



Étude de la dégradation d'une canalisation de conduite d'eau en béton armé

Erramli HAMID, Dermaj AHMED*, Driss CHEBABE, Moustafa DOUBI, Najjat HAJJAJI
et Srhiri ABDELLAH

Laboratoire d'Electrochimie, Matériaux et Environnement, Faculté des Science, Kenitra, Maroc

* Correspondance, courriel : D_Chebabe@hotmail.com

Résumé

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude des causes de dégradation d'une canalisation en béton armé dans la région de l'oriental au Maroc. Cet ouvrage est utilisé pour transporter de l'eau potable. L'altération de l'ouvrage n'a été constatée et de manière sévère que sur un tronçon bien situé. Dans ce cadre on a procédé à la détermination des causes de dégradation. Pour cela nous avons effectué un prélèvement d'échantillons du tronçon dégradé et de part et d'autre. Des échantillons témoins ont été réalisés à l'usine de fabrication des canalisations.

Nous avons effectué le dosage de la teneur en chlorure et en ciment, étudié l'impact de la carbonatation et déterminé les pourcentages en silice et carbonates. Nous avons aussi mis au point la présence des ions chlorures en pourcentage assez important pouvant être responsable de la corrosion des aciers de fretage des tuyaux en béton précontraint et par conséquent des dégradations affectant ces tuyaux. La présence d'un environnement humide aurait favorisé la dégradation.

Par ailleurs, la détermination de la teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment a nécessité la détermination du pourcentage de ciment contenu dans le béton. Nous avons utilisé la méthode dite des inertes. La détermination de la teneur en anhydride carbonique CO₂ a été réalisée par calcimétrie.

Les résultats obtenus montrent que nous sommes en présence d'un béton ayant subi une légère carbonatation et contenant à la fois des teneurs en chlorures dépassant largement le seuil d'amorçage de la corrosion.

Mots-clés : *dégradation, canalisation, béton armé, corrosion, carbonatation.*

Abstract

Sanitary characterisation of rains water collected in home thanks in wallon area, Belgium

In this work we are interested in studying the causes of deterioration of reinforced concrete pipeline in the region of east Morocco. This pipe is used for transporting drinking water. The alteration of the pipe was found damaged by corrosion way on a section well-defined. For this we conducted a sampling of section corroded of each side. Control samples were made in manufacturing pipes.

We performed the assay of chloride content and cement, studied the impact of carbonation and determined the percentages of silica and carbonates. We also developed the presence of chloride ions in fairly large

percentage may be responsible for the corrosion of steel concrete pipes and therefore degradation affecting these pipes. The presence of a moist environment would favor degradation.

Otherwise, determining the chloride content relative to the weight of cement required the determination of the percentage content of cement in the concrete. We used the so-called inert method. The determination of the content of carbon dioxide, CO₂ was produced by calcimetry.

The results show that we are in the presence of a concrete with a slight carbonation and containing chloride concentrations in well above the value corresponding to the demurrage the corrosion.

Keywords : *degradation, pipe, concrete, corrosion, carbonation.*

1. Introduction

Pour prévoir l'évolution du comportement mécanique des structures en béton au cours de leurs vieillissements qui est un objectif d'une grande importance pour les maitres d'ouvrage afin de prévoir des réparations de renforcement de la structure et le remplacement de l'ouvrage.

La principale cause de dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures. Elle provoque la réduction de sections des aciers de renforcement ainsi qu'une perte d'adhérence entre les aciers tendus et le béton, et se traduit par un éclatement de béton d'enrobage. Les structures en béton armé sont fissurées en raison de la corrosion des armatures proches de la surface. En fonctionnement normal, le pH autour des armatures est autour de 12-13, ce qui place l'acier en situation de passivité [1-3]. En revanche, en raison soit de la diffusion de CO₂ soit du chlorure, les conditions thermodynamiques sont modifiées amenant l'acier en situation de corrosion active. La conséquence en est la production d'oxyde ou d'hydroxyde à l'interface acier béton avec comme effet mécanique : une pression exercée sur le béton d'enrobage qui conduit à sa fissuration et une réduction de section d'acier non homogène conduisant à la formation des piqures avec une fragilisation de l'acier. Le béton étant alors fissuré, il laisse l'oxygène et les chlorures migrés plus facilement ce qui accélère le phénomène de corrosion [4-6].

En effet, la corrosion des aciers contenus dans le béton est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies:

- Un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- Une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- La présence d'un agent agressif (les chlorures, les sulfates, etc...).

La problématique qui se pose dans le contexte de l'étude des tuyaux en béton d'enrobage présentant une teneur en chlorures dépassant les normes prescrites et de voir les interactions milieu/élément de conduite ainsi la dégradation ou l'éclatement de certains tuyaux enterrés. La situation géographique et topographique de ces derniers, et les données physico-chimiques concernant le béton d'enrobage qui les forment peuvent accélérer la dégradation du béton.

Les résultats des travaux de laboratoire réalisés fournissent une donnée très importante à savoir la présence de chlorures en pourcentage assez important pouvant être responsable de la corrosion des aciers de frettage des tuyaux en béton précontraint et par conséquent des dégradations affectant ces tuyaux. La présence d'un environnement humide aurait favorisé la dégradation. Selon ces mêmes travaux, les chlorures proviennent essentiellement des sables contenus dans le béton.

Nous avons donc entamé notre étude à partir de cette situation en cherchant à vérifier la teneur en chlorures dans les bétons des tuyaux dégradés (première population).

2. Matériel et méthodes

2-1. Échantillonnage

L'étude a été faite sur 12 échantillons de béton d'enrobage (*Figure 1*):

- Deux tuyaux en service situés de part et d'autre de l'emplacement du tuyau n° 3637 (S1) [3637a (S2) et 3637b (S3) à 50m de part et d'autre de (S1)] mais qui ne sont pas dans les mêmes conditions de pose (ces tuyaux sont posés dans un site qui les met à l'abri des arrivées d'eau aussi bien souterraine que de surface ;
- 4 échantillons (3283 (S4)-7849(S5)-7202(S6) et 6757 (S7) sont des tuyaux enterrés ayant subi des dégradations ou éclatements.
- Des tuyaux faisant partie du rebut n° 2771(S8) -8081(S9)-9736(S10)-7082(S11) ;
- D'un tuyau témoin gardé en usine le n° 1738 (S12)



Figure 1 : Photos de quelques échantillons objet d'étude

L'état des canalisations montre une dégradation avancée qui met à nu l'armature en certains endroits, d'où la nécessité d'effectuer une analyse approfondie des différents paramètres en vue d'établir les causes probables de cette dégradation.

2-2. Méthodologie

L'approche méthodologique suivie dans cette étude a consisté :

- * Un échantillonnage de certains éléments de conduite (dégradés ou non) et à un échantillonnage de tuyaux issus de la même production mais qui n'ont pas été mis en place (rebuts et tuyaux témoins laissés à l'usine).
- * La détermination de la teneur en ciment et par la même occasion la détermination des pourcentages en silice, en carbonates. L'objectif est de voir l'impact de la carbonatation.
- * La détermination des teneurs en chlorures par rapport à la masse du béton et par rapport au pourcentage de ciment dans le béton est celle recommandée par Yves F. Houst [7].

L'étude au laboratoire a consisté à la réalisation d'un échantillonnage sélectif, afin de déterminer la teneur en chlorures et en ciment dans le béton durci.

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier l'effet de la composition de différents types de béton et son effet sur la corrosion des aciers d'armature [8-10].

2-3.-Protocole expérimentale

2-3-1. Détermination du pourcentage en ciment dans le béton durci

Nous avons utilisé la méthode dite des inertes qui consiste à déterminer :

- La fraction des insolubles INS qui correspond aux granulats siliceux;
- La perte au feu PAF qui correspond à la teneur en eau liée à la teneur en matière organique éventuellement présente et à la teneur en CO₂ des carbonates (granulats calcaires et partie carbonatée du ciment) ;
- La détermination de la teneur en anhydre carbonique CO₂ qui est réalisée par calcimétrie [11].

Le pourcentage de ciment (% C) est calculé par la relation suivante :

$$\text{Si } CO_2 > \rightleftharpoons \quad C = 100 - [INS + PAF + (CO_2 - 1) \times 1,27] \quad (1)$$

$$\text{Si } CO_2 < \rightleftharpoons \quad C = 100 - [INS + PAF] \quad (2)$$

2-3-2. Détermination quantitative des chlorures dans la masse de béton

Nous avons suivi la démarche suivante :

- Le prélèvement des échantillons : Les échantillons ont été prélevés sous forme de fragments sans utilisation d'eau sur deux types de tuyaux : ceux qui en service et qui sont remplacés et mis à l'écart du réseau ;
- La préparation des échantillons : les échantillons ont été broyés et réduits en poudre et passés au tamis 0,315 mm d'ouverture ;
- L'extraction et le dosage des chlorures contenus dans les échantillons de béton ont été réalisés selon le mode opératoire du groupe de recherche AFPC-AFREM [12].
- Pour la détermination de la teneur en chlorures exprimée en gramme pour 100 g d'échantillon donnée par la relation.

$$[Cl] = 100 \times 35,5 C_{AgNO_3} \times V_e \times 10^{-3} \times 1/M_{pe} \times V_{fiole}/V_{prélevé} \quad (3)$$

[Cl] : Concentration des chlorures

C_{AgNO₃} : Concentration de l'argent

V_e : Volume au point équivalent

M_{pe} : masse du béton pesé

V_{fiole} : volume de fiole

V_{prélevé} : volume prélevé

3. Résultats et discussion

3-1. Dosage en ciment

Dans ce travail on a effectué trois dosages pour chaque échantillon. Les résultats obtenus sont représentés dans le **Tableau 1**.

Tableau1 : Pourcentage en ciment dans les différents échantillons

N° Échantillon	Localisation	INS	PAF	CO2	% ciment
S1	Tuyau n°3637	10,31	70,94	0,98	18,75
		10,34	69,23	0,87	20,43
		10,36	70,85	0,82	18,79
S2	Tuyau n°3637a (50m après le tuyau)	10,20	67,20	0,87	22,60
		10,52	65,89	0,92	23,59
		9,25	66,25	0,85	24,50
S3	Tuyau n°3637b (50 m avant le tuyau)	8,82	66,4	0,84	24,78
		7,92	67,46	0,93	24,62
		7,84	67,85	0,91	24,31
S4	Tuyau n°3283	9,29	69,22	0,92	21,49
		8,85	72,52	0,94	18,63
		8,89	70,02	0,95	21,02
S5	Tuyau n°7849	11,94	69,50	0,95	18,56
		10,95	69,35	0,87	19,70
		9,85	71,24	0,92	18,91
S6	Tuyau n°7202	8,64	71,57	0,85	19,79
		8,84	72,82	0,91	18,34
		8,56	69,35	0,87	22,09
S7	Tuyau n°6757	13,63	68,97	0,89	17,40
		10,58	70,24	0,84	19,18
		9,85	71,48	0,83	18,67
S8	Tuyau n°2771	10,93	65,22	0,95	23,85
		10,58	65,58	0,85	23,84
		9,78	66,52	0,88	23,70
S9	Tuyau n°8081	10,72	70,7	0,84	18,58
		8,58	67,86	0,95	23,56
		9,21	68,25	0,94	22,54
S10	Tuyau n°9736	6,71	68,7	0,92	24,59
		6,73	67,74	0,85	25,53
		6,87	68,83	0,86	24,30
S11	Tuyau n°7082	7,92	67,8	0,92	24,28
		7,25	67,85	0,84	24,9
		7,93	67,22	0,95	24,85
S12	Tuyau n°1738	5,92	68,8	0,85	25,28
		6,93	68,4	0,84	24,67
		6,88	68,5	0,87	24,62

Les résultats des différentes analyses réalisées sur l'ensemble des tuyaux analysés consignés ont montré que le pourcentage en ciment contenu dans le béton est compris entre 17,40 et 25,53 %.

Le pourcentage des insolubles, teneur qui correspond à la silice contenue dans les bétons est compris entre 5,92 et 13,63 %.

La perte au feu qui permet de calculer la teneur en CaO issue, soit des granulats calcaires (carrière de calcaires de Sefrou) soit de la partie carbonatée du ciment soit des deux à la fois, est compris entre 65,22 et 72,82 %

Pour les échantillons issus des tuyaux enterrés et ayant subi des dégradations présentent des résultats hétérogènes. Les échantillons de béton issus de ces tuyaux admettent :

- Un pourcentage en ciment contenu dans le béton compris entre 17,40 et 22,09 % avec une moyenne de 19,45 %.
- Un pourcentage des insolubles compris entre 8,64 et 13,63 % avec une moyenne de 10,05 %. Ce pourcentage correspond à la silice contenue dans le béton (essentiellement en provenance des sables de dunes de Kénitra) ;
- Une perte au feu comprise entre 68,97 et 72,82 % avec une moyenne de 70,49 %. Ce pourcentage permet de calculer la teneur en CaO issue, soit des granulats calcaires (carrière de calcaires de Sefrou) soit de la partie carbonatée du ciment soit des deux à la fois.

3-2. Teneurs en chlorures contenues dans le béton

Les résultats des teneurs en chlorures contenues dans le béton sont donnés dans le **Tableau 2**.

Ces résultats fournissent une donnée très importante à savoir la présence des chlorures en pourcentage assez important, pouvant être responsables de la corrosion des aciers de fretage des tuyaux en béton précontraint, une telle corrosion peut être à l'origine de l'altération du revêtement de béton et la mise à nu des armatures des tuyaux. La présence d'un environnement humide des deux côtés de la canalisation favoriserait sa dégradation.

Les résultats obtenus montrent :

La teneur en chlorures par rapport à la masse de béton varie de 0,031 à 0,345 %.

La teneur en chlorures par rapport au % de ciment varie de 0,127 à 1,88 %.

La valeur du pH variant de 11,15 à 12,60 avec une moyenne de 11,8.

Les résultats des différentes analyses réalisées sur l'ensemble des bétons des tuyaux analysés consignés dans les **Tableaux 1 et 2** montrent que:

- Un pourcentage en ciment contenu dans le béton compris entre 22,54 et 25,53 % avec une moyenne de 24 % ;
- Un pourcentage des insolubles compris entre 5,92 et 10,92 % avec une moyenne de 8,45 %. Ce pourcentage correspond à la silice contenue dans le béton (essentiellement en provenance des sables de dunes de Kénitra) ;
- Une perte au feu comprise entre 65,22 et 68,83 % avec une moyenne de 67,57 %. Ce pourcentage permet de calculer la teneur en CaO issue, soit des granulats calcaires, soit de la partie carbonatée du ciment soit des deux à la fois ;
- Un pH variant de 12,65 et 12,95 avec une moyenne de 12,8 ;
- Une teneur en chlorures par rapport à la masse de béton variant de 0,031 à 0,049 % avec une moyenne de 0,037 % ;
- Une teneur en chlorures par rapport au % de ciment variant de 0,127 à 0,215 % avec une moyenne de 0,16 %.

Tableau 2 : Teneurs en chlorures du béton

N° échantillon	Localisation	Chlorures totaux en % de la masse de béton	% de ciment	Chlorures totaux en % de la masse de ciment	PH
S1	Tuyau n°3637	0,202	18,75	1,077	11,50
		0,210	20,43	1,027	11,95
		0,204	18,79	1,085	11,15
S2	Tuyau n°3283	0,178	21,49	0,828	12,52
		0,176	18,63	0,944	11,90
		0,175	21,02	0,832	12,10
S3	Tuyau n°3637. 50 m après le tuyau	0,042	22,60	0,185	12,82
		0,049	23,59	0,207	12,65
		0,045	24,50	0,183	12,85
S4	Tuyau n°3637. 50 m avant le tuyau	0,042	24,78	0,169	12,81
		0,044	24,62	0,178	12,71
		0,040	24,31	0,164	12,88
S5	Tuyau n°7849	0,080	18,56	0,431	12,50
		0,084	19,70	0,426	12,42
		0,081	18,91	0,428	12,60
S6	Tuyau n°7202	0,344	19,79	1,738	11,56
		0,345	18,34	1,881	11,54
		0,342	22,09	1,548	11,58
S7	Tuyau n°6757	0,227	17,40	1,304	11,65
		0,229	19,18	1,193	11,60
		0,228	18,67	1,221	11,70
S8	Tuyau n°2771	0,036	23,85	0,150	12,91
		0,034	23,84	0,142	12,94
		0,038	23,70	0,160	12,80
S9	Tuyau n°8081	0,040	18,58	0,215	12,15
		0,035	23,56	0,148	12,85
		0,031	22,54	0,137	12,84
S10	Tuyau n°9736	0,033	24,59	0,134	12,92
		0,032	25,53	0,125	12,95
		0,035	24,30	0,144	12,82
S11	Tuyau n°7082	0,031	24,28	0,127	12,65
		0,036	24,9	0,144	12,76
		0,034	24,85	0,137	12,72
S12	Tuyau n°1738	0,038	25,28	0,150	12,65
		0,035	24,67	0,141	12,76
		0,037	24,62	0,150	12,85

Ceci nous a permis de conclure que nous sommes en présence d'un béton ayant subi une légère carbonatation et contenant des teneurs en chlorures dépassant largement le seuil d'amorçage de la corrosion [13,14].

Le taux élevé des chlorures est l'un des principales causes de la détérioration de béton [15,16], entraînant une corrosion par piqûres considérée comme étant la forme la plus désastreuse [17].

4. Conclusion

L'étude réalisée a mis en évidence un certain nombre de constatations à savoir :

- ✓ Les tuyaux dégradés sont généralement situés dans des zones humides et engorgées d'eau ou ayant probablement connu des cycles de présence d'eau tout autour de ces éléments dans les périodes pluvieuses ;
- ✓ Les bétons issus de ces tuyaux présentent un pourcentage en ciment faible par rapport aux tuyaux non dégradés ;
- ✓ Les teneurs en chlorures contenues dans le béton d'enrobage de ces tuyaux dépassent le seuil critique d'amorçage de la corrosion ;
- ✓ Les tuyaux ne présentant pas de dégradations montrent à l'analyse une teneur en chlorures acceptable et largement en dessous du seuil critique d'amorçage de la corrosion, un pourcentage de ciment plus élevé ainsi que des pH proche de 13.

Ainsi selon ces constatations, les chlorures contenus dans le béton d'enrobage des tuyaux dégradés proviennent probablement en partie des constituants du béton mais aussi du milieu extérieur ambiant.

Par ailleurs, l'ensemble des tuyaux étudiés admettent les caractéristiques suivantes :

- ✓ La porosité des bétons d'enrobage est relativement élevée mais inférieure à 15 %, ceci est confirmé par les résultats de MEB.
- ✓ Les épaisseurs d'enrobage des aciers de frettage sont plus ou moins faibles.

L'ensemble de ces conditions a pu contribuer à l'augmentation de la concentration des chlorures localement et en favoriser la migration et la diffusion vers les aciers de frettage et par conséquent entraîner l'amorçage de la corrosion des aciers de frettage. Ceci est confirmé aussi par :

- ✓ Des teneurs en chlorures acceptables, largement inférieures à 0,040 %, dans tous les tuyaux non dégradés et analysés par nos soins ;
- ✓ Des teneurs en chlorures dans les tuyaux dégradés jusqu'à 10 fois plus que dans les tuyaux non dégradés ;
- ✓ La pose des tuyaux non dégradés dans un environnement à l'abri de l'humidité.
- ✓ Vérifier les mesures de résistivité ;
- ✓ Analyser les sols supports des conduites ;
- ✓ Vérifier la qualité des eaux en cas de présence d'eau à proximité des canalisations ;
- ✓ Vérifier l'étude technique pour s'assurer de l'efficacité des protections de la conduite lors de sa mise en service.

Références

- [1] - J. RODRIGUEZ, L. M ORTEGA, J. CASAL, *la construction et le bâtiment* 11 (1997) 239-248.
- [2] - M. N. BOUCHERIT, D. TEBIB, *Anti-Corrosion Méthodes et matériaux* 52 (2005) 365-370.
- [3] - C. I. PAGE, N. R. BREF, W. R HOLDEN, *Cement and Concrete Research* 16 (1986) 79-86.
- [4] - A. MORAGUES, A. MACIAS, C. ANDRADE, *Cement and Concrete Research* 17 (1987) 173-182.
- [5] - M. MORENO, W. MORRIS, M. G. ALVAREZ, G. S. DUFFO, *Corrosion Sciences* 46 (2004) 2681-2699.
- [6] - F. Yves HOUST, Lausanne intitulé «Evaluation de la qualité des bétons, analyses physiques et chimiques».
- [7] - J. P. BROOMFIELD, D. B. KEVIN K. HLADKY, *Ciment et béton* (2002) 27-34.
- [8] - *Caractérisation du béton durci; Projet de méthode d'essai LPC N°40* Octobre (1994).
- [9] - P. GHODS, O.B. ISGOR, G. MCRAE, T. MILLER, *Ciment et béton* 31 (2009) 2-11.
- [10] - D. J. ANSTICE, C. I. PAGE, M. M. PAGE, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 377-383.
- [11] - S. GONI, C. ANDRADE, *Cement and Concrete Research* 20 (1990) 525-539.
- [12] - *Mode opératoire du groupe de recherche AFPC-AFREM.*
- [13] - *Norme Marocaine sur les bétons NM 10.1.008 (Partie béton frais) ; (2008).*
- [14] - M. SAREMI, E. MAHALLATI, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1915-1921.
- [15] - F. SCHMIDT, F. S. RECHERCHE ROSTASY, *Ciment et Béton* 23 (1993) 1159-1168.
- [16] - K. ANDERSSON, B. ALLARD, M. BENGTTSSON, B. MAGNUSSON, *Ciment et béton* 19 (1989) 327-332
- [17] - J. LOLIVIER : *colloque international sur les adjuvants des mortiers et bétons.*