
Etude des performances de durabilité des bétons locaux.

B. Touil^{1*}, Pr F. Ghomari¹, Dr A. Bezzar¹, Pr A. Khelidj², Dr S. Bonnet²

¹EOLE, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, BP 230, ALGERIE.

² GeM – Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Nantes, France.

* touil_b@yahoo.fr,

RÉSUMÉ. En Algérie, la production des ouvrages en béton armé dans les domaines du bâtiment et des ouvrages d'art est à son apogée. La région ouest où l'on utilise, pour la confection du béton ordinaire, le ciment portland de Béni-Saf de type CEM II/A (85% clinker + 12% pouzzolane naturelle) soulève de plus en plus le problème de la durabilité. Notre étude au laboratoire aborde d'une part la caractérisation microstructurale des matériaux cimentaires, et contribue d'autre part à comprendre le mécanisme de transport en caractérisant nos bétons à l'aide d'indicateurs de durabilité. Un programme expérimental est réalisé sur une formulation éprouvée de béton ordinaire où le rapport E/L varie dans l'intervalle : 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 couvrant ainsi les rapports usités dans la réalisation de nos ouvrages. L'étude menée a contribué à une meilleure compréhension du comportement du béton dans un milieu chlorhydrique, et les essais réalisés, nous ont permis de constater la diminution de la porosité en fonction du rapport E/L qui décroît, ce qui est à l'origine d'une augmentation des performances des bétons étudiés. En effet, les propriétés mécaniques du béton fabriqué avec E/L = 0.45 sont conformes aux normes locales et la perméabilité et diffusivité sont les plus faibles par rapport aux autres rapports étudiés.

ABSTRACT. In Algeria, the production of structures with reinforced concrete in the field of construction and the structure building trade is with its apogee. The western area where we uses the ordinary concrete with Portland cement of beni- Saf of the type CEM II/A (85% clinker + 12% natural pozzolana) raises more the problem of its durability. Our study at the laboratory focuses both on the characterization of the microstructural cementious material, and in the other hand to contribute to understand the mechanism of transport by using indicators of durability. An experimental program using a tested formulation of ordinary concrete where W/L varies : 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 covering thus used in the realization of the constructions. This study contributed to a better comprehension of the behavior of the concrete in a chloridric medium, and the tests carried out, enabled us to note the reduction in porosity according to ratio W/L which decrease, which is at the origin of an increase in the performances of the studied concretes. Indeed, the mechanical properties of the concrete manufactured with W/L = 0.45 are in conformity with the local standards and the permeability and diffusivity is weakest compared to the other studied ratios.

MOTS-CLÉS : Béton, Durabilité, Porosité, Perméabilité, Diffusion, Teneur en portlandite.
KEYWORDS: Concrete, Durability, Porosity, Perméability, Diffusion, Portlandite content.

1. Introduction

Le principal risque identifié en terme de durabilité des bétons armés exposés au milieu marin est la corrosion des armatures. Elle est due à la présence des ions chlorures au sein des pores du béton. Le sujet est largement étudié dans le monde car l'enjeu économique est très important.

Les propriétés de transfert des matériaux cimentaires, conditionnées en partie par leur microstructure, régissent la pérennité des structures armées vis-à-vis de la corrosion des aciers. La pénétration des agents agressifs s'effectue principalement par transport à travers la porosité du milieu cimentaire. Afin de réduire ce phénomène, il est nécessaire d'agir sur la formulation de ces matériaux dans le but de densifier leurs microstructures en vue de minimiser leurs porosités tout en minimisant le rapport E/L. A ce titre, cette étude porte essentiellement sur l'évaluation de quelques grandeurs de durabilité des bétons ordinaires fréquemment utilisés en Algérie, notamment par la mesure de la porosité, la perméabilité au gaz (perméamètre Cembureau), le coefficient de diffusion des chlorures en régime permanent (essai de migration accéléré) et de la teneur en portlandite (analyse thermogravimétrique). Ainsi, nous proposons de caractériser ces grandeurs, en faisant varier le rapport E/L dans l'intervalle : 0.45, 0.50, 0.55, 0.60.

Les corps d'épreuve étudiés sont des disques de bétons de 5 x 10 cm issus des éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm soumis aux protocoles expérimentaux dont chacune des techniques d'essais est brièvement décrite.

2. Etude expérimentale

2.1 Matériaux

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II/A 42.5 correspondant à la norme [NA 442/2000] provenant de la cimenterie de Béni-Saf. Il est constitué de 85% de clinker et 12 % de pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi (Béni-saf, Algérie); elle est aussi riche en silice et en alumine dont la grande partie est amorphe. Sa masse volumique est de 3071,2 kg/m³ avec une surface spécifique Blaine de 3598,13 cm²/g. sa composition chimique est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition chimique du ciment CEMII CPJ 42.5 (en %).

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | CaO _{LIBRE} | Perte au feu |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|----------------------|--------------|
| 27.97 | 5.43 | 3.05 | 56.37 | 0.71 | 2.53 | 0.75 | 3.11 |

Les granulats utilisés concassés provenant de la carrière de l'ENG Sidi-Abdelli (Tlemcen) sont de nature calcaire. Ils sont composés d'un sable de classe granulaire 0/4 de masse volumique apparente 1,47 g/cm³; et de trois types de graviers de classe granulaire 4/8, 8/15 et 15/25 de masse volumique apparente moyenne 1,35 g/cm³.

2.2 Composition des bétons

Les bétons ordinaires étudiés sont couramment utilisés en Algérie et sont formulés selon la méthode de Dreux-Gorisse. Leur composition est choisie au préalable sur la base de critères mécaniques [BOU, 07]. Ainsi quatre type de bétons sont étudiés, les constituants secs du béton sont constants : dosage en ciment de 350 kg/m³ et gravier + sable = 1769 kg et le rapport E/L varie dans l'intervalle de 0.45, 0.5, 0.55 et 0.60.

Les caractéristiques et propriétés mécaniques des bétons sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2. Propriétés mécaniques et caractéristiques des bétons [BOU, 07].

| Formulation de béton | Rapport E/L | Béton frais | | Béton durci |
|----------------------|-------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | | Affaissement (cm) | Masse volumique (kg/m ³) | Résistance à la compression (MPa) à 28j |
| I | 0.45 | 0 | 2447 | 42.75 |
| II | 0.50 | 0.8 | 2430 | 39.10 |
| III | 0.55 | 8.0 | 2381 | 34.10 |
| IV | 0.60 | 14.0 | 2340 | 29.50 |

2.3 Préparation des échantillons et Méthodes d'essais

La nécessité d'avoir des dimensions représentatives pour identifier les phénomènes de transfert, conduit à une simulation expérimentale sur des éprouvettes ayant une épaisseur représentative de la peau d'un ouvrage en béton.

Dans cette campagne d'essais, des éprouvettes de dimensions 11 x 22 cm ont été confectionnées. Après coulage, elles ont été démoulées après 24 heures, puis immergées dans l'eau à 20° C pendant 28 jours pour chaque béton conformément à la norme EN 206-1 et aux recommandations de l'AFPC-AFREM [AFR, 97].

A l'issue de la cure humide de 28 jours à l'eau, ces éprouvettes sont découpées de manière à en extraire trois disques de 50 mm d'épaisseur situés à égale distance des extrémités. Les disques sont ensuite rectifiés, et leur épaisseur mesurée avec une précision de 0,1 mm.

La surface latérale de chaque disque a été enduite de deux couches de résine époxy imperméable afin d'assurer un transfert monodirectionnel pour les essais de perméabilité et/ou de diffusivité. En revanche, les disques servant à la mesure de la porosité accessible à l'eau n'ont pas été imperméabilisés. Aussi, pour la détermination de la teneur en portlandite, la campagne d'essais a été réalisée sur quatre échantillons poudres issus de bétons secs préalablement broyés et tamisés pour ne récupérer que les tamis de dessous de 0.08mm. Les masses étudiées varient entre 30 et 50 mg.

Afin d'évaluer la durabilité de nos bétons en mettant en exergue l'influence de la variation du rapport E/L, selon l'indicateur de durabilité à déterminer, les différents échantillons ont subi un traitement préalable avant les essais, suivant les procédures AFPC-AFREM [AFR, 97].

2.3.1 Porosité accessible à l'eau

L'essai est réalisé sur des disques de 5 cm de hauteur et de 11 cm de diamètre. L'avantage de cet essai par rapport aux autres (volume des échantillons < 1 cm³) c'est la représentativité du matériau. La porosité accessible à l'eau (P %) est évaluée moyennant la mesure de trois masses en utilisant la relation 1.

$$P = \frac{(M_{air} - M_{sec})}{(M_{air} - M_{eau})} \quad [1]$$

Où M_{air} (g); M_{sec} (g) et M_{eau} (g) sont respectivement la masse de l'échantillon saturé pesé à l'air, la masse de l'échantillon sec et sa masse pesée sous l'eau.

2.3.2 Perméabilité à gaz

Les échantillons sont d'abord séchés dans une étuve à 60° C jusqu'à stabilisation de la masse [PIC, 00] et [CHO, 06]; en considérant que la masse est stabilisée lorsque la variation ne dépasse plus 0,5% pendant 24 heures. Puis, ils sont mis dans un dessiccateur étanche. Après le séchage, la perméabilité est déterminée en utilisant un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU (Figure 1).

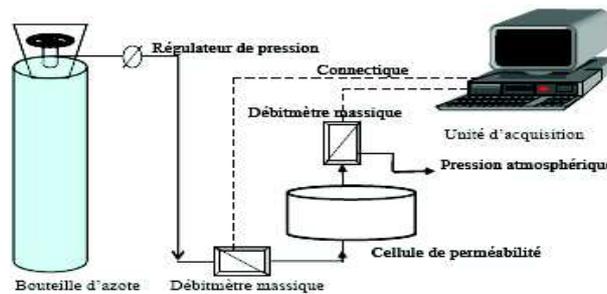


Figure 1. Perméamètre à gaz CEMBUREAU.

La détermination de la perméabilité intrinsèque K_v (m²) est évaluée à partir de la mesure de l'évolution de la perméabilité apparente K_a (m²) en fonction de l'inverse de la pression moyenne donnée par l'équation 2.

$$K_a = \frac{Q_1 2 \mu L P_{atm}}{S(P_1^2 - P_2^2)} \quad [2]$$

Où Q_1 est le débit volumique à l'entrée (m^3/s), μ la viscosité dynamique de l'azote à $20^\circ C$ égale à $1,74.10^{-5}$ (Pa.s), P_1 et P_2 sont les pressions d'injection et de sortie (Pa), P_{atm} la pression atmosphérique (Pa), L représente l'épaisseur de l'échantillon (m) et S la section (m^2).

2.3.3 Cellule de diffusion et évaluation de diffusivité

Les différents disques subissent un traitement préalable avant leurs mises en essai selon la procédure AFPC-AFREM [AFR, 97]. Après séchage à $60^\circ C$ jusqu'à stabilisation de la masse, nous procédons à une saturation sous vide à l'aide d'une solution basique contenant 1g/l de soude (NaOH) et 4.65g/l de potasse (KOH) préparée dans une eau déminéralisée. Cette solution support est choisie pour se rapprocher du pH de la solution interstitielle typique du béton afin de limiter la lixiviation concomitante à la pénétration des chlorures.

Le coefficient de diffusion effectif D_e (m^2/s) est déterminé en régime stationnaire à l'aide d'une cellule de diffusion (Figure 2) [TRU, 00]. Cette dernière présente deux électrodes d'alimentation qui permet d'appliquer un champ électrique et donc d'accélérer l'essai.

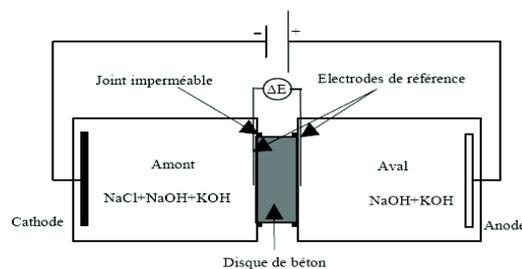


Figure 2. Dispositif et principe de l'essai de migration.

La cellule utilisée est une simulation du phénomène de transfert des ions chlorures à travers un béton en condition saturée. Un échantillon de béton d'épaisseur constante ($50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) et de diamètre 110 mm est placé entre deux compartiments cylindriques. Les deux compartiments sont remplis de solution 1g/l de NaOH et 4.65g/l de KOH, le compartiment amont contient une solution chargée en NaCl de concentration $C_{amont} = 30\text{g/l}$. Afin de maintenir les conditions aux limites constantes, les compartiments amont et aval sont renouvelés régulièrement et des variations respectives de 5% et de 1% de la concentration amont et aval sont respectées. L'arrêt de l'essai est conditionné par une évolution constante de la concentration

cumulée en fonction du temps. Deux échantillons (par prélèvement) de 50 ml sont dosés à chaque fois afin de déterminer la concentration en chlorures. Ce dosage se fait par titration potentiométrique avec du AgNO_3 à 0,05 M à l'aide d'un titrimètre.

Ainsi, l'évolution de la concentration cumulée de la solution du compartiment aval en fonction du temps est représentée par une courbe qui présente généralement deux parties : un régime non stationnaire composé d'une phase d'initiation où l'évolution de la concentration croît de façon non linéaire, et une deuxième phase où l'évolution de la concentration est linéaire. Le coefficient de diffusion est déterminé à partir de la pente de la droite et son intersection avec l'axe des abscisses permet de déterminer le temps de retard T_r . Ce dernier, dépend de l'isotherme d'interaction et de la porosité du béton.

Le coefficient de diffusion effective D_e est obtenu en régime permanent. Quand le flux devient constant, ce coefficient est calculé à partir de l'équation Nernst-Planck :

$$D_e = \left(\frac{RTL}{zFE C_0} \right) J \quad [3]$$

Avec C_0 : concentration du compartiment amont ($0,513 \text{ mol/m}^3$) supposé constante, et le flux des ions chlorures cumulé ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$) arrivant au compartiment aval durant un temps t , z est la valence de l'ion chlore ($z = 1$), F la constante de Faraday ($96480 \text{ J/V} \cdot \text{mol}$), E le champ électrique mesuré au bord des surfaces de l'échantillon (V), L l'épaisseur de l'échantillon (m), R la constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$), et T la température absolue (K).

2.3.4 Analyse thermogravimétrique : évaluation de la teneur en portlandite

L'ATG permet de mesurer la variation de masse de l'échantillon sous la variation de la température. La perte de la masse est calculée pendant un cycle thermique (température environ 1000°C) par rapport à une référence étalon. Cela permettra la détermination de la composition de l'échantillon.

Les thermogrammes obtenus sont analysés afin de quantifier les pertes de masse dues au départ de l'eau liée des différents hydrates qui composent notre béton. L'utilisation de la courbe dérivée DTG de l'analyse ATG permet de calculer, de manière plus précise, les pertes ou reprises de masse en identifiant nettement les températures de début et de fin de réaction. Enfin, les phases responsables des pertes de masse enregistrées, en particulier celles se décomposant aux environs de 400°C et 600°C , nous servent pour identifier l'indicateur de durabilité qui est la teneur en portlandite.

3. Résultats et interprétations

Les résultats des essais sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats relatifs aux indicateurs de durabilité du béton ordinaire étudié.

| Béton | Rapport E/L | Porosité accessible à l'eau P (%) | Perméabilité intrinsèque K_v ($m^2 \cdot E^{-17}$) | Coefficient de diffusion D_e ($m^2/s \cdot E^{-12}$) | Teneur en portlandite (mg/g de béton) | Classe de durabilité [AFG, 04] |
|-------|-------------|-----------------------------------|--|--|---------------------------------------|--------------------------------|
| I | 0,45 | 13.44 | 5.6 | 2.20 | 2.67 | Moyenne |
| II | 0,50 | 15.15 | 6.1 | 4.46 | 2.67 | Faible |
| III | 0,55 | 16.08 | 16 | 5.13 | 2.76 | Très Faible |
| IV | 0,60 | 16.42 | 15 | 7.07 | 3.29 | Très Faible |

En comparant les valeurs des porosités des échantillons testés, on remarque une différence importante due à la variation du rapport E/L. Ce paramètre a une incidence directe sur l'espacement initial des grains. Plus ce paramètre est faible, plus les grains sont rapprochés et ainsi les espaces à combler par les hydrates sont réduits.

Si nous prenons en compte l'effet de la porosité sur l'évolution de la résistance du matériau alors, nous observons que le béton à E/L = 0.45, est le plus compact donc le plus résistant.

La figure 3 montre l'évolution de la perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne pour les quatre bétons. Les différentes valeurs de perméabilité intrinsèque, déterminées par régression linéaire, sont résumées dans le tableau 3. On voit bien que les bétons de faible rapport E/L offrent une plus faible perméabilité. La perméabilité est fortement influencée par la présence de pores capillaires. En effet, les bétons ayant un rapport E/L faible offrent une porosité plus fine et moins étalée, d'où une perméabilité plus faible.

Les résultats montrent bien que la relation perméabilité - résistance mécanique est inverse.

Une analyse des courbes et des coefficients de corrélation nous montre les performances du dispositif de perméabilité pour notre étude. On remarque aussi que la perméabilité est trois fois plus quand le rapport E/L passe de 0,60 à 0,45. Cela est dû à la diminution de la continuité du réseau poreux et donc à la réduction de la porosité ouverte du béton. En effet, Picandet [PIC, 01] et Djerbi [DJE, 07] l'ont vérifié pour les bétons qu'ils ont étudiés.

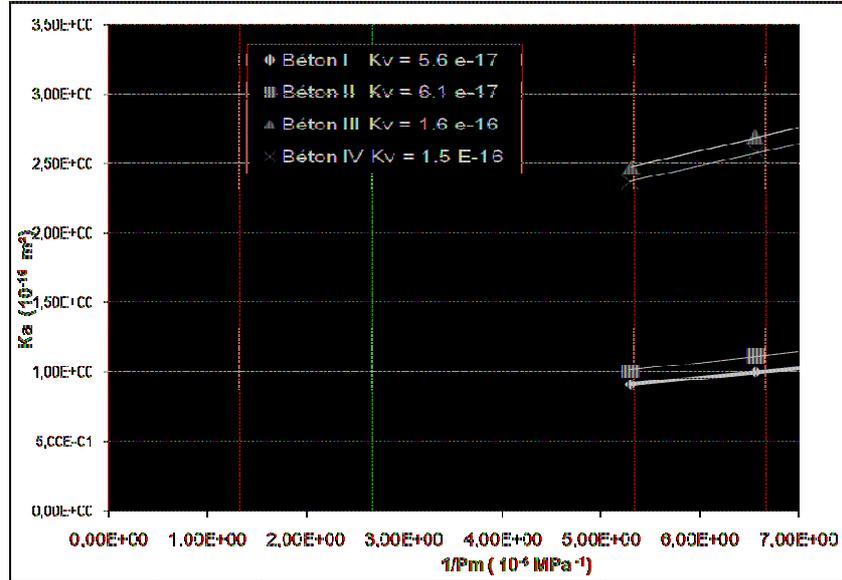


Figure 3. Evolution de la perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne $K_a = f(1/P_m)$ des échantillons des quatre bétons.

La figure 4 illustre l'évolution de la concentration cumulée des ions chlorures dans le compartiment aval en fonction du temps pour les 4 bétons étudiés.

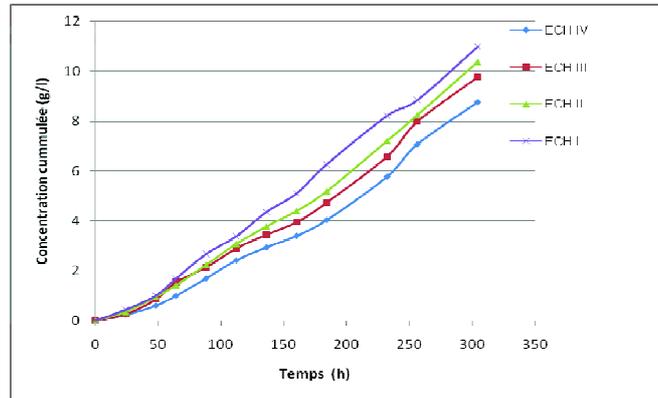


Figure 4. Evolution de la concentration cumulée des chlorures, en migration, en fonction du temps.

Les valeurs des coefficients de diffusion mesurés, ainsi que les temps de retard sont reportées dans le tableau 4.

Tableau 4. Coefficients de diffusion effectifs et temps de retard pour les bétons testés.

| Béton n° | Rapport E/L | Coefficient de diffusion D_e ($m^2/s \cdot E^{-12}$) | Temps de retard T_r (heures) |
|----------|-------------|--|--------------------------------|
| I | 0,45 | 2.20 | 98.50 |
| II | 0,50 | 4.46 | 72.50 |
| III | 0,55 | 5.13 | 54.77 |
| IV | 0,60 | 7.07 | 41.35 |

Pour calculer le coefficient de diffusion effectif D_e , on utilise la pente du régime stationnaire de chaque courbe dont la concentration évolue linéairement en fonction du temps (Figure 4). L'intersection de la droite avec l'axe des abscisses nous donne le temps de retard T_r . La figure 4 montre que le flux des ions chlorures, traversant le béton à un temps donné est plus important pour le béton IV que pour le Béton I.

On remarque en un premier temps que la diminution du rapport E/L de 0,6 à 0,45 engendre une augmentation du temps de retard et une diminution du coefficient de diffusion effectif (Tableau 4). Ceci est dû à la forte porosité du béton IV. En effet, selon que les pores soient interconnectés ou non, la dimension des chemins de pénétration des espèces agressives est fortement modifiée.

De plus, il a été constaté que le flux des chlorures devient plus important en passant du béton IV au béton I. A noter qu'on a obtenu pour le Béton I, une variation de l'ordre de 3 fois par rapport aux essais réalisés sur le béton IV. Pour les temps de retard, ces écarts sont limités à une variation relative de 25%.

Il a également été observé que la diffusivité est une fonction décroissante de la porosité accessible à l'eau du béton, pour l'ensemble de la gamme des matériaux testés. Ce résultat n'est pas surprenant étant donné que la porosité accessible à l'eau et résistance à la compression sont deux paramètres très bien corrélés entre eux.

On peut dire enfin que le rapport E/L conditionne également les mécanismes de pénétration des ions au sein de la matrice cimentaire. De même, la présence de pouzzolane dans le ciment utilisé entraîne une augmentation du temps de retard, et une diminution du coefficient de diffusion effectif des bétons étudiés.

En examinant les résultats issus de l'analyse thermogravimétrique (figure 5), il a été montré que la teneur en portlandite est globalement la même pour les quatre bétons (Tableau 3) même si leur rapport E/L diffèrent. En effet, les teneurs en portlandite mesurées sont conformes à la nature du ciment utilisé et ne varient que très peu en faisant varier la quantité d'eau dans le béton.

On rappelle qu'au cours de l'hydratation, l'ajout de la pouzzolane réagit avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour former des silicates qui viennent remplir les vides interfoliaires et ainsi diminuer l'interconnectivité des pores et fermer le chemin devant les chlorures. A long terme, la pouzzolane permet d'augmenter la capacité du matériau à fixer les chlorures et limiter leur pénétration. Ceci a été confirmé par d'autres auteurs étudiant les mortiers de ciments avec ajout

pouzzolanique [KAI, 09], ce qui consolide l'intérêt de l'utilisation du ciment composé CEM II 42,5.

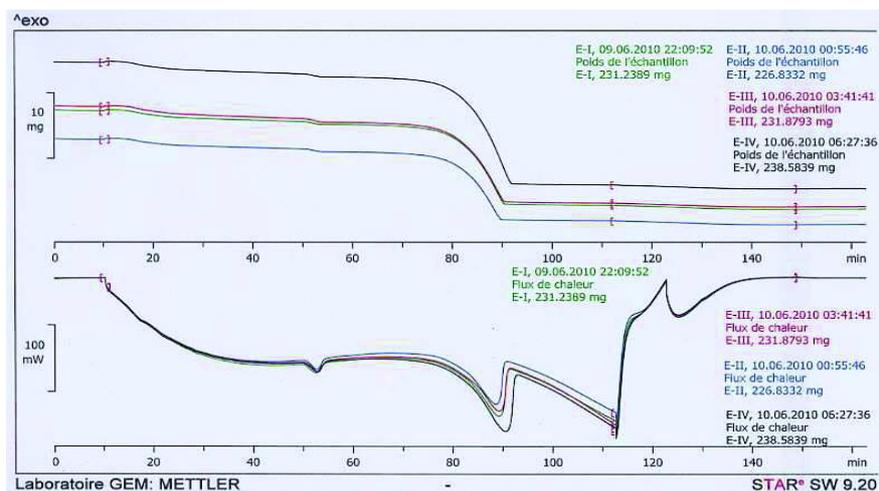


Figure 5. Résultats de l'analyse thermogravimétrique des quatre bétons étudiés.

4. Conclusion

Au terme de cette campagne de caractérisation des bétons étudiés, nous avons observé que la diminution du rapport E/L, influe sur la porosité globale du béton et notamment sa porosité ouverte, et rend le matériau plus compact et plus résistant vis-à-vis de la pénétration des chlorures. Selon la classification de l'AFREM, le béton dont le rapport E/L= 0,45 présente une durabilité moyenne et décline nettement les autres bétons étudiés, Cela est aussi confirmé par l'enregistrement d'une réduction des coefficients de perméabilités passant de 16 à $5,6 \text{ E}^{-17} \text{ (m}^2\text{)}$ et coefficients de diffusion passant de $7,07$ à $2,20 \text{ E}^{-12} \text{ (m}^2\text{/s)}$ quand le rapport E/L passe de 0,60 à 0,45.

Par ailleurs, la présence de pouzzolane dans le ciment utilisé même en petite proportion (12%) permet de réduire significativement les paramètres de transfert ainsi que ceux liés à la microstructure.

Ces résultats font l'objet de recommandations pour les entreprises algériennes en vue de garantir aux bétons fabriqués les meilleures performances de résistance mécanique et de durabilité. Ce qui aura pour conséquence, une plus grande résistance aux effets des milieux agressifs qui attaquent les aciers des ouvrages en béton. Enfin, ces résultats donnent aussi une indication intéressante sur la « qualité » des bétons fabriqués en Algérie.

Remerciements : Nos remerciements vont au projet de coopération Franco-Algérien Tassili (10MDU811) dont le financement nous a permis de réaliser ce travail de recherche.

5. Bibliographie

- [AFP, 97] AFPC-AFREM « Durabilité des bétons, Compte-rendu des journées techniques », 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, France.
- [AFG, 04] AFGC, « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité », « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages ». Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs, France; 2004.
- [AMI, 00] Amiri O., Aït-Mokhtar A., Dumargue P., « Optimisation de l'exploitation de l'essai d'électrodiffusion d'ions chlorures dans le béton », *Revue Française de Génie-Civil*, vol. 4, n°3, pp. 161-173, 2000.
- [ARL, 07] Arliguie, G. et Hornain, H., *Grandeurs associées à la durabilité des bétons (GranDubé)*. Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées; 2007.
- [BEN, 09] Ben fraj, A., « *Transfert dans les bétons non saturés : Influence des laitiers et de l'endommagement mécanique* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2009.
- [BAR, 05] Baroghel-Bony V., *Nouvelle approche performantielle et prédictive fondée sur les indicateurs de durabilité*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris France, p. 4. 2005.
- [BON, 97] Bonnet, S., « *Influence du chlore sur le comportement à l'équilibre et sur les propriétés de transfert de matériaux du génie civil* », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1997.
- [BOU, 07] Boukli Hacene, M.A., Ghomari, F. "Study of the compression resistance of local concretes". *Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering, ICSGE, Cairo, Egypt, 10-12 December 2007, pp.1005-1014.*
- [CHO, 06] Choinska, M., « *Effet de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure* », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2006.
- [DJE, 07] Djerbi A., "Influence de l'endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlorure des bétons", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2007.
- [KAI, 09] Kaid N., Cyr M., Khelafi H., Goufi N. « Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques à l'eau de mer et aux sulfates », *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.*
- [KHE, 05] Khelidj A., Bonnet S., « La durée de vie des ouvrages en béton armé situés sur la façade atlantique Report n°2-1 » *Concrete in marine environment MEDACHS - Interreg IIIB Atlantic Space - Project N°197, 2005.*

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

- [MEH 1986] Mehta, P.K., *Concrete: structure, properties and materials*, Prentice-Hall, Ed., pp. 105-169, 1986.
- [NEV, 00] Neville Adam M., *Propriétés des bétons*, édition Eyrolles septembre 2000, 824 p.
- [OLL, 08] Ollivier J.P., Vichot A., *La durabilité des bétons*, édition Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 868 pages, 2008.
- [PIC, 01] Picandet, V., « *Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2001.
- [ROZ, 07] Roziere Emmanuel, « *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2007 France.
- [TON, 01] Tong L., O.E. GjØrv, « Chloride diffusivity based on migration testing », *Cem. Concr. Res.* 31 (7) (2001) 973–982.
- [TOU, 09] Touil B., « *Etude des performances de durabilité des bétons au contact de l'eau de mer* », Mémoire de magister, Université de Tlemcen, Algérie ; 2009.
- [TRU, 00] Truc O., « A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state diffusion test », *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 217-226, 2000.