une composante de la dégradation des bétons par les milieux fluides. Il apparaît néanmoins délicat de dissocier de la lixiviation, la précipitation éventuelle de composés potentiellement expansifs, ces derniers constituant souvent une conséquence de la lixiviation.

La lixiviation des bétons sous l'action de milieux fluides à caractère "acide", conduit à une dissolution progressive des constituants de la pâte de ciment. La portlandite $[Ca(OH)_2]$ est préférentiellement mise en solution car, parmi les différents constituants hydratés de la pâte de ciment, c'est elle qui présente la solubilité la plus importante pour des températures ordinaires. Après dissolution de la portlandite, les autres hydrates tels que les aluminates de calcium, le monosulfo-aluminate de calcium hydraté, l'ettringite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H) font l'objet, à leur tour, d'une dissolution progressive. Ceci entraîne la formation de zones à minéralogie constante délimitées par des fronts de dissolution (fig. 2 et 3).

Comme déjà précisé, il apparaît délicat de dissocier de la lixiviation, la précipitation de composés potentiellement expansifs. Par exemple, dans le cas d'une lixiviation de la pâte de ciment par une eau faiblement minéralisée, la dissolution du monosulfo-aluminate de calcium hydraté et de l'ettringite permet de remobiliser des sulfates susceptibles de précipiter sous forme expansive, plus à cœur du matériau. De la même façon, l'attaque d'un béton par de l'acide sulfurique conduit à une lixiviation des constituants de la pâte de ciment et à la formation de composés sulfatiques expansifs. Pour un même béton et un même ciment, la cinétique de dégradation par les phénomènes de lixiviation peut être extrêmement variable en fonction de la nature du milieu fluide considéré, et en particulier du pH (la cinétique étant d'autant plus rapide que le pH est faible). Cette cinétique, gouvernée par des lois de diffusion, évolue en racine carrée du temps. Par ailleurs, dans le cas des eaux naturelles, l'agressivité est dépendante de la dureté et de la teneur en dioxyde de carbone agressif.

Bien que les cinétiques de dégradation puissent être rapides dans le cas d'attaques acides ou par des solutions salines souvent associées à l'usage intensif d'engrais (nitrate d'ammonium par exemple), la cinétique d'attaque des bétons par les eaux naturelles (eaux pures ou eaux douces) reste en comparaison très faible. A titre indicatif, des essais réalisés en laboratoire avec un maintien constant du pH montrent que la cinétique de dégradation avec une eau à pH 4,5 est 100 fois plus lente que celle obtenue avec une solution d'ammonium fortement concentrée.



La lixiviation touche souvent les ouvrages hydrauliques. Construction d'une conduite d'amenée des eaux usées dans une station d'épuration.

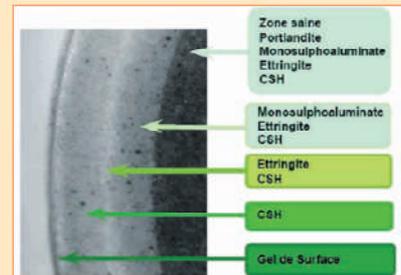


Fig. 2 Zones à minéralogie constante.

Fig. 3 Mesure de la profondeur d'altération par cartographie EDS de répartition élémentaire.

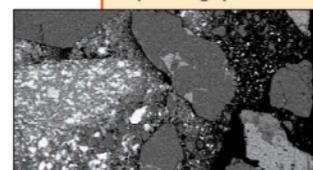
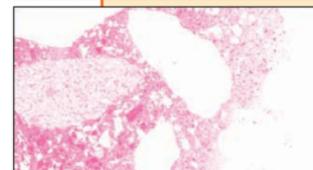


Image analysée (MEB en électrons rétrodiffusés)



Carte de répartition du calcium (teneur proportionnelle à l'intensité de la couleur)



Carte de répartition du soufre (teneur proportionnelle à l'intensité de la couleur)

3 > Quelles sont les conséquences de la lixiviation ?

Les conséquences de l'attaque des bétons par des eaux pures, des eaux douces ou des solutions acides, peut conduire à une augmentation de la porosité due à la lixiviation des hydrates de la pâte de ciment, éventuellement associée au développement d'une microfissuration en relation, le cas échéant, avec la formation de composés expansifs tels que l'ettringite secondaire par exemple. Cette modification de la microstructure des bétons entraîne donc une modification des performances mécaniques dans la zone d'interaction entre le milieu agressif et le béton, par rapport aux caractéristiques d'origine du matériau : diminution des résistances à la compression et à la traction, diminution du module de Young, augmentation du fluage. A titre d'exemple, des essais réalisés en laboratoire sur des pâtes de ciment, des mortiers ou des bétons, au cours de différents travaux de doctorat, montrent, pour des mélanges à base de ciment de type CEM I, des pertes de résistances à la compression de l'ordre de 70 à 80 % (fig. 4 et 5), associées à une diminution du module de Young de l'ordre de 60 à 70 % et à une augmentation de la porosité d'environ 50 % en relatif. Dans le cas de mélanges à base de ciments renfermant des additions minérales, la diminution des performances mécaniques et l'augmentation de la porosité, bien que significatives, sont plus limitées. Cette différence met en évidence l'importance de la quantité de portlandite dans le matériau, cette dernière correspondant à l'hydrate le plus soluble dont la lixiviation crée une porosité de dimension plus importante que celle liée à la décalcification des C-S-H.

[©Ngunen, 2005]

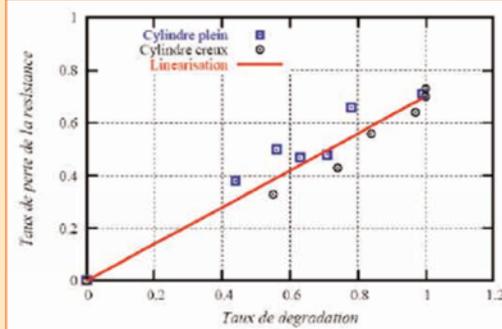
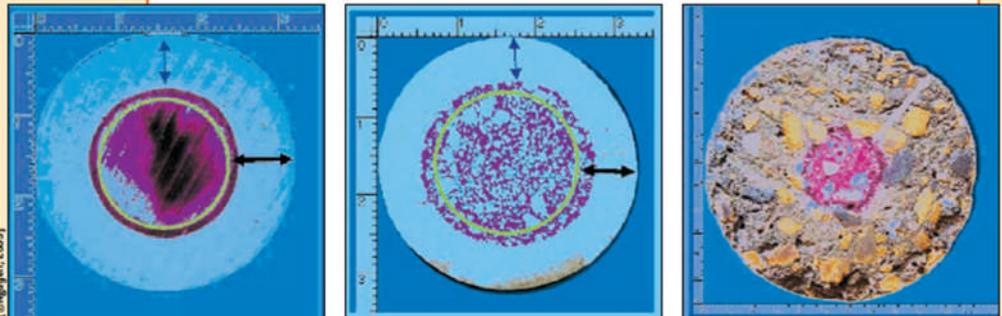


Fig. 4 Perte de résistance à la compression en fonction du taux de dégradation

Fig. 5 Vue d'éprouvettes de pâte de ciment, de mortier et de béton dégradées par une solution de nitrate d'ammonium.



[©Ngunen, 2005]



Ouvrage hydraulique urbain altéré par lixiviation.

[©Pereviano]

4 > Comment limiter les phénomènes de lixiviation dans les bétons ?

La résistance des bétons vis-à-vis des attaques par les eaux pures, les eaux douces ou les solutions acides peut être optimisée en suivant les règles de formulation définies par la norme NF EN 206-1, en considérant les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 définissant les environnements chimiquement agressifs sur la base de critères tels que le pH, les teneurs en sulfates, en dioxyde de carbone agressif, en ammonium et en magnésium.

Par ailleurs, l'utilisation de ciments renfermant des teneurs significatives en additions minérales, tels que les CEM III ou CEM V, permet d'accroître la résistance chimique des bétons, car leur hydratation forme peu de portlandite.

Enfin, dans le cas des environnements chimiques les plus sévères, la mise en œuvre d'un revêtement de surface étanche permet également de préserver l'intégrité du béton.

5 > Que faire lorsque les phénomènes de lixiviation sont avérés ?

En premier lieu, les bétons suspectés d'être affectés par une attaque chimique conduisant à des phénomènes de lixiviation éventuellement associés à la précipitation de composés expansifs, doivent faire l'objet d'un diagnostic par un laboratoire spécialisé. Ce diagnostic doit entre autres

permettre de préciser les réactions chimiques mises en jeu et les profondeurs d'altération des bétons. A partir de ce diagnostic, et dans la mesure où ces altérations progressent de la surface des parements vers le cœur des pièces en béton, les ouvrages peuvent être réparés de façon traditionnelle par purge du béton altéré, mise en œuvre d'un produit de réparation adapté, éventuellement complété par une protection de surface.

Christophe Carde

Directeur technique du LERM¹
Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

¹En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons. Les phénomènes de lixiviation font partie des pathologies étudiées et maîtrisées par le laboratoire.

Aspect d'une surface en béton ayant été soumise au phénomène de lixiviation.



La principale conséquence visible du retrait est la fissuration. Il existe plusieurs sortes de retraits. Le Lerm* dresse le portrait des mécanismes de cette pathologie particulière.

Pathologie

Le retrait des bétons

La durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint est fortement dépendante de la qualité du béton, et en particulier de la zone d'enrobage. C'est en effet au travers de la porosité que peuvent migrer des agents agressifs (sulfates, chlorures, CO₂, etc.) susceptibles d'interagir avec les constituants du ciment et de provoquer l'apparition de désordres. Néanmoins, la compacité des bétons ne peut, à elle seule, être garante de la bonne tenue dans le temps. En effet, la manifestation de phénomènes de fissuration ouverte dans la zone d'enrobage peut augmenter les propriétés de transfert des bétons, aussi compacts soient-ils, et ainsi nuire à leur durabilité. Dans cette optique, la maîtrise de la fissuration précoce des bétons, liée aux phénomènes de retrait, apparaît essentielle.

1 > Qu'est-ce que le retrait ?

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

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

a - Le retrait de plastique est en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures par exemple (fig. 1). Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

b - Le retrait de dessiccation est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte (fig. 2 et 3) est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

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

d - Le retrait d'auto-dessiccation est lié à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires.

Ces quatre types de retrait peuvent se cumuler à l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Enfin, le retrait d'auto-dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la périphérie des éléments en béton.

Il existe un cinquième type de retrait, le retrait de carbonatation, pour lequel n'existe que peu de données expérimentales à l'heure actuelle. Ce retrait est lié aux réactions de carbonatation des constituants du ciment.



Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Sa conséquence visible est l'apparition de fissures.

Fig. 1 • Représentation schématique du retrait de ressage.

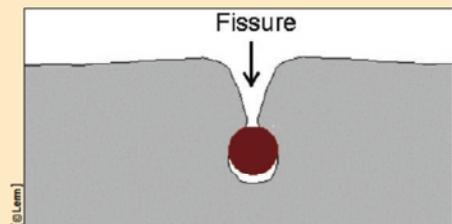


Fig. 2 • Retrait plastique à la surface d'une dalle en béton armé.



Fig. 3 - Ouverture importante des fissures de retrait.

Le retrait des bétons

Conséquence de la fissuration sur la durabilité des bétons armés

(les zones carbonatées sont incolores, et les zones non carbonatées sont roses).



Fig. 4 • Profondeur de carbonatation hors fissure.

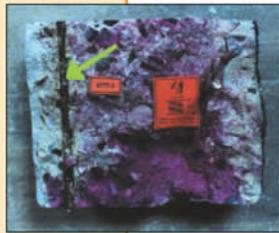


Fig 5 et 6 • Carbonatation le long des fissures avec armatures corrodées (soulignées par les flèches vertes).

2 > Quelles sont les conséquences du retrait ?

Dans tous les cas, la conséquence essentielle du retrait est l'apparition de phénomènes de fissuration (fig. 2) 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 rapporté en surface (revêtement par exemple) et le support en béton.

Les conséquences de la fissuration sur la durabilité des structures en béton sont dues à l'augmentation de la cinétique de pénétration des agents agressifs présents dans le milieu environnant, au travers des fissures ouvertes sur les parements. La figure 3 montre ainsi l'impact que peut avoir une fissuration ouverte de surface sur un voile en béton armé affecté par un

phénomène de retrait plastique. En dehors de la fissure, la profondeur de carbonatation, liée à la diffusion du CO₂ atmosphérique dans le béton, est limitée à quelques millimètres sur les deux faces, et aucun désordre n'est observé. En revanche, le phénomène de carbonatation est accéléré le long des fissures traversantes, entraînant ainsi la corrosion des armatures recoupées par les fissures.

3 > Comment éviter, réduire ou contrôler le retrait ?

Dans la mesure où la fissuration de retrait est due à des mécanismes différents en fonction du type de retrait, les mesures préventives à considérer sont différentes. Il convient donc, en premier, d'identifier le ou les types de retraites susceptibles de se manifester pour un ouvrage donné. La limitation des effets liés au retrait de ressuage peut être obtenue en optimisant la formulation des bétons, en terme de dosages en ciment, de dosage en éléments fins et de dimension maximale des granulats, ainsi qu'en maîtrisant la quantité d'eau de gâchage afin de limiter le ressuage. Dans cette optique, l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau, ainsi qu'une étude soignée des plans de ferrailage et de la géométrie des pièces, constituent des solutions préventives indispensables.

La prévention des effets liés au retrait thermique est obtenue en limitant la dessiccation du béton, c'est-à-dire l'évaporation de l'eau avant et pendant le durcissement. Dans cette optique, la mise en place d'une cure du béton, dans le cas où les risques d'évaporation sont optimaux (températures ambiantes élevées, vent), permet de réduire la dessiccation. Les procédés de cure peuvent correspondre à une humidification régulière du parement, à la mise en place d'une feuille de polyane, ou encore à l'utilisation de produits de cure. La maîtrise de l'humidité des granulats et des coffrages, l'utilisation de fibres, ainsi que l'utilisation de quantités d'eau de gâchage peu élevées (emploi d'adjuvants réducteurs d'eau) permettent aussi de réduire la fissuration associée au retrait plastique.

La limitation des effets liés au retrait thermique peut être obtenue en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels que définis par la norme NF EN 197-3. Une protection de la surface des parements afin de limiter les risques de dessiccation accentués par l'élévation de la température de la masse du béton, constitue une mesure préventive complémentaire efficace. Enfin, la fissuration due au retrait d'auto-dessiccation peut être limitée en prenant en compte, dans le calcul, les contraintes engendrées, et en les maîtrisant par l'ajout d'armatures passives ou de précontrainte.

La limitation des effets liés au retrait thermique peut être obtenue en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels que définis par la norme NF EN 197-3. Une protection de la surface des parements afin de limiter les risques de dessiccation accentués par l'élévation de la température de la masse du béton, constitue une mesure préventive complémentaire efficace. Enfin, la fissuration due au retrait d'auto-dessiccation peut être limitée en prenant en compte, dans le calcul, les contraintes engendrées, et en les maîtrisant par l'ajout d'armatures passives ou de précontrainte.

4 > Que faire lorsque le retrait est avéré ?

Lorsqu'une fissuration de retrait est avérée sur un ouvrage, il est essentiel de vérifier que le phénomène est stabilisé, sous peine de réaliser des réparations peu durables.

La réparation des désordres liés au retrait, lorsqu'elle est possible, correspond à un colmatage des fissures à l'aide de produits spécifiques dont certains peuvent présenter une élasticité permettant de reprendre, dans une certaine mesure, les déformations liées à la poursuite du phénomène s'il n'est pas complètement stabilisé.

Christophe Carde, directeur technique du LERM

La mise en place d'une cure du béton permet de réduire la dessiccation.



[© Cemex]

La réparation des désordres liés au retrait correspond à un colmatage des fissures à l'aide de produits spécifiques.



[© Weber & Broutin]

Chapitre 7 - ANALYSES DES PATHOLOGIES

1. DEMARCHE DIAGNOSTIC

Pour connaître le mieux possible la (les) pathologie (s) à l'origine des dégradations d'ouvrages, c'est-à-dire pour établir un diagnostic sûr et fiable, il convient de suivre une méthodologie précise, aussi bien lors des observations et prélèvements sur site que lors des analyses au laboratoire.

Démarche générale

La démarche proposée comporte une «Fiche diagnostic» décrivant une procédure prenant en compte tous les éléments qui permettent d'accéder à un **diagnostic aussi sûr et pertinent que possible**

NB : on peut se reporter également au guide technique LCPC « Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne» ainsi qu'au document publié par l'AFREM «Méthodologie d'approche de la microstructure du béton par les méthodes minéralogiques».

FICHE DIAGNOSTIC

FORMULATION DU PROBLEME PAR LE CLIENT

DEMARCHE « EXPERT »

- Information préalable sur l'ouvrage (ou partie d'ouvrage)

VISITE DU SITE

- Conditions environnementales
- Inspection visuelle

ESSAIS SUR SITE (PRE-DIAGNOSTIC)

- Essais chimiques (profondeur carbonatée, chlorures, ...)
- Essais mécaniques (scléromètre, arrachement, ...)

PRELEVEMENTS

- Carottages ou éclats sur béton, eau ou sol environnant (à conserver dans des sacs ou récipients étanches)

ETUDES EN LABORATOIRE

- Chimie
- Analyse thermique
- DRX
- Microscopie
- Résistances mécaniques
- Mesures physiques
- Gonflement potentiel résiduel

CONCLUSIONS



2. DEMARCHE DIAGNOSTIC RELATIVE AUX DEGRADATIONS DUES AUX ATTAQUES SULFATIQUES ET A L'ALCALI-REACTION

Elle se présente sous forme d'un organigramme reprenant la démarche générale de la fiche diagnostic et indiquant les principaux essais à pratiquer, communs ou spécifiques de chacune des deux attaques.

