



**HAL**  
open science

# CONTRIBUTION A L'ESTIMATION DE LA PERMEABILITE A L'AIR DES BETONS PAR LES VITESSES DES ULTRASONS

Mehamdia Ali, Benouis Abdelhalim Abdelhalim

► **To cite this version:**

Mehamdia Ali, Benouis Abdelhalim Abdelhalim. CONTRIBUTION A L'ESTIMATION DE LA PERMEABILITE A L'AIR DES BETONS PAR LES VITESSES DES ULTRASONS. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167663

**HAL Id: hal-01167663**

**<https://hal.science/hal-01167663>**

Submitted on 24 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Contribution à l'estimation de la perméabilité à l'air des bétons par les vitesses des ultrasons

Mehamdia Ali<sup>1</sup>, Benouis Abdelhalim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), Université 08 Mai 1945 Guelma 24000. Algérie.

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), Université 08 Mai 1945 Guelma 24000. Algérie.

---

*RÉSUMÉ.* Les propriétés de transport du béton, principalement la perméabilité, jouent un rôle clé dans l'évaluation et la prévision de la durabilité des structures en béton armé. En effet, la perméabilité aux gaz est un indicateur majeur pour évaluer la capacité du matériau à résister à la pénétration d'espèces chimiques agressives. Le présent travail consiste à estimer la perméabilité à l'air par des mesures de vitesses ultrasonores des ondes de surface (ondes de Rayleigh) pour différentes compositions du béton. Ceci dans le but d'un diagnostic non destructif de l'auscultation in-situ d'ouvrage en se substituant aux carottages nécessaires aux essais traditionnels de perméabilité. Six compositions de béton ordinaire de différents rapports E/C et deux bétons autoplaçants avec deux ajouts différents ont été utilisés. Cette étude a montré une augmentation de la perméabilité avec l'accroissement du rapport E/C. La perméabilité des bétons conservés à l'air libre est plus importante que celle des bétons conservés dans l'eau. Il est observé une diminution de la vitesse des ondes de surface quand le rapport E/C augmente et ceci est dû à l'augmentation de la porosité. Les vitesses des ultrasons sont beaucoup plus variables dans les bétons fluides que dans les bétons plastiques. La vitesse des ultrasons pour le BAP1 (fillers calcaires) est 15% supérieure à celle du BAP2 (laitier de hauts fourneaux). La corrélation entre la perméabilité et la vitesse des ondes de surface est de type linéaire, cette corrélation est meilleure dans les bétons ordinaires, et devient moins précise en intégrant les bétons autoplaçants avec les bétons ordinaires. L'estimation de la perméabilité à partir des vitesses des ultrasons est plus fiable pour les bétons conservés dans l'eau (essais normalisés) que ceux conservés à l'air libre. Ces relations sont de type linéaire avec une évolution inversement proportionnelle de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons.

*ABSTRACT.* Concrete transport properties, mainly permeability, play an important role in assessing and predicting the durability of reinforced concrete structures. Indeed, gas permeability is a major indicator of the material's ability to resist the penetration of aggressive chemical species. The present work is to estimate the air permeability by ultrasonic pulse velocities of surface waves (Rayleigh wave) for different concrete mixtures. With the aim of a non-destructive diagnosis of in-situ auscultation to replace traditional coring necessary permeability tests. Six compositions of ordinary concrete with different W/C ratios and two self compacting concretes with two different additions were used. This study showed an increase in permeability with increasing W/C ratio. The permeability of concretes conserved in air is higher than that of concrete conserved in water. Ultrasound velocities are much more variable in the fluid concrete than in the plastic concrete. Ultrasonic velocity for BAP1 (limestone filler) is 15% higher than for BAP2 (blast furnace slag). The correlation between permeability and velocity of surface waves is linear, this correlation is better in ordinary concrete, and becomes less accurate by integrating self-compacting concrete with ordinary concrete. Estimating the permeability from the ultrasonic velocity is more reliable for the concrete conserved in water (standard tests) than those at air. These relationships are linear with evolution inversely proportional of permeability as a function of ultrasonic velocities.

*MOTS-CLÉS :* béton, résistance, perméabilité à l'air, ultrasons, ondes de surface.

*KEY WORDS :* concrete, resistance, air permeability, ultrasonic, surface waves.

---

## 1. Introduction

Les récentes préoccupations au sujet de la performance à long terme du béton conduit à se focaliser sur les paramètres qui contrôlent la durabilité et méthodes d'essai pour quantifier ces paramètres [KOL 89].

Dans les structures en béton, la durabilité du béton et la corrosion de l'acier d'armature sont intimement liés à la perméabilité des surfaces en béton exposées [ALD 99]. Par conséquent, la perméabilité, définie comme le mouvement d'un fluide dans un milieu poreux sous une charge de pression appliquée, est la propriété la plus importante du béton régissant sa durabilité à long terme [BAN 05]. Donc, la perméabilité aux gaz des bétons est considérée comme un indicateur majeur de la durabilité des ouvrages en béton armé, car elle régit la pénétration d'agents agressifs gazeux, comme le dioxyde de carbone ainsi que le transfert de vapeur d'eau liée au séchage du matériau [CAR 11].

La caractérisation non destructive des milieux hétérogènes joue un rôle primordial dans la pérennisation des structures du génie civil. L'estimation de leur potentiel de vie restant, permettrait d'améliorer la qualité et la sécurité et de prolonger leur conformité. Elle donnerait accès à des méthodes de prédiction des risques et donc à une meilleure gestion des investissements. Il est de ce fait important de mettre en œuvre des techniques performantes et adaptées au contrôle des structures. Récemment, plusieurs tentatives ont été effectuées pour estimer la porosité et/ou la perméabilité des échantillons de béton en utilisant les techniques des ultrasons [GOU 09].

Pour cela, les méthodes ultrasonores avancées ont le potentiel d'être des outils rapides, fiables et intrinsèquement sûrs pour fournir des informations quantitatives sur les caractéristiques initiales du béton frais et, par la suite, pour l'évaluation de l'état in situ. Les ultrasons sont de techniques qui permettent de déterminer les caractéristiques d'un milieu souvent très hétérogène. Il apparaît cependant que les plus porteuses d'informations semblent être celles qui exploitent les ondes ultrasonores. Comme toutes les techniques de contrôle non destructif, il est nécessaire de relier les grandeurs observables, la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores, aux évolutions matériau [PUN 07] & [ROS 07].

Le présent travail consiste à estimer la perméabilité à l'air par des mesures des vitesses ultrasonores des ondes de surface (ondes de Rayleigh) pour différentes compositions du béton. Ceci dans le but d'un diagnostic non destructif de l'auscultation in-situ d'ouvrage en se substituant aux carottages nécessaires aux essais traditionnels de perméabilité. Six compositions de béton ordinaire de différents rapports E/C et deux bétons auto plaçant avec deux ajouts différents ont été utilisées dans cette étude.

## 2. Programme expérimental

### 2.1. Compositions des bétons et corps d'épreuve

L'étude est réalisée sur six bétons ordinaires et deux bétons autoplaçants. Les bétons ordinaires formulés avec les mêmes quantités des différents constituants granulaires mais à base de plusieurs rapports E/C. Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland (CPJ-CEM II/A 42.5) composé de la cimenterie de Hadjar Soud (Nord Est d'Algérie), Les différents granulats (sable 'S1' et gravier) proviennent de la carrière de Ben Djerrah wilaya de Guelma, et le sable 'S2' provient de la région d'Oum Ali Wilaya de Tébessa. Pour les deux bétons autoplaçants, on a utilisé un superplastifiant 'MEDAPLAST SP40' fabriqué par Granitex, et deux ajouts, fillers calcaires et laitier granulat des hauts fourneaux. Les compositions des différents bétons sont présentées sur le tableau 1.

**Tableau 1.** Composition des bétons.

Matériaux (kg/m <sup>3</sup> )	BO1	BO2	BO3	BO4	BO5	BO6	BAP1	BAP2
Ciment	400	400	400	400	400	400	400	400
Eau	188	210	220	240	260	280	196	196
Sable (S1)	813	813	813	813	813	813	--	--
Gravier 5/15	946	946	946	946	946	946	865	865
Sable (S2)	--	--	--	--	--	--	765	765
Fillers	--	--	--	--	--	--	80	--
Laitier	--	--	--	--	--	--	--	80
Superplastifiant	--	--	--	--	--	--	6.8	6.8
Affaissement (cm)	6.0	6.5	9.0	13.1	17.0	25.0	--	--
Etalement (cm)	--	--	--	--	--	--	72.0	68.0
E/C	0.47	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70	0.50	0.50
Résistance (MPa)	34.2 ±2.30	29.39 ± 2.10	25.86 ± 2.09	21.80 ± 0.80	20.36 ±1.53	18.98 ± 0.82	25.20 ± 3.85	26.45 ± 0.72

### 2.2. Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface

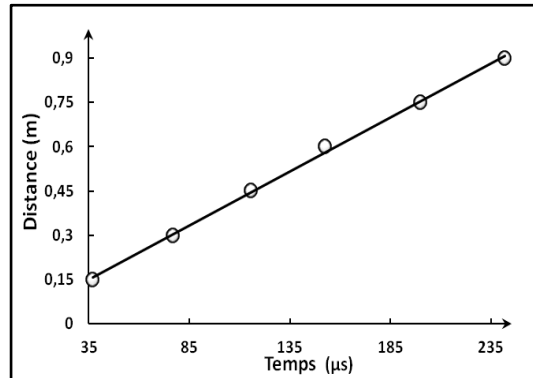
La vitesse de l'onde de surface (onde de Rayleigh) est mesurée en utilisant un générateur d'impulsions ultrasonores 58-E0048 (marque Controls) et deux transducteurs (émetteur, récepteur) de fréquence 54 kHz de diamètre 49.5 mm qui sont mis en contact avec la surface des éprouvettes par l'intermédiaire d'un couplant.

L'émetteur est fixe, le récepteur se déplace à pas constant (15 cm) (fig.1). Les vitesses ont été déterminées par des mesures du temps d'une impulsion traversant la surface du béton [BEN 11].

Les mesures ultrasonores des ondes de surface ont été réalisées sur des poutrelles de dimensions 15x15x100 cm<sup>3</sup> (3 poutrelles pour chaque composition).



**Figure 1.** Dispositif pour la mesure des paramètres des ondes de surface.



**Figure 2.** Estimation de la vitesse de l'onde de surface.

### 2.3. Dispositif de mesure de la perméabilité à l'air

La perméabilité a été mesurée à l'aide d'un perméabilimètre à charge constante de type CEMBUREAU, cette méthode utilisée en diverses variantes, fait partie des méthodes standard pour déterminer la perméabilité au gaz d'un béton en laboratoire.

L'essai consiste à soumettre le corps d'épreuve à une pression constante de gaz. La perméabilité apparente  $k_a$  en m<sup>2</sup>, est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz  $Q$  (en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), en régime permanent, avec l'hypothèse d'un flux laminaire, à une pression donnée, en utilisant la loi de Hagen –Poiseuille :

$$k = \mu \frac{2 Q P_0 L}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (m^2) \quad [1]$$

- K coefficient de perméabilité spécifique [m<sup>2</sup>] (perméabilité à l'air)
- A section de l'éprouvette [m<sup>2</sup>]
- Q débit du gaz [m<sup>3</sup>/s]
- L épaisseur de l'éprouvette dans la direction de l'écoulement
- $\mu$  viscosité dynamique du gaz d'essai [Ns/m<sup>2</sup>] (dans notre étude c'est l'air à 20°C:  $\mu=1,82 \cdot 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>)
- P pression d'entrée (absolue) [N/m<sup>2</sup>]
- $P_a$  pression de sortie (absolue) [N/m<sup>2</sup>] (pour ce test, cela correspond à la pression atmosphérique)
- $P_0$  pression à laquelle le débit est mesuré [Ns/m<sup>2</sup>] (habituellement:  $P_0 = P_a$ ) [KUR 00] [VER 02]

L'essai a été réalisé sur trois éprouvettes cylindriques (15x5 cm<sup>2</sup>) de chaque composition de béton à 28 jours avec deux modes de conservation (à l'air libre et dans l'eau). Le montage nécessaire à la réalisation de cet essai est présenté par la figure 4.



Figure 3: Mesure de la perméabilité à l'air selon la méthode Cembureau.

### 3. Résultats et discussions

Tableau 2. Vitesses des ondes de surface et perméabilités pour les différents bétons.

E/C	Béton	V (m/s)	Perméabilité à l'air $K \cdot 10^{-17}$ (m <sup>2</sup> )	
			Cure à l'air libre	Cure dans l'eau
0.47	BO1	3700 ± 100	24.5 ± 0.9	0.38 ± 0.04
0.50	BAP1	3766 ± 300	54.7 ± 8.5	0.448 ± 0.024
0.50	BAP2	3200 ± 100	18.9 ± 1.8	0.758 ± 0.066
0.52	BO2	3634 ± 100	40.5 ± 0.5	0.64 ± 0.06
0.55	BO3	3534 ± 300	57.0 ± 6.5	0.695 ± 0.03
0.60	BO4	3200 ± 200	66.1 ± 7.4	0.80 ± 0.08
0.65	BO5	3167 ± 200	91.2 ± 12.7	1.172 ± 0.038
0.70	BO6	2600 ± 200	98.5 ± 2.0	3.201 ± 0.138

#### 3.1. Relation entre la perméabilité et le rapport E/C

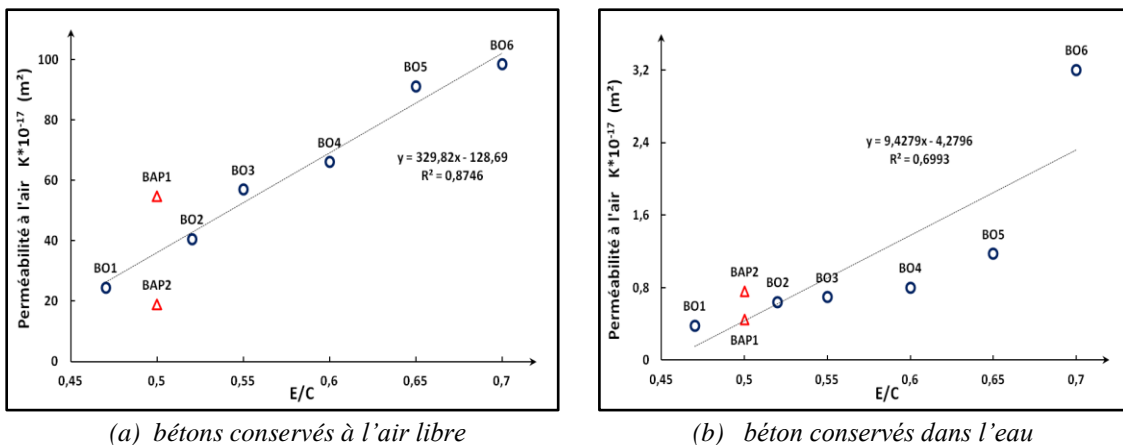


Figure 4: Evolution de la perméabilité à l'air (K) en fonction du rapport E/C

La figure 4 illustre la variation de la perméabilité à l'air en fonction du rapport E/C pour deux modes de conservations, à l'air libre et dans l'eau. Les résultats montrent une variation quasiment linéaire entre la perméabilité à l'air et le rapport E/C. On note une augmentation importante de la perméabilité (63%) pour les bétons conservés dans l'eau pour E/C variant de 0.65 à 0.70 (bétons fluides). Les bétons conservés à l'air libre ont présenté des coefficients de corrélations meilleures (proche de 1) que les bétons conservés dans l'eau. La perméabilité des bétons conservés à l'air libre est plus importante que celle des bétons conservés dans l'eau.

Pour les éprouvettes conservées dans l'eau le BAP1 a présenté une perméabilité inférieure à celle du BAP2, contrairement à la conservation à l'air libre où le BAP1 présente une perméabilité supérieure à celle du BAP2.

### 3.2. Relations entre la vitesse des ultrasons et le rapport E/C

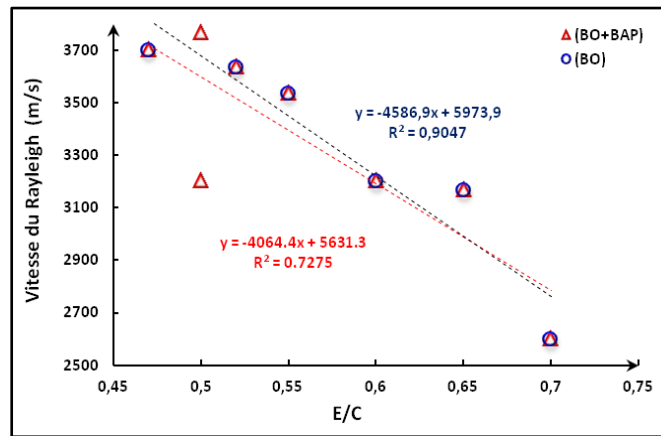
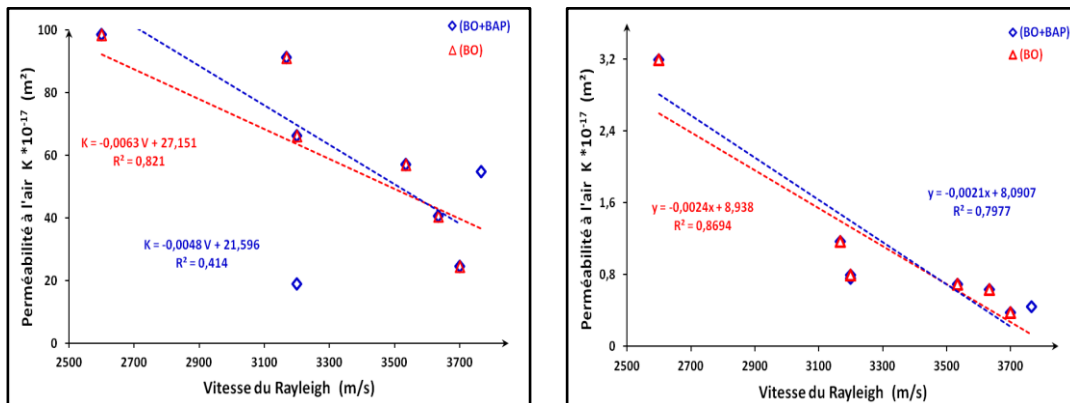


Figure 5: Relation entre la vitesse de propagation des ondes de surface et le rapport E/C

La figure 5 présente la variation de la vitesse de propagation de l'onde de surface en fonction du rapport E/C. Les résultats montrent une diminution de la vitesse de surface quand le rapport E/C augmente et ceci dû à l'augmentation de la porosité. La diminution de la vitesse est plus importante pour le rapport E/C variant de 0,65 à 0,70 qui se reflète par une diminution des vitesses des ultrasons de 18%. Donc, les vitesses des ultrasons sont beaucoup plus variables dans les bétons fluides que dans les bétons plastiques. La vitesse ultrasonore dans le BAP1 (fillers calcaires) est supérieure à celles dans les bétons ordinaires, et 15% supérieure à celle dans le BAP2 (laitier de hauts fourneaux). On remarque que la relation entre la vitesse des ultrasons et les rapports E/C des bétons est de type linéaire, cette relation est meilleure dans les bétons ordinaires ( $R^2=0.90$ ), et le devient moins en intégrant les BAP avec les bétons ordinaires ( $R^2=0.72$ ).

### 3.3. Relations entre la vitesse des ultrasons et la perméabilité



(a) bétons conservés à l'air libre

(b) béton conservés dans l'eau

Figure 6: Evolution de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons

La figure 6 montre une augmentation de la vitesse des ondes de surface avec une diminution de la perméabilité à l'air, ceci est valable pour les deux états hygrométriques (dans l'eau et à l'air libre). Les résultats relèvent une corrélation de type linéaire entre les vitesses des ultrasons et la perméabilité à l'air, cette corrélation est plus fiable dans les bétons ordinaires ( $R^2=0.87$  et  $R^2=0.82$ ) pour les deux modes de conservation. Elle devient moins précise en intégrant les deux BAP avec les bétons ordinaires. Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus par PANZERA [PAN 08] et LAFHAJ [LAF 06], ces derniers ont réalisés des mesures de vitesse des ultrasons sur des bétons de différents gammes de saturation (saturation complète, partielle et sec) et ont abouti à une diminution linéaire des vitesses des ondes ultrasonores avec l'augmentation de la porosité et de la

perméabilité. Donc ces relations permettent une estimation de la perméabilité des bétons par ces mesures ultrasoniques.

#### 4. Conclusion

Ce travail a été mené pour étudier la relation entre la perméabilité à l'air et la vitesse de propagation de l'onde de surface (onde de Rayleigh) dans un matériau à matrice cimentaire. Ceci dans le but de substituer ces essais non destructifs aux essais destructifs de perméabilité réalisés sur des carottes prélevées sur les ouvrages à ausculter. Les mesures des vitesses des ultrasons ont été menées en mode de transmission surfacique pour pouvoir ausculter tous les éléments d'ouvrage (poteaux, poutres, planchers, ...) avec la facilité d'accessibilité. L'étude a concerné six bétons ordinaires et deux bétons autoplaçants et a mené aux conclusions suivantes :

- Une augmentation de la perméabilité avec l'accroissement du rapport E/C.
- La perméabilité des bétons conservés à l'air libre est plus importante que celle des bétons conservés dans l'eau.
- Une diminution de la vitesse de surface quand le rapport E/C augmente et ceci dû à l'augmentation de la porosité. La diminution de la vitesse est plus importante entre le rapport E/C variant de 0,65 à 0,70 et conduit à une diminution des vitesses des ultrasons de 18%. Les vitesses des ultrasons sont beaucoup plus variables dans les bétons fluides que dans les bétons plastiques.
- La vitesse des ultrasons pour le BAP1 (fillers calcaires) est 15% supérieure à celle du BAP2 (laitier de hauts fourneaux).
- La corrélation entre la perméabilité et la vitesse des ondes de surface est de type linéaire, cette corrélation est meilleure dans les bétons ordinaires, et devient moins précise en intégrant les bétons autoplaçants avec les bétons ordinaires.
- L'estimation de la perméabilité à partir des vitesses des ultrasons est plus fiable pour les bétons conservés dans l'eau (essais normalisés) que ceux conservés à l'air libre. Ces relations sont de type linéaire avec une évolution inversement proportionnelle de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons.

Donc on peut conclure par ces relations que la perméabilité à l'air des bétons peut être estimée à partir des mesures non destructives par ultrasons, mais il reste à confirmer ces relations avec des mesures pour des structures en béton étudiés in situ.

#### 5. Bibliographie

- [KOL 89] KOLLEK J.J., The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation, *Materiels and structures. Matériaux de constructions* 1989. 22.225.230
- [ALD 99] ALDEA C.-M., SHAH S. P., KARR A., Permeability of cracked concrete. *RILEM Materials and Structures*. vol. 32, (1999), PP. 370-376.
- [BAN 05] Banthia N., BIPARVA A., MINDESS S., Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, (2005), pp. 1651 – 1655.
- [CAR 11]. CARÉ S., DERKX F. Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. *Construction and Building Materials*, vol. 25, (2011), pp. 1248 – 1256.
- [GOU 09] GOUYGOU M., LAFHAJ Z., SOLTANI F., Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT&E International* vol. 42, (2009), pp 353–360.
- [PUN 07] PUNURAI W., & AL., Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, (2007), pp 38 – 46.
- [ROS 07] ROSSAT M., CORNELOUP G., GARNIER V., CHAIX J.F., Amélioration de la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux diphasiques. *18<sup>ème</sup> congrès français de mécanique*. Grenoble 27-31 aout 2007.
- [BEN 11] BENOUS A., GRINI A., Estimation of concrete's porosity by ultrasounds. *Sciencedirect. Physics Procedia*. Volume 21, 011, p 53–58.
- [KUR 00] KURT H., Perméabilité au gaz des bétons, *Bulletin du ciment* 68 [10], 3-6, 2000.
- [VER 02] VERONIQUE B. B., & AL., Caractérisation microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. *Méthode d'essais N° 58*. LCPC. Février 2002.
- [PAN 08] PANZERA T. H., RUBIO J. C., BOWEN C. R., VASCONCELOS W. L., STRECKER K. Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites. *Advances in Cement Research*, Vol. 20, No. 3, July, 2008, pp. 101–108.
- [LAF 06] LAFHAJ Z., GOUYGOU M., DJERBI A., KACZMAREK M., Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/ cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, (2006), pp 625 – 633