

Caractérisation expérimentale d'un béton soumis à hautes températures par analyse vibratoire

BENOUDJAFER imane^{#1}, LABBACI Boudjemaa^{*2}, BENOUDJAFER ibtissam^{#3}

#Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Tahri Mohammed, Béchar, Algérie

¹imenousse@yahoo.fr

³benoudjafer.ibtissam@gmail.com

** Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Tahri Mohammed, Béchar, Algérie*

²labbaci@yahoo.fr

Abstract— Cet article a pour objectif de proposer un moyen non destructif d'identification simple et peu coûteux, d'une mise en oeuvre rapide, permettant de caractériser le comportement mécanique du béton ayant subi des températures élevées jusqu'à 600°C, à partir d'analyse mécanique vibratoire. Cette caractérisation repose sur l'utilisation de plusieurs dispositifs expérimentaux, et conduit à l'extraction des paramètres modaux à partir de l'analyse des FRF et des modes de résonance d'une structure. Plusieurs méthodes expérimentales, dont certaines reposent sur l'analyse des fréquences de résonance de la structure, ont été utilisées. Une synthèse des données récoltées durant cette étude montre que l'approche proposée est efficace.

Keywords— béton, température, analyse vibratoire, non destructif, mécanique.

I. INTRODUCTION

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Chaque année, le nombre de mètres cubes de béton mis en oeuvre dans le monde est égal à la population de la planète. Depuis la construction la plus modeste jusqu'aux ouvrages d'art les plus hardis, en passant par les bâtiments de grande hauteur et les travaux publics (immeubles d'habitation, ponts, tunnels, aéroports, barrages, ports, etc.), le béton est employé sur tous les continents et sous toutes les latitudes.

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 le comportement du béton à ces températures [1,2]. Cependant, en pratique, les ouvrages en béton sont toujours susceptibles d'être soumis à un gradient de température : pour des raisons fonctionnelles (ouvrages subissant normalement des gradients élevés en service), climatiques (variation quotidienne et saisonnières), accidentelles (incendies, chocs techniques) et en fin particulières (démolition partielles ou locale par procédé thermique) [3].

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 fonctionnelles qu'il rencontre dans le temps. 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. 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 [4]. 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. 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 besoins de connaissances, d'une part, des données sur le comportement du béton porté en température pour la prévision de la sûreté des bâtiments et des constructions en réponse à certains accidents ou à états particuliers durant son fonctionnement, et d'autre part, de l'évolution des caractéristiques intrinsèques du matériau béton et de celle de l'évolution générale des ouvrages, qu'émergent et s'affirment les techniques non destructives de contrôles. Ce qui rend possible l'étude des variations d'une ou plusieurs propriétés dans le temps. Le contrôle non destructif offre également la possibilité d'évaluer la qualité d'un béton dans une structure existante et suivre la santé du béton dans le temps. Ce travail a donc pour objective principale de proposer un moyen de caractérisation rapide du comportement mécanique du béton à haute performance ayant subi des températures élevées jusqu'à 600°C, à partir d'analyse mécanique vibratoire.

II. PROCEDURE EXPERIMENTALE

A. Principe de la caractérisation expérimentale

La caractérisation expérimentale 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.

La chaîne d'acquisition PULSE est pilotée par un ordinateur, permettant l'enregistrement des signaux issus de l'accéléromètre et du capteur de force monté sur le marteau d'impact (Figure 1). La gestion de la chaîne d'acquisition comporte sommairement les fonctions suivantes :

- ✓ Lancement du programme de gestion de la chaîne d'acquisitions PULSE ;
- ✓ Fixation des paramètres de configuration ;
- ✓ Vérification et modification de la configuration d'acquisitions (acquisition, mesure, FFT, calibration, display) ;
- ✓ Réalisation d'une mesure ou d'une série de mesure (FRF).



Figure 1 Banc d'essai utilisé

(a) Vue générale de matériel utilisé, (b) Chaîne d'acquisition PULSE, (c) Connecteurs, (d) Marteau d'impact, (e) accéléromètre piézoélectrique

B. Matériaux utilisés

Deux classes de granulats sont utilisées pour la composition des BHP : du sable (0/4) et des gravillons (4/12). Des essais ont été réalisés afin d'accéder aux masses volumiques [NF P 18-305] et le module de finesse de sable. Le taux d'absorption d'eau par les granulats à saturation a été obtenu en suivant l'évolution de la masse des granulats. L'ensemble des caractéristiques physiques des granulats est résumé dans le tableau 1. La Figure 2 correspond aux diffractogrammes obtenus par diffraction des rayons X d'une poudre des granulats sable et gravier respectivement. Les spectres montrent la présence des pics relatifs à l'élément silice (SiO₂) et l'absence des pics caractérisant le carbonate de calcium (CaO₃), d'une absence qui peut être attribuée à la faible proportion du CaO₃ présent dans la prise d'essai.

TABLE 1.

CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

parameters	Sable	Gravillon
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1580	1340
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	2610	2490
Compacité (%)	69	55
Porosité (%)	31	45
Coefficient absorption d'eau (%)	/	2.1
Module de finesse	2.45	/
Coefficient d'Hazen	3.74	1.42

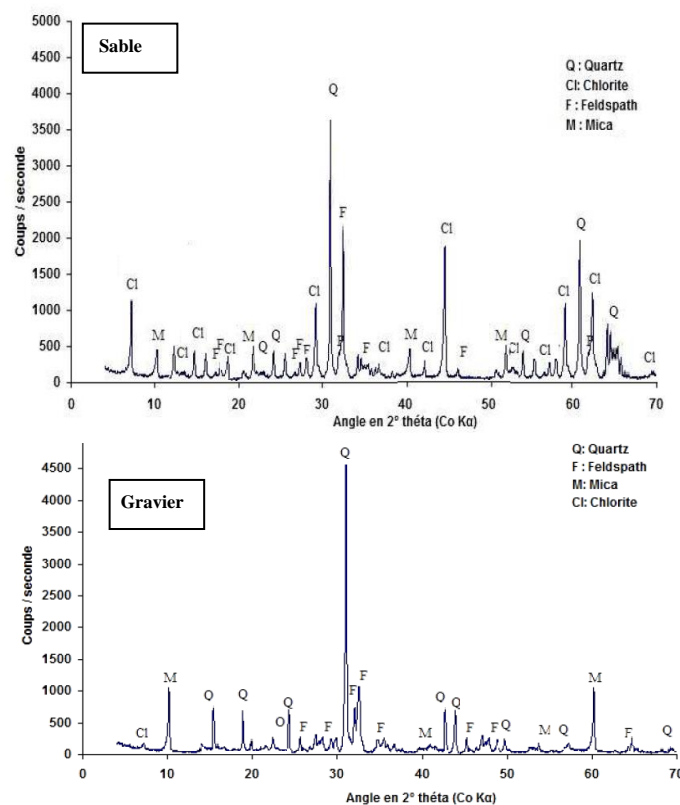


Figure 2 Diagrammes diffractométriques des granulats utilisés

Un seul type de ciment a été utilisé dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'un ciment Portland CPA CEM I 52,5N de prise moyenne. Des essais de prise [EN 196-3] et de résistance à la compression mécanique ont été, également, réalisés sur la pâte de ciment et sur le mortier normalisé [EN 196-1] afin de vérifier la qualité du ciment employé [EN 196-3].

C. Caractéristiques du béton d'étude

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé de béton ayant des caractéristiques proches de celles des bétons couramment utilisés dans des ouvrages ayant subi des situations extrêmes (incendie). Pour ce faire, la composition est basée sur un béton à haute performance d'une résistance en compression de 80 MPa, ayant une porosité atteignant 10 % et une bonne ouvrabilité, ce qui correspond, selon la norme [NF EN 206-1], à un béton fluide (classe S5). Un tel béton peut être susceptible d'être sensible à l'éclatement sous l'action de la température. Afin d'améliorer la granulométrie des mélange, de réduire de la porosité des matériaux durcis et augmenter leurs résistances mécaniques, nous avons maintenu dans le BHP élaboré, une quantité de fumée de silice en poudre égale à 21,6 Kg/m³. Des fibres de polypropylène de type monofilaments ont été utilisées (dosage 1.5 Kg/m³), caractérisant par une température de fusion de l'ordre de 170°C. L'ajout de ces fibres à la composition des bétons améliore ses propriétés de transfert (perméabilité, porosité) [6] et réduit voire annule le risque d'instabilité thermique du matériau, par la réduction de la pression interne dans le réseau poreux [7]. Dans un souci d'amélioration de la fluidité et la maniabilité du béton, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteurs empêchant la floculation des grains de ciment, ce phénomène est favorable à la réactivité.

Pour chaque gâché les grandeurs suivantes ont été déterminées dans chacune des formulations : la consistance ou l'ouvrabilité du béton, la teneur en air occlus et la masse volumique expérimentale. La consistance du béton a été déterminée par la mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS selon la norme [NF EN 206-1]. La mesure de l'air occlus été faite à l'aide d'un aéromètre à béton de six litres avec pompe intégrée et manomètre pour lecture directe du pourcentage d'air, conformément aux prescriptions de la norme [NF P 18-353]. La mesure de la masse volumique réelle du béton frais permet de déterminer son rendement volumique et de vérifier la validité de la formulation théorique [NF EN 12350-7]. Elle a été déterminée à l'aide de la chambre inférieure de l'aéromètre. Les résultats obtenus montrent que le béton formulé est un béton fluide présente des caractéristiques à l'état frais favorables répondant aux exigences de normes en vigueur [NF P18 301].

Avant chaque essai, les extrémités des éprouvettes cylindriques ont été rectifiées par une rectifieuse des éprouvettes, selon la norme [EN 12390-2]. Cette rectifieuse est pourvue d'une protection anti-arrosage, d'un bac de

décantation avec pompe, Figure 3. Des dispositifs de fixation de cube et de cylindre sont également disponibles. Le dispositif permettant la rectification d'extrémités d'éprouvettes peut être aisément monté sur la machine. Ce traitement permet de s'assurer d'une bonne planéité des surfaces de contact et de leur orthogonalité à la génératrice principale de l'éprouvette.

L'essai de compression a été évalué suivant la norme [NF EN 12390-3], à l'aide d'une presse d'une presse hydraulique, asservie en force, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance à la traction a été obtenue par l'essai de fendage (brésilien). Elle a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques du même type que celles utilisées pour l'essai de compression (16Φ32 cm) à 28 jours. Le principe c'est d'appliquer un effort de compression induit, le long de deux génératrices opposées [NF P 18-408], des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. L'éprouvette est placée à l'horizontale entre les plateaux de la presse et la charge est augmentée jusqu'à la rupture par traction indirecte, qui apparaît sous forme de fendage le long du diamètre vertical du cylindre.

La méthode d'auscultation, non destructive et simple, a été utilisée pour l'évaluation de la qualité du béton. L'appareillage de mesure est constitué d'un générateur d'onde, d'un oscilloscope pour la lecture du temps de transit d'onde, d'un dispositif de serrage et de deux transducteurs. Le principe générale est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propagent dans le milieu testé en transmission, en réflexion, ou à la surface. Un agent couplant de faible viscosité a été utilisé pour assurer un bon couplage entre le transducteur et le matériau, ce qui peut dégrader la répétabilité des mesures et allonger le temps de mise en place de la mesure.



Figure 3 Essais mécanique

III. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les représentations temporelles de l'excitation, pour les variétés des poutres en béton testées portées en températures de (20°C), (120°C), (400°C) et (600°C) sont montrées dans la Figures 4.

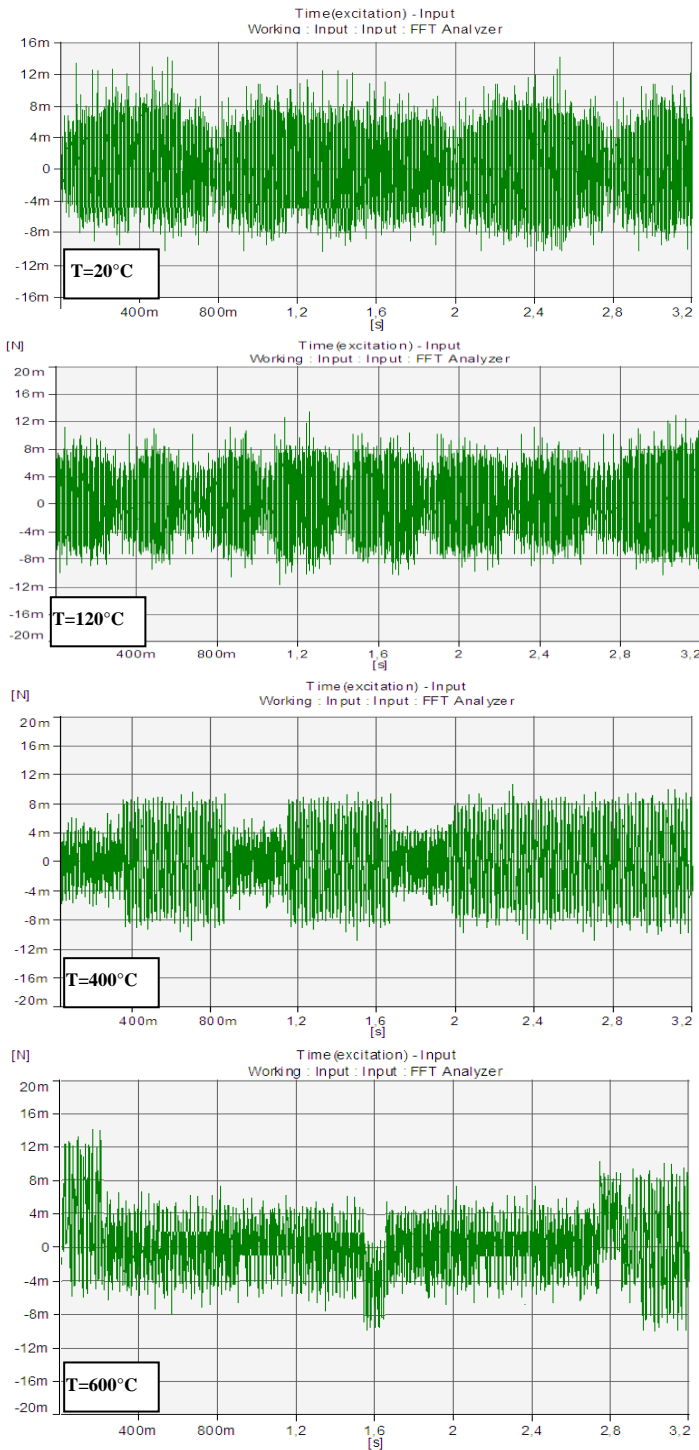


Figure 4 : Représentation temporelle de l'excitation

Les résultats expérimentaux de l'évolution de la fréquence propre pour le béton testé, en fonction de la température, allant de (20°C jusqu'à 600°C), sont illustrés dans les graphes de la Figure 5.

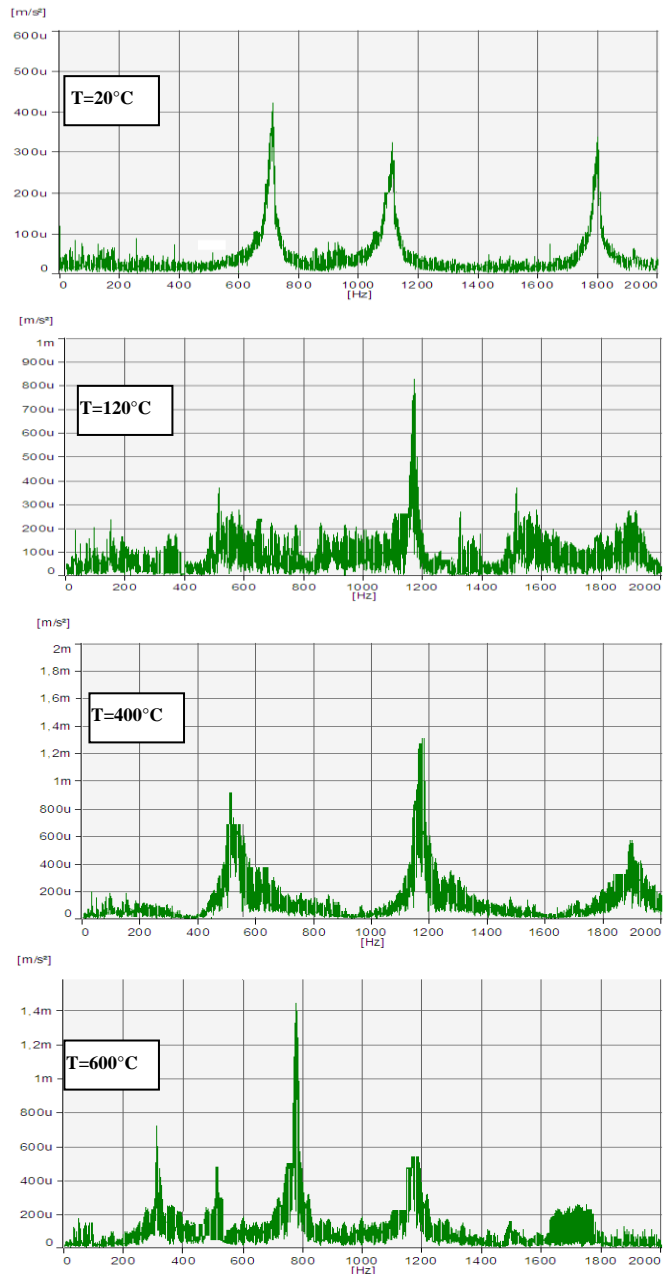


Figure 5 : Représentation temporelle de l'excitation

Il est clair d'observer que le béton testé enregistre des fréquences inférieures que celle mesurée à température de référence. De façon générale après l'exposition à la température, les courbes de la fréquence propre sont décalées par rapport aux valeurs obtenues pour l'échantillon témoin. Nous pouvons observer aussi une augmentation de l'intensité des pics sur les courbes réalisés pour les échantillons portés

en température. Les modules d'élasticité déduits de l'analyse vibratoire sont consignés dans le Tableau 2. 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=20°C, sont regroupés sur les Figure 6 et 7 respectivement .

TABLE 2.
 MODULE D'ELASTICITÉ DU BETON

Température (°C)	Module d'élasticité (GPa)	Module relatif (%)	Ecart (%)
20	45.35	100.00	00.00
120	32.72	72.15	-27.85
400	19.87	43.81	-56.19
600	14.64	32.28	-67.72

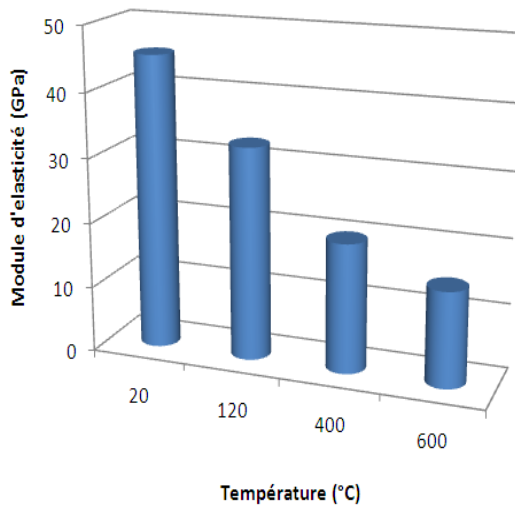


Figure 6 Module d'élasticité déduit de l'analyse vibratoire

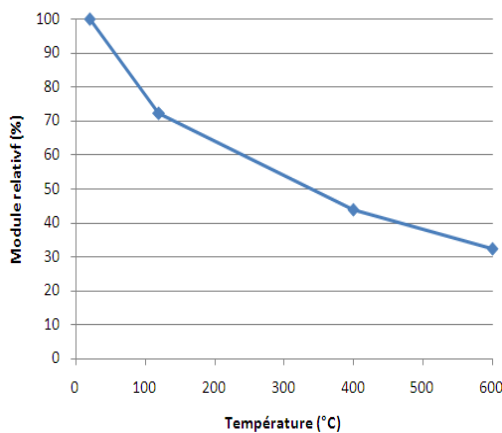


Figure 7 Module d'élasticité relatif déduit de l'analyse vibratoire

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

Dans la phase (I), entre 20°C et 120°C, nous notons une diminution du module d'élasticité d'environ 28%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par l'effet de déshydratation de l'ettringite qui peut entraîner une détérioration du matériau. Puis, dans la phase (II) entre 120°C et 600°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 400°C, une réduction maximale du module d'environ 57% est enregistrée. Dans la suite le module diminue atteignant d'environ 68% à 600°C. Cette diminution peut avoir comme origine la décomposition du gel CSH avec la formation de β -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques.

Afin de comparer les résultats expérimentaux du module d'élasticité, nous avons regroupé sur la Figure 8 ses valeurs déterminées par les deux méthodes présentées auparavant, avec l'erreur relative en pourcentage.

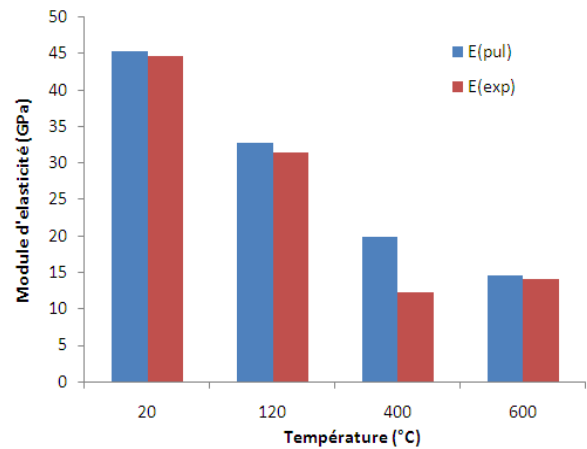


Figure 8 Comparaison (vibration- expérimentale) de l'évolution de module élastique avec la température

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 supérieur que celui déterminé par l'ultrason. 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 20°C à 600°C), est acceptable. Cependant à 400°C. l'erreur est de l'ordre de 16% 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 montrent que les modules d'élasticités, déterminés par les deux méthodes expérimentales sont proches.

IV. CONCLUSION

L'utilisation des bétons à haute performance a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Grâce à la grande durabilité et les qualités rhéologiques remarquables, son l'emploi se développe fortement [8]. Cependant, lorsqu'il est soumis à des hautes températures comme lors d'un incendie, ce béton peut présenter des écaillages, des éclatements voire manifester un comportement explosif [9]. Durant ces dernières années de nombreuses recherches ont été entreprises pour comprendre le comportement du béton à haute température. Cette étude expérimentale contribue à ces recherches. Nous avons présenté dans ce travail une approche basée sur une analyse vibratoire pour la caractérisation expérimentale, permettant d'étudier l'évolution du comportement mécanique des bétons sous l'effet de la température. Cette analyse repose sur l'utilisation d'une chaîne d'acquisition permettant d'identifier les paramètres modaux à partir de l'analyse de la réponse fréquentielle (FRF) [10,11,12] et des modes de résonance du béton testé.

En perspective, il est envisageable à court terme l'extension du programme expérimental pour impliquer :

- ✓ d'une part, de prendre en considération tous les paramètres permettant de fournir des informations nécessaires, lors de l'analyse vibratoire, concernant la localisation de l'endommagement durant la variation de la température. Il a été constaté une sensibilité notable du mode, observée en fonction de la nature du béton étudié et la température par laquelle il est soumis, ce qui nécessite la connaissance avec précision, de l'emplacement de l'endommagement. Pour cela, il serait très intéressant et utile d'identifier les déformées propres associées aux fréquences afin de suivre et détecter l'endommagement causé durant l'exposition à la température.

- ✓ et d'autre part d'autres paramètres concernant les granulats (forme et texture des granulats, liaison, résistance et résistivité, porosité et absorption des granulats), de la résistance du béton (rapport eau/ciment, quantité d'eau efficace dans un béton, rapport gel/vidé, porosité, rapport granulat/ciment, maturité et l'âge du béton). Aussi quelques aspects du béton durci (mûrissement du béton, variation de la résistance du ciment, modification des propriétés du ciment, propriétés électriques et acoustiques du béton), et quelques

facteurs de durabilité (influence du réseau poreux, perméabilité, diffusion, résistance au agent agressifs, aux ambiances climatiques sévères et à la fatigue).

REFERENCES

- [1] A.M Neville, *Propriétés des bétons*, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, Eyrolles, 2000.
- [2] P.Acker, J. Torrenti, et F. ULM, *Comportement du béton au jeune âge*, LAVOISIER, ISBN 2-7462-0980-2, 2005.
- [3] L. Basheer , P. Basheer , ET A. Long , *Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete*, Construction and Building Materials, 2015, 19, no. 9(9), 682-690.
- [4] V.Garnier , J.F Chaix., G. Corneloup, *Caractérisation non destructive du béton par analyse d'ondes ultrasonores* , Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 239:105–118, 2012.
- [5] H. Nechad, *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, 2014.
- [6] Alarcon-ruiz, L., C. Gallé , E. Massieu, , *Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température* , Matériaux 2002, Tours.
- [7] T.Akçaoglu, M. Tokyay, et T. Çelik , *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*, Cement and Concrete Composites, 2004, 26(6), 633-638.
- [8] Y. Malier, *les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, applications*, Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1992.
- [9] A. Pierre-Claude, *Bétons haute performance*, Eyrolles, 2001.
- [10] R. Caracciolo, A. Gasparetto, M. Giovagnoni, An experimental technique for complete dynamic characterization of a elastic material. Journal of Sound and Vibration, 272:1013–1032, 2013.
- [11] P. Avitabile , *Experimental modal analysis : a simple non-mathematical presentation* , Sound and Vibration Magazine, 2000.
- [12] C. Bertrand , *Vibrations des structures pour l'ingénieur et le technicien : théorie et applications*, Ellipses, Lausanne, 2009.