

# Comparaison entre les modules d'élasticité d'un béton autoplaçant exposé à hautes température par deux méthodes de fréquence de résonance

BENOUDJAFER imane<sup>1</sup>, BENOUDJAFER ibtissam<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique et structures(LMS), Université de Tahri Mohammed Béchar(UTMB)

[imenousse@yahoo.fr](mailto:imenousse@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Faculté de Technologie, Université de Tahri Mohammed Béchar(UTMB)

**Abstract**— Cet article a pour but principal de présenter une comparaison entre le module d'élasticité déduit par deux méthodes de fréquence de résonance. Le matériau testé est un béton autoplaçant soumis aux différents stades de températures élevées jusqu'à 550°C. Cette comparaison repose principalement sur l'utilisation de variétés procédées expérimentaux, conduisant à l'extraction des paramètres modaux à partir de l'analyse de fréquence de résonance. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les modules d'élasticités, déterminés par les deux méthodes expérimentales sont proches.

**Keywords**— béton autoplaçant, fréquence de résonance, température, module d'élasticité,

## I. INTRODUCTION

Les travaux menés sur maniabilité des bétons ont permis la mise au point des autoplaçants (BAP) [1]. Cette nouvelle catégorie de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau facile à mettre en œuvre, sans faire appel à la vibration, présentant de nombreux avantages sur les chantiers et en usines de préfabrication [2]. Ces bétons sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences de maniabilité et de stabilité [15].

En effet, les essais de laboratoires sont habituellement effectués à une température contrôlée, normalement constante, généralement choisie entre 20 et 25°C, de sorte que la plupart des informations de base sur les propriétés des bétons durcis sont fondées sur la connaissance de comportement du béton à ces températures [11]. Cependant, en pratique, les ouvrages en béton sont toujours susceptibles d'être soumis à une action thermique : pour des raisons fonctionnelles, climatiques, accidentelles et en fin particulières (démolition partielles ou locale par procédé thermique) [14].

Par conséquent, le béton demeure en pratique à différentes températures, ce qui implique une réflexion sur l'opportunité de l'état des ouvrages portés aux différents gradients thermiques et sur la notion de risque lié à leur maintien dans

les conditions fonctionnels qu'il rencontre dans le temps [16]. La connaissance de l'état des ouvrages et leur évaluation est donc un enjeu majeur pour décider des interventions de réparation et pour en évaluer le rapport coût / utilité. C'est pourquoi, une gamme d'essais in situ, appelés essais en place, a été développée [1]. Ces essais sont traditionnellement appelés essais non destructifs, étant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure, sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence [11]. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps [4]. L'utilisation d'essais non destructifs entraîne une plus grande sécurité et une meilleure planification de la construction, de sorte que l'on peut progresser plus rapidement et plus économiquement [5].

C'est dans ce contexte de nécessités de compréhensions, d'une part, des données sur le comportement du béton autoplaçant exposé à la température pour la prévision de la sûreté des bâtiments [2] et des constructions en réponse à certains accidents ou à états particuliers durant son fonctionnement, et d'autre part, de l'évolution des propriétés intrinsèques du matériau béton et de celle de l'évolution générale des structures, qu'émergent et s'affirment les techniques non destructives de contrôles [3]. Ce qui rend possible l'étude des évolutions d'une ou plusieurs caractéristiques dans le temps [10]. Le contrôle non destructif offre également la possibilité d'évaluer la qualité d'un béton dans un ouvrage existant et suivre la santé du béton dans le temps [21]. Cette étude a donc pour but principal de caractériser un béton autoplaçant formulé à base des matériaux locaux ayant subi des températures élevées jusqu'à 550°C, à partir de deux méthodes d'analyse mécanique de fréquence de résonance.

## II. PROCEDURE EXPERIMENTALE

### A. Matériaux formulation et mise en œuvre du béton

Dans le cadre de ce travail expérimental, le choix des matériaux (agrégats et filler calcaire) a été dicté par leurs

disponibilités de la région d'Ain Sefra. Ces matériaux proviennent de la carrière de Djebel Ben Hendjir qui se trouve sur l'axe routier Ain Sefra et Sfissifa. Nous avons utilisés deux classes granulaires de gravier (3/8,8/15) de natures concassés, un seul type de sable (0/3), les fillers calcaires qui représentes l'addition calcaire, aussi un ciment Portland résistant aux sulfates de classe 42,5 « CPJ-CEM II/A 42,5 », et un superplastifiant « SIKAVISCOCRETE 3040 », à haut performance du troisième génération exempté de chlorures prêt à l'emploi, Il est conçu à base de polycarboxylates modifiés qui se présent sous la forme d'un liquide brun.

TABLE I  
caractéristiques physiques et chimiques des fillers calcaires

Carbonates	Insolubles	Sulfates	Chlorures
86.20	13,70	nul	0.10
Bleu de méthylène « VB »	Densité absolue	Densité apparente	Fines <63µm
0.41	2.58	1.62	82

La méthode de formulation utilisée pour concevoir le BAP testé dans cette étude expérimentale est une méthode empirique basée sur l'optimisation du squelette granulaire, permettant, d'une part, d'identifier les différents constituants, et d'autre part, d'alimenter une base de données efficace accédant à l'étude des mélanges de diverses combinaisons des constituants afin d'obtenir un béton qui sera satisfaisant à un cahier des charges donné.

TABLEAU 2  
Composition de béton formulé

Composant	Composition (Kg/m3)
Gravier 8/15	582.50
Gravier 3/8	311.10
Sable	892.42
Filler calcaire	128
Ciment	350
Viscocrete 3040	4.10
L'eau efficace	157.5
Masse volumique du béton frais	2425.62

La caractérisation à l'état frais des bétons a été limitée aux essais recommandés par l'AFGC, à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en « L » et la stabilité au tamis, Figure 1.

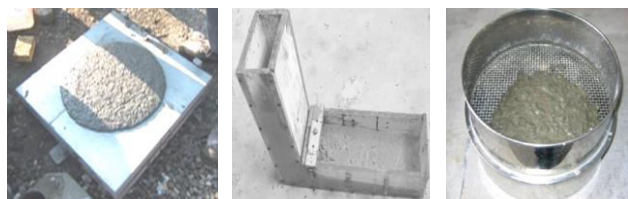


Figure 1 : Essais pour la caractérisation du béton testé à l'état frais

✓ L'essai d'étalement (BAP) :

Cet essai permet de démouler un cône normalisé dite « DIN » (ou cône d'Abrams), de béton frais testé afin de mesurer le diamètre de la galette formulée. Il faut rappeler, qu'un béton est considéré comme autoplaçant, quand la galette mesurée forme un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres. Le temps d'écoulement intermédiaires a été mesuré permettant d'atteindre un diamètre de 50 cm, noté  $t_{50}$  [AFGC, 00].

✓ L'essai de la boîte en « L » :

L'essai de la boîte en « L » a été effectué pour tester la mobilité du béton confectionné et de vérifier que sa mise en place. pour ce faire, plus de 13 litres de béton ont été mis dans la partie verticale puis laisser pour reposer pendant 1 minute. La trappe a été ensuite levée et le béton a été écoulé dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, les différents hauteurs H1, H2 ont été mesurés pour exprimer en terme de taux de remplissage donné par la fraction de (H2/H1).

✓ L'essai de stabilité au tamis :

cet essai consiste à mesurer la proportion  $\pi$  d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm afin de qualifier le béton vis-à-vis la ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes [AFGC, 00]:

- ✓ 0 % <  $\pi$  (laitance) < 15 % : stabilité satisfaisante ;
- ✓ 15 % <  $\pi$  (laitance) < 30 % : stabilité critique ;
- ✓  $\pi$  (laitance) > 30 % : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

Les résultats des essais de caractérisation réalisés sur le béton confectionné sont récapitulées dans le Tableau 3, avec toutes les mesures expérimentales nécessaires pour réaliser les différents essais de caractérisation. À noter que les valeurs reportées dans le tableau constituent une moyenne.

Tableau 3  
Caractérisation du béton étudié.

Etalement	Dmoy (cm)	62
	T50(s)	2,10
L-box	H2/H1	0,83
	T40(s)	3,60
Stabilité au tamis	$\pi$ (%)	6,32

Il faut mentionner, qu'avant chaque essai, les extrémités des éprouvettes cylindriques ont été rectifiées par une rectifieuse des éprouvettes, selon la norme [EN 12390-2].

### III. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

#### A. Analyse par ondes ultrasonores

Les méthodes ultrasoniques sont des techniques efficaces permettant de contrôle non destructif des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés [6]. En effet, ces outils sont largement adaptés à une très vaste gamme de matériaux. Pour les bétons, qui sont caractérisés par des milieux hétérogènes à l'échelle microscopique, l'analyse ultrasonore permet d'autoriser l'évaluation de ses caractéristiques mécaniques avec une échelle de la longueur d'onde.

Ce type d'analyse repose sur un principe physique très simple qui réside sur le déplacement des ondes traversé dans un milieu donné [12]. Ainsi, il est intéressant de noter que les modifications des paramètres mesurables associés au passage d'une onde ultrasonore sont [13] : le temps de propagation, le contenu fréquentiel, l'atténuation et la diffusion de l'onde [5]. Ces différents paramètres peuvent être directement corrélés aux changements des propriétés physiques et mécaniques comme la raideur, le module élastique, etc... [8,23]. Le principe de base du contrôle ultrasonore consiste à envoyer une onde élastique par l'intermédiaire d'un transducteur dans le matériau à contrôler [7,28].

Dans le cadre de notre étude expérimentale, nous avons utilisé un banc d'essais avec un contact direct comme montre la figure 2. Ce dispositif expérimental se décompose d'un générateur d'impulsions, d'un émetteur et d'un récepteur piézoélectrique permettant de transformer un signal électrique en onde ultrasonore.

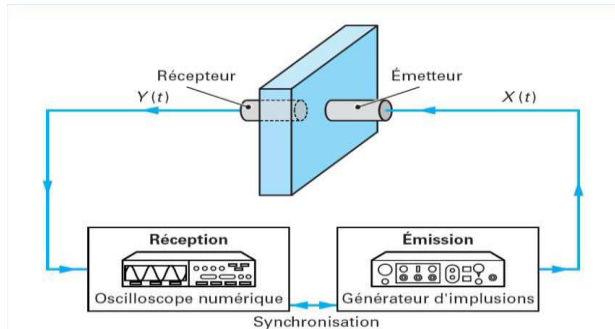


Figure 2 : Schéma descriptif de transmission en contact direct [13]

Dans ce travail expérimental, nous avons utilisé un excitateur qui se caractérise par une fréquence fondamentale inférieure à 54 kHz. Ce type des ondes émises permet de se propager dans un milieu de couplage avec lequel le matériau est en contact [24]. En revanche, le récepteur piézoélectrique permet de recevoir le signal ultrasonore transmis au travers du matériau testé [4,27]. Le signal formé a été mesuré à l'aide d'une chaîne d'acquisition du signal de sortie reliant par un ordinateur.

Le banc à contact utilisé permet d'engendrer des ondes longitudinales et/ou transversales selon le choix des capteurs

utilisés. À noter que nous avons utilisé un agent de couplage présenté par un gel de transmission ultrasonique afin d'analyser l'échantillon testé.

#### B. Analyse par Pulse

Ce type d'analyse s'appuie sur l'extraction des fréquences propres obtenues expérimentalement par l'analyse vibratoire. La méthode de mesure consiste à mettre un échantillon de même type et les mesures dynamiques sont réalisées après excitation de l'échantillon par marteau d'impact et la réponse est captée par un capteur type accéléromètre. Le modèle analytique de Bernoulli-Euler est exploité pour déduire la valeur du module d'élasticité à partir de la valeur expérimentale de la fréquence propre. Ces valeurs des modules d'élasticité sont utilisées pour calculer numériquement les fréquences propres qui seront confrontées aux valeurs expérimentales.

Le principe du banc expérimental utilisé pour réaliser des essais dynamiques est simple. Il comprend une chaîne d'acquisitions permettant d'enregistrer les signaux d'excitations et de réponses de l'échantillon étudié. Ces signaux seront par la suite traités et analysés par une carte d'acquisition et un logiciel de traitement. Comme le présentent les Figures V.2 et V.3, ce dispositif est muni d'un exciteur (marteau de choc) et de capteurs de mesure.

### IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

Les modules d'élasticité déduits par les deux méthodes (ultrasonore(A) et Pulse(B)) de fréquence de résonance, sont consignés dans le Tableau 1, pour les variétés des poutres en béton testées portées en températures de (25°C), (105°C), (175°C), (250°C), (350°C), (450°C), et (550°C). Les valeurs des modules d'élasticité et des modules d'élasticité relatifs, définis comme les rapports des modules d'élasticités sur le module d'élasticité déterminé à T=25°C, sont regroupés sur les Figure 3 et 4 respectivement .

Tableau 4

Résultats expérimentaux du module d'élasticité obtenus par les deux méthodes utilisées

Température (°C)	Module d'élasticité (GPa)		Module d'élasticité relatif	
	Méthode "A"	Méthode "B"	Méthode "A"	Méthode "B"
25	34.75	32.28	01.00	01.00
105	28.52	27.14	00.82	00.84
175	18.81	15.36	00.54	00.47
250	12.51	09.02	00.36	00.27
350	03.89	02.50	00.11	00.07
450	01.75	01.45	00.05	00.04
550	00.42	00.38	00.01	00.01

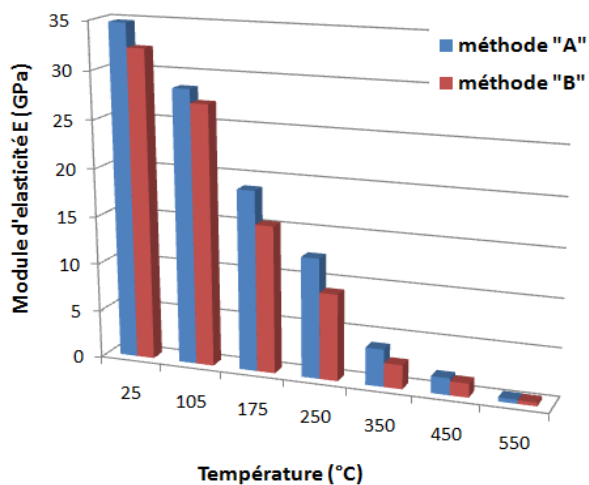


Figure 3 : Comparaison (deux méthodes) de l'évolution de module élastique avec la température pour le béton testé

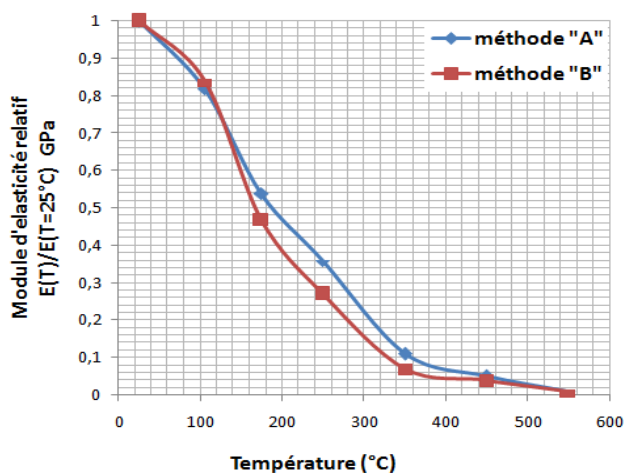


Figure 4 : Comparaison (deux méthodes) de l'évolution de module élastique relatif avec la température pour le béton testé

A partir de ces Figures, nous pouvons observer que l'évolution du module d'élasticité varie avec la marge de température, par laquelle le BAP est exposé. Cette variation comprend principalement deux phases :

Dans la phase (I), entre 25°C et 105°C, nous notons une diminution des modules d'élasticité d'environ 1-18%. Cette diminution peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau [22,25]. Puis, dans la phase (II) entre 105°C et 550°C, nous observons une diminution progressive du module d'élasticité au cours de l'échauffement du matériau, ce qui traduit par une décroissance de la pente des courbes de l'écart avec la température.

A 175°C, une réduction du module d'environ 50% est enregistrée. Cette diminution peut être expliquée par l'apparition de micro fissures sur les poutres testées et bien entendu par la déshydratation entraînant une élévation de la

porosité qui contribue à l'endommagement du matériau [19,26].

Dans la suite le module diminue atteignant d'environ 60% à 99°C. Après une exposition à une température de 350°C, les enlacements de béton présentent des rigidités très faibles. Cet affaiblissement peut s'expliquer par l'augmentation du volume poreux dans le béton et aussi à la fissuration de la zone interface pâte-granulats [11, 18, 20].

L'analyse comparative des résultats expérimentaux de module d'élasticité nous a permis de faire les observations suivantes :

Quelque soit la température de mesure, nous pouvons observer que le module d'élasticité obtenu par l'analyse vibratoire, est nettement inférieur que celui déterminé par la fréquence de résonance. L'origine responsable de cette augmentation n'est pas assez compréhensible, mais probablement elle est liée à la gamme de fréquence différente pour chacune de méthode utilisée, les modalités d'essais distincts et la réponse de l'échantillon testé avec la méthode utilisée.

L'erreur enregistrée entre les deux modules d'élasticité, durant la variation de la température (de 25°C à 550°C), est acceptable. Cependant, pour la température à 250°C, l'erreur est de l'ordre de 15% ce qui n'est pas admissible. Ceci est vraisemblablement dû à l'existence d'erreur de mesure expérimentale, de modèle analytique utilisé, s'appuyant sur la simplification des hypothèses qui ne correspondent pas à la réalité du matériau béton.

Ces résultats expérimentaux montrent que les modules d'élasticités, déterminés par les deux méthodes expérimentales sont proches.

## V. CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que les modules d'élasticités, déterminés par les deux méthodes expérimentales sont proches.

A partir de cette étude expérimentale, nous pouvons constater clairement que les résultats montrent une très grande concordance entre les valeurs de modules d'élasticité déduites par les deux méthodes. Ils sont presque toujours dans l'intervalle de confiance fournis pour les essais expérimentaux. Cependant, nous observons quelques cas, caractérisant par une erreur importante (14.65% et 15.02%). Ceci peut avoir diverses origines :

Causes d'erreur dues aux conditions expérimentales : même si nous avons tenté de travailler de façon rigoureuse, lorsque

nous avons fait les essais expérimentaux, certaines causes d'erreur ont rendu les données obtenues par notre expérience moins précises. Les données fréquentielles ont une origine expérimentale, ce qui implique l'existence d'erreur de mesure. En plus, durant la réalisation des essais par analyse vibratoire à l'aide de l'instrumentation PULSE, nous avons procédé qu'un seul essai pour chaque mesure.

Causes d'erreur dues aux effets de structure : les effets de structure étudiée liés au gradient thermique sont limités, par le choix de la vitesse de variation de température, de la taille et forme de la poutre testés. Cependant, ces effets ne sont pas complètement éliminés en sachant que les observations sont réalisées en régime transitoire. Les propriétés sous température (les effets différent après exposition à la température, différente de l'ambiante, selon les traitements thermiques).

Causes d'erreur dues au modèle analytique : le modèle analytique est construit à partir des hypothèses simplificatrices et correspondent à une idéalisation à la réalité physique de matériau béton.

Causes d'erreur dues aux niveaux de l'environnement réel : il y a de nombreuses sources d'incertitude dans la prédiction des environnements des systèmes vibratoires, la principale étant la variation caractéristique des niveaux vibratoires d'un point à un autre de la structure étudiée.

## Références bibliographiques

- [1] Acker, P., J. Torrenti, et F. Ulm, «Comportement du béton au jeune âge», *Traité Mécanique et ingénierie des matériaux*, Hermès, 2004.
- [2] ACKER, P., TORRENTI, J., ULM, F « Comportement du béton au jeune âge», LAVOISIER, ISBN 2-7462-0980-2, 2005.
- [3] ALARCON-RUIZ, L., GALLE, C., MASSIEU, E., « Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température », *Matériaux* 2002, Tours
- [4] ALVANDI A., « Contribution à l'utilisation pratique de l'évaluation dynamique pour la détection d'endommagement dans les ponts ». Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées Paris, 2003.
- [5] ANDRE P., «Vibrations aléatoires et analyses spectrales», *Presse polytechniques et universitaires romandes*, Lausanne, 1990, 343 p.
- [6] BERTHAUD Y. « Mesure de l'endommagement du béton par une méthode ultrasonore ». Thèse de Génie Civil :Université de Paris 6, 1988. 175p.
- [7] COMBES, B., « Vibrations des structures pour l'ingénieur et le technicien : Théorie et applications », *Ellipses Edition Marketing S.A*, ISBN 978-2-7298-2079-1, 2009, 251 P.
- [8] GARNIER V., CHAIX J.F., CORNELOUP G., « Caractérisation non destructive du béton par analyse d'ondes ultrasonores », *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 239:105-118, 2002.
- [9] GMUR, T., « Dynamique des structures : Analyse modale numérique », *Presses polytechniques et universitaires romandes*, ISBN 2-88074-333-8, 1997.
- [10] NECHAD H., « Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : estimation de la durée de vie restante », *Thèse de doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

- [11] NEVILLE A.M, «Propriétés des bétons », *Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton*, Eyrolles, 2000, 806 p.
- [12] PIRANDA J., « Cours des Dynamiques des structure », *ENSM*, Besançon, 1993.
- [13] PIRANDA J., « Analyse modale expérimentale », *Mesures et Contrôle, Techniques de l'ingénieur*, 2001
- [14] SCHNEIDER U. (1988)., « Concrete at high temperatures : A general review. *Fire safety Journal* », 1988, vol 13, p 55-68.
- [15] REYNOUARD J-M., PIJAUDIER-CABOT G., «Comportement mécanique du béton », *Mécanique et Ingénierie des Matériaux*, Sciences germes, 2005, 383 p.
- [16] Rheometric Scientific, "ARES instrument manual", 1997.
- [17] RILEM , «Recommandations RILEM CPC8, Modulus of elasticity of concrete in compression», *Materials and Structures*, 1972, 6(30), 507-512.
- [18] RILEM TC 50 FMC RECOMMANDATION., « Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams ». *Materials and Structures*, 1985, Vol. 18, n° 106 p 285-290
- [19] RILEM TC 129 MHT RECOMMENDATION ., « Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 3 : Compressive strength for service and accident conditions ». *Materials and Structures*, 1995, Vol. 28, p 410-414
- [20] RILEM TC 129 MHT RECOMMENDATION., « Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 1: Introduction. *Saclay (France): CEA* », March 1997, 22p.,Draft n°3,Report to committee TC 129 MH.
- [21] RILEM TC 129 MHT RECOMMENDATION., « Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 6: Thermal strain for service and accident conditions ». *London: Imperial College*, May 1997, 14p.,Draft n°11, Report to committee TC 129 MHT.
- [22] RILEM TC 129 MHT RECOMMENDATION ., « Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 7: Transient creep for service and accident conditions ». *London: Imperial College*, March 1997, 13p.,Draft n°9, Report to committee TC 129 MHT.
- [23] ROCARD Y., «Dynamique générale des vibrations », *Masson*, 1971, 4eme édition, 460 pages.
- [24] ROSEA, M., « Vibrations des systèmes mécaniques : méthodes analytiques et applications », *MASSON éditeur*, ISBN 2-225-80205-X, 1984, 488 P.
- [25] SCHNEIDER U., «Behavior of concrete at high temperatures », *Paris RILEM*, 1982, Report to committee n°44-PHT, 72 P.
- [SCH 88] SCHNEIDER U., «Concrete at high temperatures », *Fire safety Journal*, 1988, Vol 13, P 55-68.
- [26] SULLIVAN, P.J.E., SHARSHAR, R. «The performance of concrete at elevated temperatures: as measured by the reduction in compressive strength » *Fire Technology*, August 1992, pp 240-250.
- [27] THOMAS G., «Dynamique des structures : analyse modale numérique», *Presse polytechniques et universitaires romandes*, Lausanne, 1997, 570 pages.
- [28] THYAGARAJAN S. K., SCHULZ M.J., PAI P.F., «Detecting structural damage using frequency response functions», *Journal of Sound and Vibration*, 210:162-170, 1997.