

Développement d'un dispositif pour la mesure du module d'élasticité dynamique des matériaux

Maxime ALLENO, Matthieu BAILLIEU, Théo COLLIN, Joseph GUYON LE BOUFFY, Victor JACOB

Résumé—Durant ce projet, nous avons répertorié les méthodes d'analyse permettant de déterminer le module d'élasticité d'un matériau et choisi la méthode la plus adaptée aux bétons ici étudiés, i.e. utiliser des ondes micro-sismiques. Nous avons répertorié et chiffré le coût des différentes méthodes d'excitation et des systèmes d'acquisition possibles et fait une proposition au CEREMA. Enfin, nous avons développé un système d'interfaçage sous LabView convertissant les données brutes en données exploitables (valeurs, spectres fréquentiels).

Mots clés—Fréquence, béton, échantillon, module d'élasticité, matériau, onde.

I. INTRODUCTION

Ce projet a pour but de développer et de livrer au CEREMA (organisme commanditaire et tuteur de ce projet) un équipement robuste et à bas coût permettant de mesurer le module d'élasticité de façon simple, viable et sans endommager les échantillons de béton. L'objectif du CEREMA, est de pouvoir caractériser l'impact des granulats (issus du recyclage du béton) et des fines (issus de la valorisation des sédiments fluviaux) sur le module d'élasticité du béton. Pour cela, il est important d'effectuer cette caractérisation sur la durée afin d'observer la dégradation ou l'amélioration du module d'élasticité en fonction du temps. En effet, pour que ces nouveaux constituants puissent à moyen terme être largement utilisés dans les bétons, il est nécessaire de caractériser leur impact sur les propriétés à long terme du matériau durci. Parmi les grandeurs susceptibles d'être prises en compte lors de la conception d'un élément en béton figure le module d'élasticité. L'équipement à développer devra donc permettre de déterminer ce module. L'instrument devra être robuste et facilement manipulable car il sera amené à être utilisé tous les jours. Une interface logicielle sera également développée pour l'utilisateur.

II. LE BÉTON ET LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Le béton est un mélange de matériaux de nature minérale. Il met en présence des matières inertes appelées granulats ou agrégats (gravillons, sables, etc.), un liant (ciment, additions minérales), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. A ces constituants usuels peuvent venir s'ajouter des matériaux issus du recyclage.

III. CHOIX DE LA MÉTHODE

Nous avons commencé ce projet par une étude bibliographique sur les méthodes de mesures utilisables dans notre

projet. Il a fallu en premier lister et comparer les appareillages présents sur le marché. Cette étape est essentielle, il ne faut en effet pas recréer un dispositif existant, mais plus s'en inspirer afin de créer un dispositif concordant avec les besoins du laboratoire Eco-Matériaux (Dter IdF/ CEREMA). Pour rappel, le dispositif doit être facile d'utilisation, donner des résultats répétables, mais également être robuste et transportable facilement. Les méthodes de mesures par ondes ultrasonores et ondes micro-sismiques sont les deux techniques majeures utilisées lors de caractérisation non destructive des bétons. Pour cette raison, il nous a paru important d'étudier les différences et ressemblances qui peuvent exister entre ces deux techniques afin de déterminer la plus adaptée à notre projet. Les deux méthodes sont présentées dans ce qui suit : la première permet la mesure du module d'élasticité par ondes ultrasonores et la seconde, la mesure du module d'élasticité par ondes micro-sismiques.

A. Méthode de calcul du module d'Young par ondes ultrasonores

La mesure du module d'élasticité dynamique par ultrasons consiste à envoyer une onde ultrasonore dans le matériau. Cette onde est envoyée par un transducteur appliqué contre la surface de l'échantillon à l'aide d'un gel. L'onde se propage très bien dans les matériaux considérés comme homogènes. Les défauts (bulles d'air, présence de granulats) sont des freins à la bonne propagation de ces ondes. A chaque changement de milieu, une partie de l'onde est réfléchiée. En arrivant à la frontière entre la surface opposée du matériau et l'air, l'onde est totalement réfléchiée : la différence énorme de densité entre le matériau et l'air est telle que l'onde est totalement amortie dans l'air, d'où la réflexion. Le transducteur de réception est donc placé à la surface opposée à celle d'émission afin de réceptionner le signal^[1]. Il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures afin d'avoir une estimation acceptable de la vitesse qui peut varier suivant les défauts en présence. Le transducteur d'émission peut également être celui de réception. Cela permet de diminuer le problème d'alignement entre le transducteur d'émission et de réception et donc une perte d'intensité non négligeable. Avec l'utilisation de cette technique, en revenant, l'onde peut également être de nouveau atténuée s'il y a présence de défauts. Une autre méthode consiste à mesurer la vitesse de l'onde, non pas à travers le matériau mais en surface à l'aide de transducteurs inclinés. Il faut cependant effectuer plusieurs mesures avec des distances différentes entre les 2 transducteurs.

La mesure du temps entre l'émission et la réception du signal nous permet de remonter à la vitesse de cette onde

dans le matériau qui est reliée au module d'élasticité par la relation suivante^[1] :

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

Avec, en unité S.I. :

v_L : vitesse de l'onde longitudinale
 E : module de Young
 ν : coefficient de Poisson
 ρ : densité

B. Méthode de calcul du module d'Young par ondes micro-sismiques

La méthode consiste à soumettre un échantillon à une vibration élastique et d'en déterminer sa fréquence de résonance. Pour faire apparaître la résonance, il faut que la fréquence d'excitation soit égale à la fréquence propre de l'éprouvette ; dès lors, des ondes stationnaires s'établissent et l'amplitude des oscillations est maximale. Cette fréquence est fonction des propriétés élastiques du matériau mais également de la taille, de la forme et de la teneur en humidité de l'échantillon ainsi que du type d'excitation (vibrations longitudinales, de torsion ou encore de flexion). Afin d'obtenir des résultats plus facilement il faut privilégier des éprouvettes de forme prismatique ou cylindrique. Le béton pouvant être considéré comme un matériau quasi homogène et isotrope, on peut en déduire les constantes élastiques du matériau (module d'élasticité dynamique, de cisaillement et le coefficient de Poisson)^[2]. Le module d'élasticité dynamique E , pour une éprouvette cylindrique, est relié à la fréquence de résonance longitudinale f par la relation suivante^[1] :

$$E = \frac{5.093 \times M \times L \times f^2}{d^2} \quad (2)$$

Pour une éprouvette prismatique, la relation s'écrit sous la forme :

$$E = \frac{4 \times M \times L \times f^2}{b \times t} \quad (3)$$

Avec, en unité S.I. :

f : la fréquence de résonance longitudinale
 E : Module d'élasticité dynamique
 d : Diamètre de l'éprouvette
 L : Longueur de l'éprouvette
 M : Masse de l'éprouvette
 t, b : dimensions de la section transversale

C. Détermination de la méthode

La méthode par ultrasons est une technique viable mais elle est sensible à l'hétérogénéité du matériau (porosité, granulats etc...). Cela oblige l'opérateur à effectuer plusieurs fois la mesure afin d'avoir un résultat acceptable. En effet, plus la fréquence est élevée, plus l'onde va être sensible aux

hétérogénéités du matériau, car la longueur d'onde va se rapprocher de la taille caractéristique des granulats^[3]. La technique de mesure par ondes micro-sismiques a l'avantage de fonctionner avec une gamme de fréquences moins élevée. Elle est donc moins sensible aux hétérogénéités présentes dans le béton. Une fois la fréquence de résonance du matériau déterminée, le module d'élasticité se déduit rapidement. De plus cette dernière méthode nécessite un équipement moins onéreux. Ainsi, selon nous la méthode la plus adaptée pour ce projet est celle basée sur les ondes micro-sismiques. De plus, nous préconisons l'utilisation des vibrations longitudinales dans le cadre de ce projet puisque la mesure se faisant sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques, l'expérimentateur a accès aux deux faces opposées, facilitant ainsi la manipulation lors de l'utilisation.

Afin de déterminer les équipements à adapter pour notre béton, il faut au préalable connaître sa fréquence de résonance en utilisant la relation (2). Dans le cas d'une éprouvette cylindrique de 11 cm de diamètre et de 22 cm de longueur, avec pour exemple un module d'élasticité d'une valeur de 35GPa on obtient une fréquence de résonance de $f=8700\text{Hz}$.

IV. SOLUTION PROPOSÉE

La détermination du module d'élasticité par mesure de la fréquence de résonance peut se faire par deux types de méthodes : la méthode de la résonance forcée ou la méthode de la résonance par impact. C'est le choix du système d'excitation qui définit quelle méthode est utilisée. La première méthode consiste à forcer l'échantillon à vibrer dans une certaine gamme de fréquences et à mesurer sa réponse. Par cette méthode, c'est un pot vibrant qui génère la vibration. Avec la seconde méthode, l'excitation se fait par une simple impulsion générée grâce à l'impact d'un instrument sur l'éprouvette (marteau d'impact ou pendule). Une fois la méthode sélectionnée, il nous a fallu répertorier les différents composants nécessaires pour la réalisation de l'instrument en tenant compte de leurs caractéristiques et de leurs prix. N'ayant pas de connaissances dans le domaine des accéléromètres, il a été très difficile de savoir quel aurait été celui le plus adapté pour notre appareillage, c'est pourquoi nous nous sommes renseignés auprès de professionnels pour palier à ce manque de compétence.

A. Système d'excitation

Les différentes recherches que l'on a effectué ainsi que les multiples devis que nous avons fait faire nous ont permis de déterminer quels équipements étaient les mieux adaptées au vu des contraintes qui nous sont imposées. Voici un résumé et une explication sur notre démarche dans notre choix de matériel.

1) *Pot vibrant*: Le pot vibrant (ou vibreur électromagnétique) est un élément qui permet de transformer un signal électrique en signal mécanique. Cependant, afin de produire des vibrations mécaniques suffisamment puissantes pour faire vibrer l'éprouvette de béton, le signal électrique nécessite d'être amplifié à l'aide d'un amplificateur de puissance. Cette solution nécessite donc un appareillage coûteux, c'est pour cette raison que nous ne l'avons pas retenue.

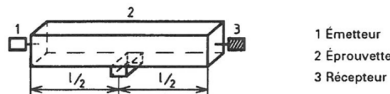
2) *Pendule*: Ce système est composé d'une masse fixée au bout d'une tige filetée elle-même liée au bâti de mesure par une liaison pivot. Ce principe, assez simple à mettre en œuvre, permet d'obtenir des intensités d'impact répétables et donc des signaux de sortie identiques, plus facile à traiter. L'intérêt majeur du pendule est son faible coût.

3) *Marteau d'impact*: L'avantage d'un marteau d'impact comparé à un pendule est la possibilité de récupérer un signal d'excitation ce qui permet de lancer la mesure automatiquement (démarrage au moment de l'impact). Le choix de son poids se fait en fonction de la dimension de l'éprouvette. Cependant un tel équipement reste trop coûteux par rapport au budget alloué.

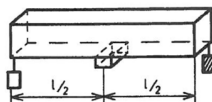
B. Support

Le support ne doit pas influencer la mesure, il doit donc avoir une fréquence de résonance qui se trouve en dehors de la gamme de fréquence étudiée et doit permettre à l'échantillon de vibrer librement. L'idéal pour cela est de le maintenir au niveau des nœuds de vibrations. Leurs positions dépendent du mode de vibration utilisé. En effet, il existe 3 différents modes de vibrations qui dépendent de la position où l'on place l'excitateur et le capteur^[4]. En mode transversal, les nœuds de vibrations sont situés à approximativement $\frac{1}{4}$ de chaque extrémité tandis que pour le mode longitudinal et le mode en torsion le nœud de vibration est situé à la moitié de la longueur de l'éprouvette.

Position des transducteurs pour une vibration longitudinale :



Position des transducteurs pour une vibration de torsion :



Position des transducteurs pour une vibration de flexion :

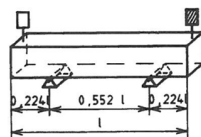


FIGURE 1. Positions des transducteurs et du support en fonction des différents modes de vibration^[5]

Cependant il est également possible de poser l'échantillon sur une mousse adaptée^[6] qui permet à l'échantillon de vibrer suffisamment librement pour obtenir des résultats satisfaisants.

C. Choix de la méthode

Après avoir défini les différents systèmes d'excitation possible, nous avons opté pour une excitation via un pendule. En effet cette solution étant facilement réalisable nous avons pu la fabriquer nous-même, ce qui nous a ainsi permis d'économiser de l'argent. Nous avons également conçu un support (voir

figure 2) qui permet de maintenir l'éprouvette en place au cours de la mesure. Ce support comporte une mousse qui permet à l'éprouvette de vibrer librement.



FIGURE 2. Support et système d'excitation

D. Accéléromètre

L'accéléromètre permet d'enregistrer la réponse de l'éprouvette à l'excitation mécanique. Ce capteur doit donc être capable de transformer des vibrations mécaniques en signal électrique. La caractéristique la plus importante d'un accéléromètre est la gamme de fréquence qu'il va pouvoir mesurer efficacement. La fréquence fondamentale de notre béton est située aux alentours de 8kHz pour un module d'élasticité de 30GPa (8,7kHz pour un module de 35GPa). Nous avons opté pour un accéléromètre avec des caractéristiques permettant d'obtenir seulement la fréquence fondamentale, sa gamme de fréquence étant comprise entre 0 et 10kHz. Cet accéléromètre a donc des caractéristiques suffisantes pour calculer le module d'élasticité de notre échantillon de béton. Nous pouvons voir ci-dessous une photo de notre montage comprenant, le pendule, le support, l'éprouvette de béton et le capteur.

E. La carte d'acquisition

La carte d'acquisition est l'élément liant la partie mesure (accéléromètre) à la partie calcul, c'est donc un élément essentiel de l'appareillage. La carte d'acquisition doit être assez rapide pour avoir un bon échantillonnage afin d'avoir une bonne précision sur la mesure, une carte capable de faire entre 100 et 2000 kéch/s est idéale pour le projet. Pour plus de portabilité, l'utilisation d'une carte d'acquisition branchée en USB sur un ordinateur portable est préférable. C'est grâce

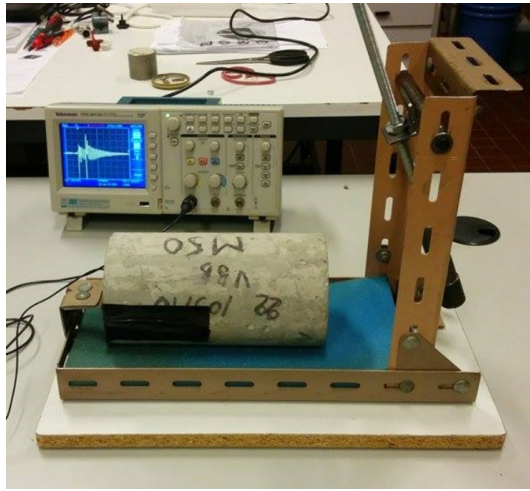


FIGURE 3. Montage de détection du signal vibratoire

à une carte d'acquisition mise à disposition par le service Travaux Pratiques Physique de l'Université que nous avons fait les premiers tests de notre appareillage.

F. Le logiciel

A l'aide du logiciel LabVIEW, nous avons réalisé un codage de l'interface utilisateur. Grâce à cela nous pouvons récupérer et analyser les différents résultats obtenus grâce aux capteurs par le biais de la carte d'acquisition. Le logiciel permet, après une transformée de Fourier du signal, de déterminer la fréquence de résonance fondamentale de l'éprouvette. Ensuite, il effectue le calcul approprié en fonction de la forme de l'éprouvette afin de calculer le module d'élasticité dynamique. A chaque nouvelle acquisition, l'utilisateur est invité à indiquer la forme de l'éprouvette, ses proportions ainsi que sa masse. C'est avec cette interface que l'utilisateur de la machine pourra pleinement utiliser et récupérer les résultats de la mesure.

Ci-dessous une visualisation de l'interface de notre logiciel :

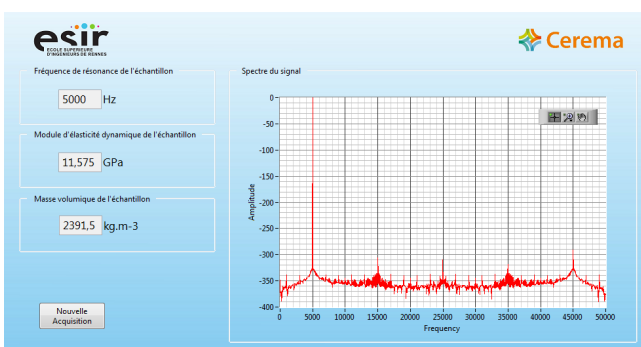


FIGURE 4. Visuel de l'interface utilisateur

V. RÉSULTATS

Ayant eu une réponse tardive de l'entreprise pour la validation du choix de l'accéléromètre pour réaliser le banc de mesure ainsi que la durée des délais de livraisons, nous

n'avons pas pu recevoir à temps le capteur permettant de mesurer les vibrations et donc d'effectuer des tests du dispositif. Cependant, à l'aide d'un autre accéléromètre prêté par le service Travaux Pratiques Physique de l'Université, nous avons pu constater que notre méthode d'impact fonctionnait bien. En effet, comme nous le montre la figure 3, la réponse du capteur par rapport à l'impact du balancier est une réponse à laquelle nous nous attendions (oscillation amortie).

VI. CONCLUSION

Au cours de ce projet, nous avons été amenés à étudier plusieurs techniques pour réaliser une étude de l'impact des matériaux recyclés dans la fabrication de bétons. Plus précisément pour réussir à déterminer le module d'élasticité dynamique des éprouvettes réalisées par le laboratoire Eco-matériaux du CEREMA grâce à un équipement que nous devons développer. Après une recherche bibliographique des techniques de caractérisation existantes, nous nous sommes dirigés vers une méthode par onde microsismique pour son application plus simple sur des matériaux hétérogènes. Afin de concrétiser les choses, nous avons décidé de réaliser un mécanisme d'impact qui pourrait exciter notre éprouvette et induire le déplacement d'une onde microsismique dans le matériau, le tout associé avec un accéléromètre à l'extrémité de l'éprouvette réceptionnant cette onde et permettant la transmission des informations vers la carte d'acquisition puis vers le logiciel. Nous avons commencé par monter un support d'éprouvette avec un pendule et un contrepoids afin de réaliser des oscillations d'ampleur constante. L'ensemble pendule et contrepoids a été pensé pour être réglable suivant le type et la taille des éprouvettes à tester. Ces dernières sont posées sur une mousse afin d'éviter toute perturbation extérieure. Suite à cela nous nous sommes attelés à la création d'un logiciel afin de pouvoir exploiter les données récoltées par notre accéléromètre associé à la carte d'acquisition. Pour ce faire nous nous sommes servis du logiciel de développement LabVIEW simplifiant l'utilisation de l'ensemble accéléromètre et carte d'acquisition. Grâce à cela nous avons pu développer une interface utilisateur visuellement simple et facile d'utilisation. A l'ouverture l'utilisateur peut choisir le type d'éprouvette testé mais aussi y indiquer les dimensions de cette dernière. Ces informations sont directement utilisées dans la formule permettant le calcul de la fréquence de résonance simplifiant ainsi l'expérience utilisateur sans que celui-ci n'ait à se préoccuper du calcul (limitant le risque d'erreur). Dans le cas où le laboratoire venait à utiliser le matériel dans une autre optique que celle pour laquelle nous l'avons développé, ce logiciel pourra être modifié ultérieurement grâce à LabVIEW. Durant ce projet nous avons donc pu mener une étude de bout en bout, depuis les recherches bibliographiques jusqu'à la réalisation complète de notre machine de test.

VII. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Eric GICQUEL pour sa disponibilité ainsi que l'aide précieuse qu'il nous a apporté dans la réalisation de ce projet, notamment lors de la fabrication du support. Nous voulons également remercier Serge SAMPER,

Fabrice CELARIE et Vincent BURGAUD pour l'aide apportée sur la détermination du système d'excitation. Nous remercions également Marylise BURON et Ronan LEFORT pour leurs conseils ainsi que le temps qu'ils nous ont accordé. Nous remercions Amor BEN-FRAJ et Alexandre PAVOINE d'avoir proposé ce projet à notre école et de nous avoir suivis tout au long de celui-ci.

VIII. RÉFÉRENCES

[1] : Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens (ASTM C 215-02), Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, 2003

[2] : Caractérisation du béton par les méthodes non destructives - Application de la méthode de fréquence de résonance, Mohammed El Amin BOUAKKAZ, Université Abou Bekr Belkaid, page 28

[3] : Auscultation des barrages en béton par écoute micro-sismique : détectabilité et localisation Université de Montréal, Bernard Giroux, Département des génies civil, géologique et des mines, école polytechnique de Montréal. Page 47

[4] : Essais des bétons - Essais non destructifs - Mesure de la fréquence de résonance fondamentale (NF P18-414), AFNOR, 1993

[5] : Contrôle non destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé, B.Piwakowski, P. Safinowski, A.Kosecki. Page 3 et 9

[6] : Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, V.M. Malhotra, N.J Carino, 2nd ed., CRC Press, 2004. Chapitre 7 p171