

# LES CAUSES DE LA CORROSION CHIMIQUE DES BETONS ET AMELIORATION DE LEUR DURABILITE

Par

**Mohamed Tahar ABADLIA**

Maître de Conférence, INMC Boumerdès

**Abderrahim BALI**

Professeur, Ecole Nationale Polytechnique, Alger

## Résumé

*La durabilité des bétons courants est déterminée tout d'abord par leur résistance aux agents agressifs. Cette résistance dépend de celle de la matrice du ciment hydraté, de la nature et de la granulométrie des granulats et des proportions de chacun d'eux. Mais elle est également fonction de la liaison qui s'établit entre ces deux phases. Dans cet article, nous présentons une analyse des causes de la corrosion chimique des bétons et les moyens d'amélioration de leur durabilité.*

**Mots clés :** durabilité • corrosion chimique • béton • lessivage • ajout minéral.

## 1 INTRODUCTION

Dans le but d'accroître la résistance des bétons courants aux agents agressifs, les chercheurs se sont essentiellement attachés, d'une part, à améliorer les propriétés correspondantes des pâtes de ciments hydratés et, d'autre part, à atteindre une compacité aussi grande que possible en jouant sur la granulométrie des granulats et leur nature, les dosages en ciment et en eau, les moyens de mise en œuvre et en utilisant des adjuvants chimiques et des ajouts minéraux actifs.

La corrosion chimique des bétons repose principalement sur l'action réciproque entre les composants des bétons durcis et des substances nuisibles qui se trouvent en état liquide et qui sont capables de se transmettre dans le corps solide d'un béton durci grâce aux pores capillaires.

Cette action réciproque se produit à travers les

solutions et, par conséquent, les composants les plus faibles par rapport aux agents agressifs sont ceux qui se dissolvent facilement : alcalis libres, chaux hydratée libre, etc.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons et leur résistance aux agents agressifs dans les conditions du pays (connu pour ses différentes zones climatiques), il faut connaître les causes principales de la corrosion chimique. Cette résistance augmente sensiblement pour les bétons de haute densité. Cependant, la technologie de mise en œuvre des bétons frais demande des mélanges maniables dont le rapport E/C dépasse 0.60 à 0.65. Une grande partie de l'eau de gâchage s'évapore et provoque ainsi la formation de nombreux pores capillaires, compromettant la résistance et la stabilité chimique du matériau. Dans ce cas il faudra chercher d'autres moyens permettant d'améliorer ces deux caractéristiques.

Ci-dessous, nous présentons une étude des causes principales du lessivage des bétons et le rôle joué par certains ajouts minéraux actifs dont l'Algérie est riche.

## 2 ANALYSE DES CAUSES PRINCIPALES DE LESSIVAGE DU BETON ET ROLE DES AJOUTS

Le clinker Portland est un produit polycristallin à plusieurs phases. Ses composants fortement basiques - silicates, aluminates et alumino-ferrites de calcium - forment par réaction avec l'eau de gâchage et suite à une dissolution partielle, différents cristaux hydratés difficilement solubles dans l'eau et stables aux actions des agents atmosphériques. Cependant, le ciment Portland contient aussi environ 1% d'oxydes alcalins dont la vitesse de dissolution est supérieure à celle des

principaux composants du clinker. C'est pourquoi la dissolution de ces derniers se produit dans le milieu relativement à forte concentration.

La présence d'ion  $\text{OH}^-$  diminue la dissolution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Tableau 1). Ce fait est attribué au déficit en chaux dans le milieu. La vitesse de formation des silicates hydratés (CSH) diminue et devient presque nulle à 20 g/l. Par contre, celle des autres composants (silice, aluminates, etc.) augmente à cause de la formation des silicates et aluminates de sodium ou potassium.

Concentration (g/l)	NaOH	0	0.4	1.6	2.66	5	8	20
à 20 °C	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1.17	0.94	0.57	0.39	0.18	0.11	0.02
à 50 °C	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.088	0.65	0.35	0.20	0.06	0.02	trace

Tableau 1 : Solubilité de CaO en présence de NaOH.

La migration de ces alcalis à la surface du béton et la carbonatation ultérieure est l'une des principales causes de la formation des efflorescences à la surface des constructions. A cet effet, plus leur concentration est grande plus la vitesse de corrosion est importante.

En outre, lors de l'utilisation de certains granulats contenant de la silice active, les réactions "alcalis-granulats" peuvent se produire à l'interface "pierre de ciment-granulat" en donnant naissance à des produits expansifs qui s'accumulent sous forme de gel (mélange d'oxyde de silicium et d'alcalis) dans les pores et dans les zones de réaction entraînant des dégradations des bétons qui peuvent mettre en péril la stabilité de l'ouvrage (Tableau 2) (qui indique la solubilité de la silice en fonction du pH).

pH du milieu	1	2	3	4.2	5.7	7.7	10.26	10.6
solubilité $\text{SiO}_2$ (g/l)	0.014	0.015	0.015	0.013	0.011	0.010	0.0490	0.0129

Tableau 2 : Dissolution de  $\text{SiO}_2$  actif dans le milieu alcalin.

A titre d'exemple, si un béton contenait 360 kg de ciment avec 1% d'alcalis, cela augmenterait la teneur en alcalis du béton de 3.6 kg/m<sup>3</sup>. A cela s'ajoute la quantité d'alcalis relâchée dans la solution interstitielle par les granulats, ce qui augmenterait d'avantage cette quantité. Une telle augmentation pourrait avoir un impact décisif sur la détérioration du béton contenant des granulats réactifs.

Nous savons aussi que la durabilité dépend de la concentration de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  restant libre et de la densité de la pierre de ciment. La dissolution et le lavage de cette chaux provoque la diminution de l'imperméabilité et par conséquent une perte de la résistance.

A. Ruetgers [1] considère que la perte de 10% de

CaO (par rapport à la masse de ciment) par le béton (Figure 1) provoque une chute sensible de résistance, et l'état du béton peut être considéré comme instable.

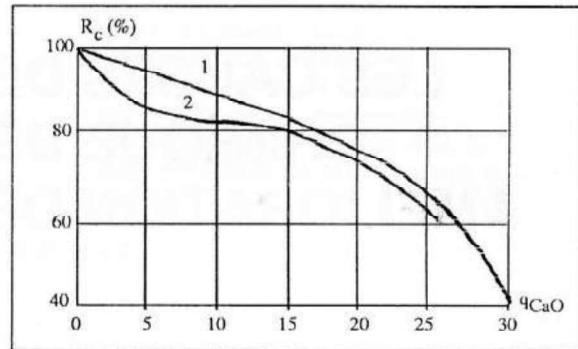


Figure 1 : Variation de la résistance et de la densité du béton. 1) Mortier, 2) Béton.

Pour apprécier le degré d'agressivité de ce mode de corrosion, Moskvine propose une méthode de calcul de la durée de service des ouvrages en béton et béton armé [2]. Pour illustrer cette méthode nous présentons un exemple simple de calcul.

Soit :

- $q_{\text{CaO}}$  (g/cm<sup>3</sup>), la quantité de CaO susceptible d'être éliminée d'une unité de volume de béton sans perte de ses principales propriétés.

- $V_{\text{ve}}$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>s), la quantité d'eau filtrée par unité de temps à travers une unité de volume.

- $C_{\text{CaO}}$  la concentration de la chaux dans l'eau, durant l'exploitation de la construction envisagée.

- temps d'exploitation,  $\tau = q_{\text{CaO}}/V_{\text{ve}} \cdot C_{\text{CaO}}$  (1)

- $q_{\text{CaO}} = k.c.\alpha$  (2)

- $k$  : % de CaO lessivée ( $k = 0.1$ )

- $c$  : dosage en ciment (g/cm<sup>3</sup>) du béton ( $c = 0.3$ )

- $\alpha$  : teneur en CaO dans le ciment 50 à 65% ( $\alpha = 0.5$  à 0.65)

Alors :

$$q_{\text{CaO}} = 0.1 \times 0.65 \times 0.3 = 0.0195 \text{ g/cm}^3$$

Considérons que lors d'une filtration lente le lessivage de 10% de chaux conduit à une saturation de la solution en CaO ( $\text{CaO} = 1.2 \text{ g/l} = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ ).

Le temps sera alors :

$$\tau = \frac{0.0195}{V_{\text{ve}} \cdot 0.0012} = \frac{16.2}{V_{\text{ve}}}, \text{ sec} \quad (3)$$

ou

$$= \frac{16.2}{V_{\text{ve}} \cdot 365.86 \cdot 400} = \frac{5.14 \cdot 10^{-7}}{V_{\text{ve}}}, \text{ ans} \quad (4)$$

On a donc une fonction :

$$\tau = f(V_{ve}), \text{ où } V_{ve} = k_f \cdot \Delta H \quad (5)$$

( $\Delta H$  gradient de pression)

avec :

H : pression en colonne d'eau (m)  
e : épaisseur de la construction (m)

La densité peut être évaluée par le coefficient de filtration limite,  $k_f = V_{ve}/\Delta H$ .

**Application :** pour une pression H = 10 m colonne d'eau et e = 0.5 m,  $\Delta H$  sera égal à  $10/0.5 = 20$ .

Pour une durée de service du béton égale à 100 ans, on aura :

$$V_{ve} = \frac{5.14 \cdot 10^{-7}}{100} = 5.14 \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

$$k_f = \frac{5.14 \cdot 10^{-9}}{20} = 2.57 \cdot 10^{-10} \text{ cm/s} \quad (7)$$

Ces calculs sont approximatifs mais permettent d'évaluer les exigences à la perméabilité du béton exploité dans des conditions réelles.

### 3 ROLE DES AJOUTS ET STABILITE CHIMIQUE DES BETONS

Les différentes propriétés mentionnées ne se manifestent pas pendant la préparation du béton, mais progressivement durant l'exploitation des constructions. Leur inconvénient est le dosage excessif en ciment calculé par unité de résistance du béton, c'est-à-dire qu'on

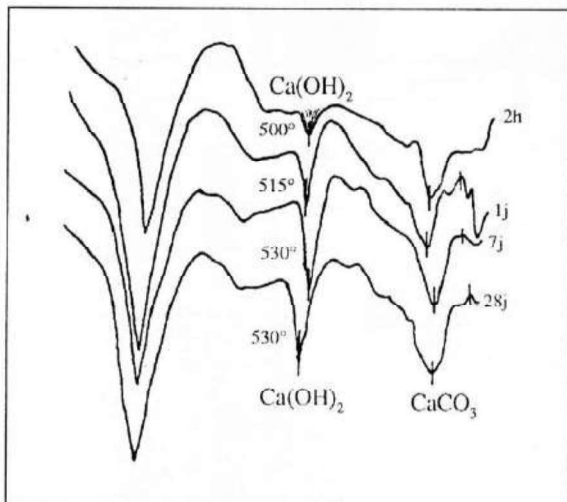


Figure 2 : Thermogrammes, CPA de Hadjar-Soud après : 2h, 1j, 7j et 28 jours de durcissement.

y trouve une concentration importante de  $\text{Ca(OH)}_2$  libre sous forme de cristaux hydratés comme en témoignent les thermogrammes sur la figure 2 [3].

L'effet endothermique à la température de 500 à 530 °C, exprime la présence des cristaux hydratés de chaux restant libres. Alors, il est donc impératif de fixer cette quantité d'hydroxyde de calcium résultant de l'hydratation et du durcissement du ciment.

Les matières premières qui contiennent dans leur composition de la silice active, des aluminates et des alumino-ferrites ou autres composants analogues sont susceptibles de jouer ce rôle.

L'interaction entre les ajouts actifs et la chaux provoque la formation d'hydrates pratiquement insolubles. Ainsi, le volume total des produits stables, plus particulièrement les silicates de calcium hydratés (CSH) faiblement basiques, s'accroît au détriment de  $\text{Ca(OH)}_2$  qui est le composant le plus instable [3] (Figure 3).

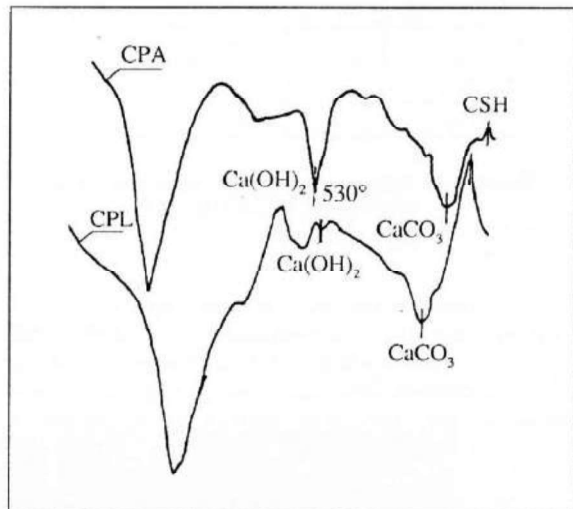
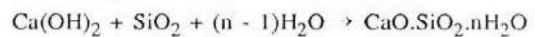


Figure 3 : Thermogrammes, CPA, CPL après 28 jours de durcissement.

Exemple de réaction :



D'après les données [1], la concentration de  $\text{Ca(OH)}_2$  dans la phase liquide de certains ajouts minéraux actifs telle que la pouzzolane diminue de 4.5 fois (de 9.0 à 2.0 moles/l) ce qui correspond à l'équilibre avec CSH. Le rapport  $\text{CaO/SiO}_2$  dans les silicates hydratés varie de 1.5 à 0.8 en fonction de l'activité de l'ajout, mais dans tous les cas reste inférieur par rapport au ciment Portland sans ajouts. Ainsi, la stabilité du béton à tous types d'actions chimiques augmente.

#### 4 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE CERTAINES SOLUTIONS SUR LA VITESSE DE DESTRUCTION DES BETONS

Nous savons que l'augmentation de la température réduit la vitesse de dissolution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Tableau 1). Mais dans le CPA ordinaire les processus d'hydrolyse des grains de ciment se produisent intensivement. A première vue, le tableau 3 qui illustre l'influence de l'ajout sur le lessivage de la chaux en fonction de la température, semble être faux pour le CPA. Mais réellement il n'y a pas de contradiction, car si la solubilité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  diminue les phénomènes d'hydratation s'intensifient.

Par contre, dans le ciment aux ajouts minéraux actifs (CPZ, CPL, etc.), l'augmentation de l'activité due à l'élévation de la température provoque la fixation totale et rapide de la chaux libre, ce qui diminue considérablement l'intensité de la corrosion (Tableau 3).

Lessivage (g/l de liant) après 2 jours de durcissement			
Type de liant	Température (°C)		
	20	40	80
CPA	21	24	30
CPZ	18	14	8

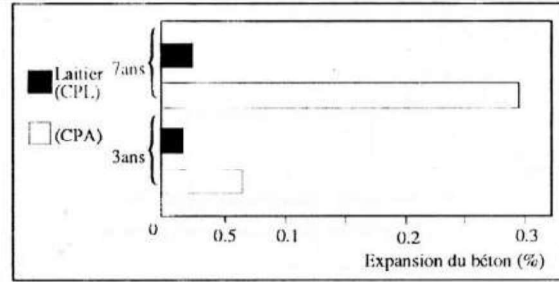
**Tableau 3 :** Influence de l'ajout minéral actif sur le lessivage de la  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en fonction de la température.

La répartition uniforme de l'ajout dans la masse du ciment empêche l'accumulation des alcalis dans l'interface "pâte-granulat". Ce fait diminue le danger dû à l'apparition dans cette zone de la pression osmotique, et par conséquent, diminue la destruction du béton par l'action alcaline.

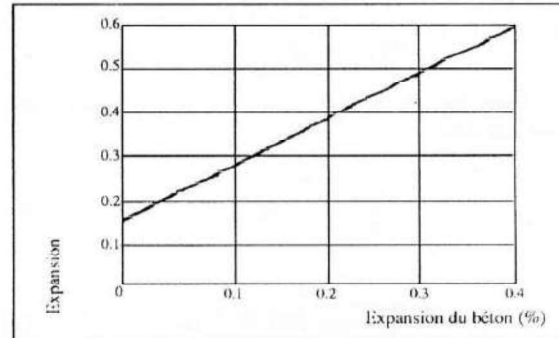
L'utilisation des ajouts minéraux actifs naturels tels que : pouzzolane, tufs, calcaire, etc., ou artificiels : laitier, etc., permet aussi de diminuer la formation des efflorescences et d'augmenter la résistance des bétons aux solutions agressives.

D'après Hobbs [4] entre 39 et 62% du total des alcalis du laitier passent dans la solution interstitielle. Oberholster [5] montra à son tour qu'un ciment avec ajout de 50% de laitier pouvait prévenir efficacement l'expansion du béton contenant des granulats réactifs (Figure 4).

Afin d'évaluer la réaction potentielle d'un certain nombre de granulats, Hooton et Rogers [6] ont utilisé une série de méthodes d'essai accélérées sur barrettes de mortier, parmi lesquelles la méthode d'essai NBRI, dans laquelle les barrettes de mortier sont conservées dans une solution de  $\text{NaOH}$  à 1 mole à 80 °C. Les résultats de mesure des expansions sont présentés à la figure 5.

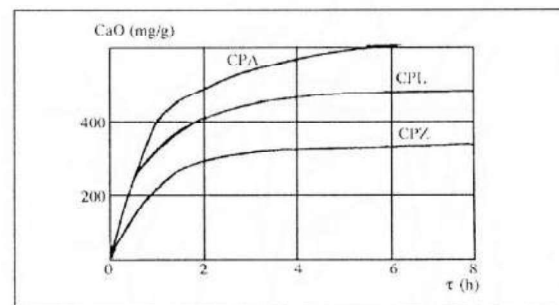


**Figure 4 :** Expansion des cubes de béton contenant 350 kg de CPA (à 50% de laitier).



**Figure 5 :** Comparaison des expansions obtenues par l'essai accéléré sur barrettes de mortier réalisé à 80 °C avec les résultats obtenus par essai sur prisme de béton à 38 °C et 100% d'humidité.

Le degré de fixation de la chaux par l'ajout actif, c'est-à-dire les données de lessivage des composants du ciment Portland (valeur presque égal à 1) en fonction du temps (Tableau 4) montre que les CPJ peuvent mieux résister, surtout après 90 jours. L'introduction des ajouts diminue considérablement le phénomène de lessivage caractérisé dans le cas considéré par la concentration de  $\text{CaO}$  déterminée après 6 heures (Figure 6).



**Figure 6 :** Vitesse de lessivage de la chaux par l'eau distillée.

Les ciments aux ajouts conviennent mieux pour les constructions souterraines là où on relève la présence de certains sels agressifs (Oum El Bouaghi, El Oued, etc.).

	Age (jours)			
	30	60	90	180
CPA	1	1	1	1
CPZ	1.15	1.20	0.82	0.45

**Tableau 4 :** Degré de fixation de la chaux par l'ajout en fonction du temps.

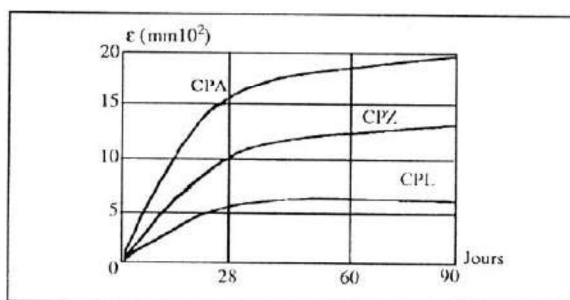
L'action des solutions agressives d'HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à un pH = 4 et après 5 heures, illustrée dans le tableau 5, montre que l'ajout le moins actif, diminue l'échange d'acide à la surface grâce à quoi la vitesse de corrosion diminue. La stabilité des ciments aux ajouts est toujours supérieure à celle des CPA.

Solution	Ciment	Concentration CaO (g/l)	Quantité de chaux lessivée (mg/l)	Vitesse de dissolution (mg. de CaO/h)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CPA	81	170	0.17
	CPZ	55	96	0.12
HCl	CPA	134	224	0.29
	CPZ	79	168	0.17

**Tableau 5 :** Action d'HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur les CPJ.

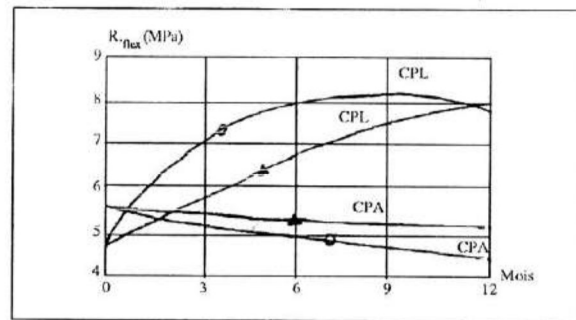
L'action des sulfates (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, eau de mer) illustrée dans les figures 6 et 7 [3] montre que déjà à deux mois, les éprouvettes en CPA possèdent une déformation très élevée. Les ajouts (Z, L) réduisent la déformation, et par conséquent augmentent la résistance aux actions agressives des sulfates. Ce fait peut être attribué à la nature des nouvelles formations, à l'absence de Ca(OH)<sub>2</sub> et au volume important de CSH formés.

Sous l'action des agents corrosifs, le laitier saturé d'ions de calcium se transforme progressivement en un mélange de gel particulièrement siliceux moins perméable à la diffusion des ions corrosifs [7]. On remarque un accroissement de la résistance de près de 60%, pour les éprouvettes confectionnées à partir du laitier d'El-Hadjar, par contre, on relève une diminution de 30% pour les bétons de ciment ordinaire.



**Figure 7 :** Déformation des éprouvettes.

Ceci nous permet de recommander l'utilisation des bétons aux ajouts minéraux (CPZ, CPL, etc.) dans les zones côtières et dans les régions dont le sol contient des eaux minéralisées.



**Figure 8 :** Variation des résistances  
o - 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ▲ - Eau de mer.

## 5 CONCLUSION

L'action des agents corrosifs peut être amplifiée par l'action concomitante des facteurs physiques du milieu environnant (variation de la température, de l'humidité), surtout dans les conditions du pays qui connaît plusieurs zones climatiques. Donc, pour augmenter la durabilité des constructions, on doit accorder une attention particulière au choix et aux proportions des matériaux qui entrent dans la composition du béton, particulièrement le ciment dont la durabilité dépend beaucoup.

L'utilisation de certains matériaux d'ajouts existant dans les différentes régions du pays, telle que la pouzzolane (tufs volcaniques, laitier granulé des hauts fourneaux) est plus avantageuse du point de vue de la qualité et de la durabilité des bétons ⑥

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Ruetgers & E. Vidal : "An investigation of the permeability of masse concrete with particular reference of boulder". Dam.
- [2] V. Moskvine : "Corrosion du béton et béton armé et les méthodes de protection." Citrouzdat, Moscou, 1980.
- [3] M.T Abadlia : "Liants et bétons de laitier granulé d'El Hadjar". Thèse de PhD, Rostov, 1984.
- [4] D.W Hobbs : "Effet of mineral and chemical Adixtures on alcali-aggregate reactions". Proceedings of 8th ICAAR, 1989.
- [5] R.E Oberholster : "Alkali-agregate reaction in South Africa". Some recent developpement in research, proceedings of 8th ICAAR, 1989.
- [6] R.D Hooton & C.A Roggers : "Evaluation of rapid tests méthodes of delectings alcalireactive aggregate". Proceedings of 8th ICAAR, 1989.
- [7] M.T Abadlia : "Fabrication des blocs de laitier et étude de leurs propriétés d'exploitaion". Journées scientifiques, ENP, Alger, 1989.