

CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DU BÉTON PAR ULTRASONS À L'AIDE D'UN DISPOSITIF AUTOMATISÉ

NON DESTRUCTIVE CONCRETE EVALUATION BY ULTRASOUND USING AN AUTOMATED DEVICE

B.Piwakowski¹, P. Safinowski^{1,2}, A.Kosecki¹,

¹ Groupe Electronique Acoustique, Ecole Centrale de Lille (IEMN DOAE UMR 8520 CNRS)
BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France, bogdan@piwakowski@ec-lille.fr

² Institute of Environmental Mechanics and Applied Computer Science, Bydgoszcz University,
Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz, Pologne, safi1@o2.pl

Résumé

L'article présente un système automatique de contrôle non destructif du béton à l'aide des ondes ultrasonores de surface. Les mesures sont effectuées sans contact avec le béton. L'augmentation du niveau du signal, indispensable pour une telle approche, est obtenue grâce à l'utilisation des signaux à balayage fréquentiel, dits « chirps ». Les signaux enregistrés sont traités par un programme spécial afin d'obtenir la vitesse, l'atténuation et la caractéristique de dispersion des ondes de surface. Ces grandeurs sont ensuite utilisées pour évaluer les paramètres du béton. Les possibilités potentielles de cette technique sont illustrées sur l'exemple de mesures dans lesquelles les dalles de béton à l'état sec, saturées en 100% et saturées partiellement ont été évaluées en fonction de la porosité, de la taille et du type de granulat. Des relations vitesse/porosité et vitesse/saturation obtenues sont très cohérentes avec les prévisions théoriques. La comparaison du module d'élasticité avec les résultats des mesures mécaniques destructives donne une précision de 5 % ou meilleure. L'appareil avait déjà fait ses épreuves dans les conditions des ouvrages réelles

Abstract

The paper presents the automated device designed for the non destructive control of the concrete using the ultrasonic surface waves. The measurements are carried out without any contact with tested sample. The increase of signal level, required for such solution, is obtained using the frequency swept signals, so called "chirps". The recorded signals are processed using special software which permits to obtain the velocity, the attenuation and the velocity dispersion of surface waves. These values are then used in order to determine the parameters of concrete. The potential possibilities of this approach are shown on an example of measurements over totally dry, saturated, and partially saturated concrete samples, which were examined in function of porosity, of granulate size and of granulate type. The obtained relations of velocity/porosity and velocity/saturation agree very well with the theoretical expectations. The comparison of obtained elastic modulus with the results of destructive measurements gives the accuracy 5 % or better.

1. INTRODUCTION

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soient son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage [1]. Parmi ces méthodes, le contrôle par ultrasons occupe une place importante grâce à sa commodité d'emploi et à son coût raisonnable [2]. Dans la mesure où l'on s'intéresse essentiellement à la durabilité du matériau, la zone inspectée correspond aux premiers centimètres sous la surface de la structure. Les défauts à quantifier se présentent alors sous forme de pores et de microfissures réparties dans cette zone. Afin d'augmenter la sensibilité des paramètres de propagation à la présence de ces défauts, nous utilisons les ondes de Rayleigh (ondes de surface (OS), [3]), dans une bande fréquentielle comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kHz.

Le principe général de mesure consiste à générer et recevoir des OS aux N distances à l'aide d'une paire de transducteurs angulaires [4] identiques, déplacés manuellement le long du profil de mesure (fig.1.a). Une telle procédure, bien adaptée aux conditions de laboratoire, n'est pas appropriée aux mesures in situ. Ses défauts majeurs sont le temps de mesure extrêmement long, les erreurs en positionnement des capteurs et la non répétitivité du couplage des récepteurs. Afin de résoudre ces problèmes, un appareil automatique a été conçu et construit dans notre laboratoire (fig.1.b). Il constitue un support mobile pour les transducteurs qui se déplacent automatiquement. Le déplacement des capteurs et l'enregistrement des données sont contrôlés par l'ordinateur (Safinowski [5]). Grâce à cette approche, au regard de l'approche traditionnelle :

- le temps de mesure a été raccourci au moins dix fois,
- l'application des capteurs sans contact a résolu le problème du couplage,
- l'utilisation du système automatisé a assurée une précision suffisante de positionnement du capteur et, en même temps un nombre de points de réception N suffisamment grand, permettant de réaliser une moyenne fiable.

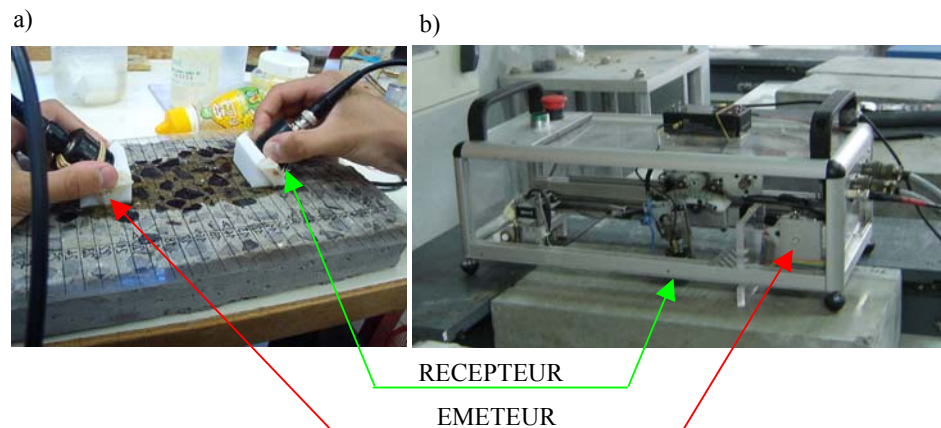


Figure . a) Méthode manuelle, b) Dispositif automatique – le « robot ».

2. PRINCIPES DE LA MESURE

La géométrie de la mesure est montrée sur la figure 2.a. Afin d'éviter une modification des propriétés du matériau par le produit couplant, les mesures sont effectuées sans contact entre les capteurs et la surface inspectée. L'onde générée par l'émetteur est reçue aux distances $R1$, $R2$... RN espacées uniformément de Δx . Afin de limiter le nombre des récepteurs nécessaires, un seul récepteur est déplacé et les enregistrements sont effectués dans chaque point de mesure.

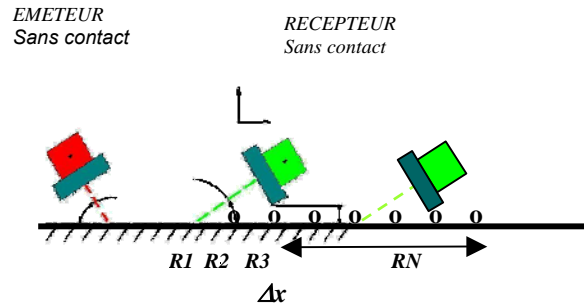


Figure .2 Géométrie et principe de mesure sans contact.

La valeur typique du coefficient de réflexion sur l'interface air/béton est de 98 % et, pour cette raison, en configuration sans contact l'énergie émise est presque totalement réfléchi sur la surface du béton et alors uniquement 2% est convertie en OS. Ce même phénomène se produit lorsque le signal quitte le béton, par conséquent si on prend aussi en compte l'atténuation pour la propagation et le rendement des transducteurs, le signal reçu ne porte que 0.001% ou moins de l'énergie initiale. Afin d'augmenter l'énergie transmise dans l'échantillon, tout en respectant les limitations de la puissance crête d'émetteur, le signal d'émission $s(t)$ est pris sous la forme :

$$s(t) = A(t) \sin \left\{ 2\pi \left[\left(f_o - \frac{B}{2} \right) t + \frac{B}{2T} t^2 \right] \right\} \quad \text{pour } 0 < t < T \quad (1)$$

Le signal à balayage fréquentiel [1] connu sous le nom « *chirp* » représente en effet une sinusoïde de durée T , modulé en fréquence dont la fréquence instantané f_i augmente linéairement en fonction de temps, dans les limites $(f_o - \frac{B}{2}, f_o + \frac{B}{2})$:

$$f_i(t) = \left(f_o - \frac{B}{2} \right) + \frac{B}{T} t \quad (2)$$

ou B est la bande fréquentielle de modulation et f_o est la fréquence centrale. La procédure de réception consiste à appliquer un tel traitement du signal reçu qui remplacera le *chirp* $s(t)$ par une impulsion courte de la durée τ comparable avec la durée d'impulsion générée par un transducteur ultrasonore classique. Un des traitements possibles est connu sous le nom de filtrage adapté et consiste à appliquer au signal reçu la corrélation croisée avec le signal émis. Ainsi le signal de source apparent est simplement une autocorrélation du signal de source. Pour le signal donné par l'équation (1) ce signal apparent devient :

$$k(t) = T \frac{\sin[\pi B t (1 - \frac{|t|}{T})]}{\pi B t} \cos(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

Le signal $k(t)$ ainsi obtenu est connu sous le nom de l'ondelette de Klauder [6]. Il est comparable à celui qu'on pourrait obtenir avec une excitation impulsionnelle traditionnelle à l'aide d'un transducteur ultrasonore opérant dans la bande fréquentielle B et avec la fréquence centrale f_0 . Il présente une impulsion de fréquence dominante f_0 du duré $\tau \approx 1/B$ et sa bande fréquentielle est égale à B . (fig.3). Notons que le niveau crête de $k(t)$ est proportionnel à la durée du *chirp* T ; pourtant la bande fréquentielle de $k(t)$ ne dépend pas du T mais de la bande fréquentielle du *chirp* $s(t)$.

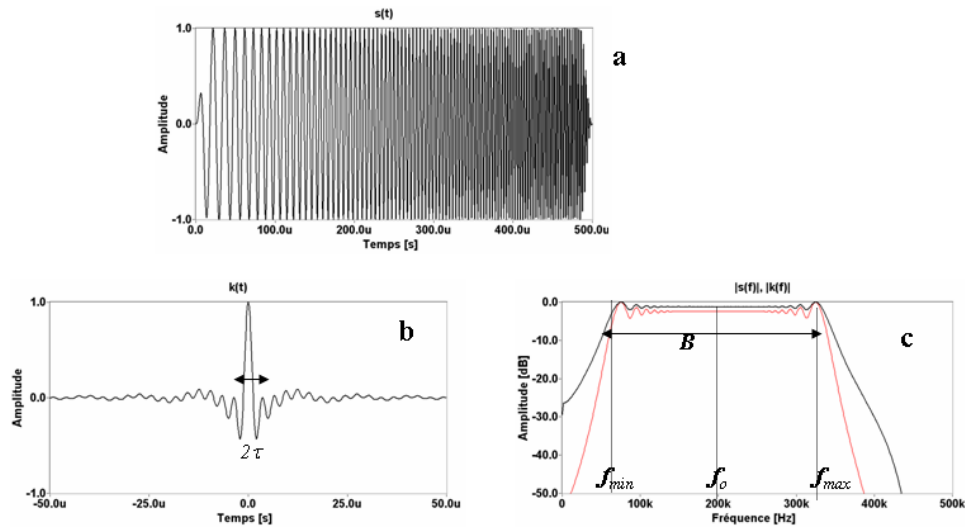


Figure 3. a) Illustration du chirp $s(t)$; b) Son ondelette de Klauder $k(t)$; c) Spectres de $s(t)$ (noir) et de $k(t)$ (rouge)

Cette conclusion exprime l'intérêt de la méthode qui permet d'obtenir le signal du niveau très élevé en utilisant les *chirps* suffisamment longs. En effet, le gain en rapport signal/bruit GS/N par rapport au système impulsionnel traditionnel devient [7] :

$$GS/N = TB = T/\tau \quad (4)$$

ce qui indique que théoriquement, afin d'obtenir un gain en signal il faut utiliser les *chirps* dont le produit TB c'est à dire *Bande x Durée* soit aussi grand que possible. Etant donné que la bande B est toujours limitée par les transducteurs utilisés, un seul moyen d'augmentation du niveau du signal est l'augmentation de la durée du *chirp*.

Dans le cas idéalisé si on néglige l'absorption du milieu, le signal reçu aux distances $R_1, R_2, R_i, \dots, R_N$ aura la forme $s(t - \Delta t_i)$ ou $\Delta t_i = R_i/v$ est le retard de propagation et v est la vitesse de propagation de l'OS. Après le filtrage adapté, le signal reçu à la distance R_i peut être donc représenté comme :

$$x(t, R_i) = k(t - \Delta t_i) \quad (5)$$

La figure 4 illustre le signal émis $s(t)$ et le signal reçu $s(t - R/v)$ et ses ondelettes de Klauder obtenues à la sortie du filtre adapté.

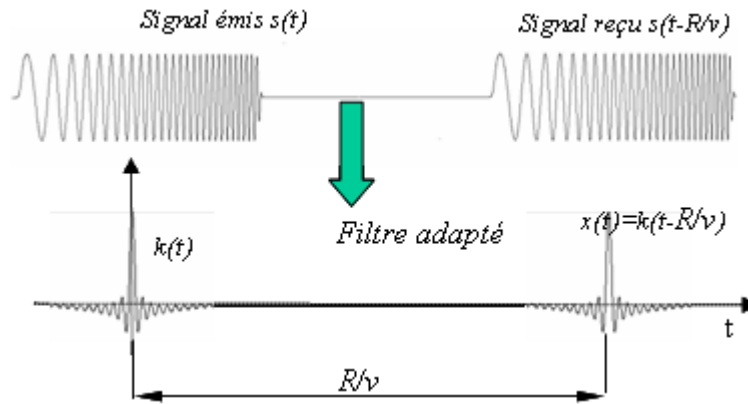


Figure 4. Les « chirps » émis et reçu et les impulsions de Klauder correspondantes obtenues à l'aide du filtre adapté.

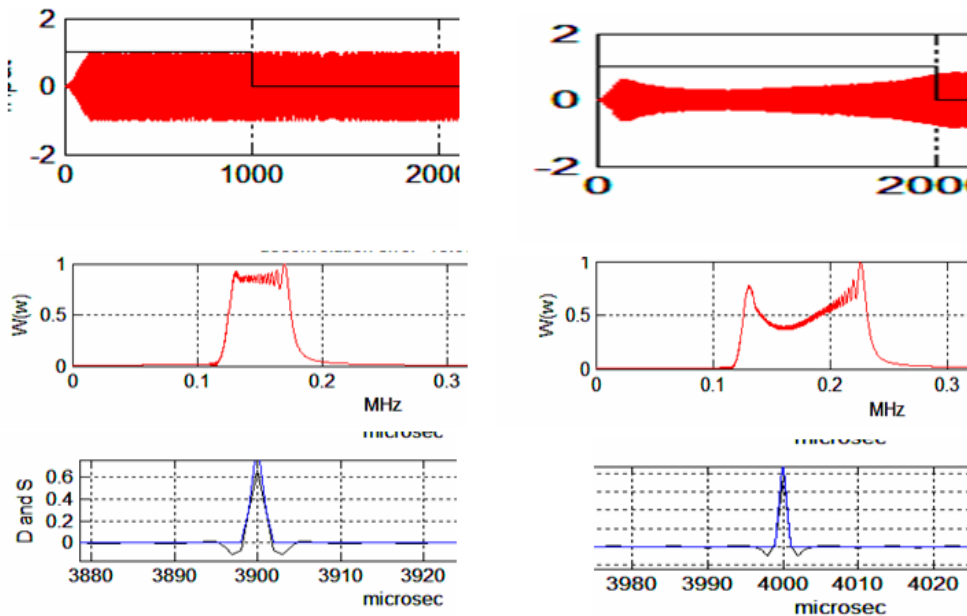


Figure 5.. Gauche : cas sans correction ; droite : cas avec correction ; Haut : signal émis $s(t)$; milieu : $S(\omega)$ correspondant ; bas : ondelette de Klauder.

En réalité un milieu se caractérise par l'absorption $Q(\omega, R_i)$ et dispersion $v(\omega)$ variable en fréquence. De plus, les transducteurs se caractérisent par leur bande passante propre alors équivalente à une caractéristique $T(\omega)$. Dans un tel cas l'Eq (5), exprimée dans le domaine fréquentiel, devient :

$$X(\omega, R_i) = K(\omega) e^{j \frac{R_i}{v(\omega)}} Q(\omega, R_i) T(\omega) \quad (6)$$

et respectivement

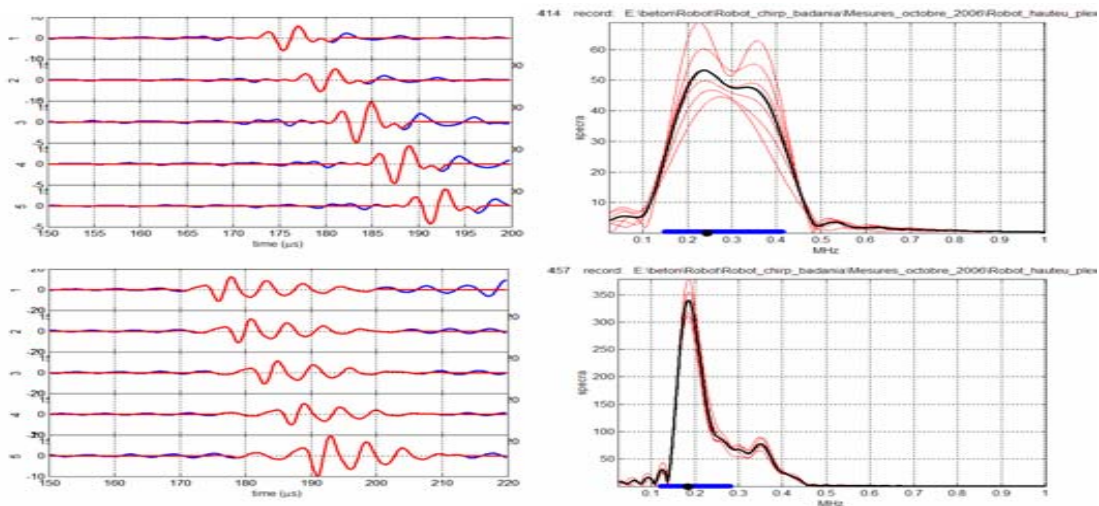
$$x(t, R_i) = FFT^{-1}[X(\omega, R_i)] \quad (7)$$

Cette relation montre que le signal reçu à la distance R_i n'aura pas la forme « parfaite » de $k(t)$ mais une forme déformée par l'absorption, la dispersion et la caractéristique des transducteurs. Etant donné que la fonction $T(\omega)$ décrivant les caractéristiques des transducteurs est à priori connue, son influence peut être compensée par l'introduction d'un filtre correcteur $C(\omega)=T(\omega)^{-1}$ sur le spectre du chirp $S(\omega)$. Le signal émis aura donc le spectre:

$$S_{comp}(\omega)=S(\omega)C(\omega) \tag{8}$$

En pratique, nous n'appliquons aucune correction au signal émis mais nous utilisons le signal $S_{comp}(\omega)$ pour la corrélation croisée pendant le filtrage adapté.

L'exemple des signaux $s(t)$, $S(\omega)$ et $k(t)$ pour les cas avec et sans correction est donné sur la figure (5). Notons que la correction a amplifié le signal émis sur les limites de sa bande ce qui a compensé l'affaiblissement du signal dû à la bande limitée du transducteur. Finalement la bande B du chirp émis a été augmentée et la durée τ obtenue est devenue plus courte que pour le cas sans compensation. La figure 6 illustre l'effet de compensation spectrale sur l'exemple du signal $x(t,R)$ enregistré sur un bloc de plexiglas pour $N=5$ positions du récepteur. L'élargissement du spectre et l'amélioration de la forme temporelle des signaux $x(t)$ sont clairement visibles.



Figure(6). Gauche : signal $x(t,R_i)$ pour $i=1,2,...5$. Droit : spectre de $x(t)$ Haut : avec correction; bas : sans correction

3. TRAITEMENT DES DONNES

La procédure de mesure comprend deux phases : la première, est constituée du « robot » qui assure les déplacements des capteurs, contrôle l'émission et la réception des signaux et réalise aussi le filtrage adapté, la correction spectrale et enregistre les données reçues. L'ensemble est contrôlé par un logiciel créé en environnement LabVIEW. Le signal de sortie est constitué par un signal spatio-temporel $x(t,R_i)$ pour $i = 1, 2, \dots, N$ qui représente les données brutes.

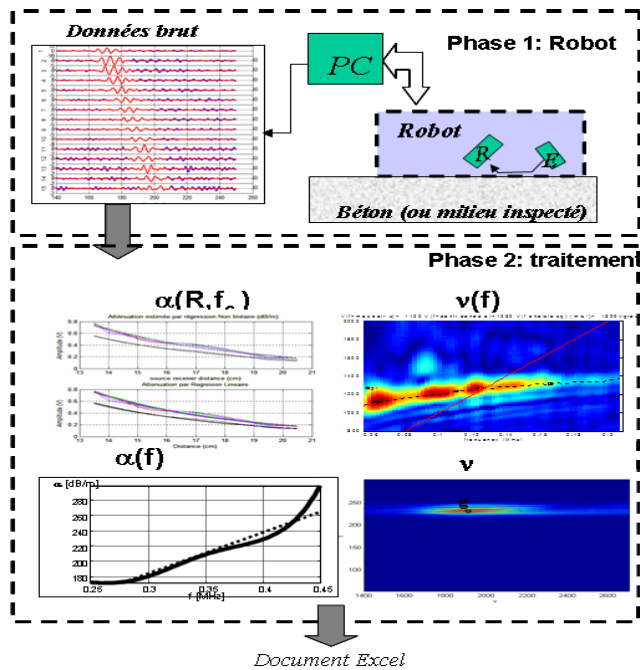


Figure 7. Système de mesure; Section haut : « robot » et signal de sortie $x(t,R)$; Section basse ;; caractéristiques de l'atténuation $\alpha(f)$ et décroissance d'amplitude de x selon l'Eq. (8) ; caractéristique de la dispersion de vitesse $v(f)$, détermination de la vitesse de groupe v_g

Les données « brut » ainsi obtenues sont ensuite traitées dans la deuxième phase par un logiciel **OS** (créé en environnement MATLAB). Afin d'augmenter la fiabilité de mesure dans un milieu non homogène, $v(\omega_0)$ et $\alpha(\omega_0)$ sont calculés indépendamment à l'aide des différentes approches formelles et la valeur finale est estimée comme une moyenne. Finalement l'**OS** détermine :

1. La caractéristique de dispersion des ondes de surface en fonction de la fréquence $v(\omega)$, définie comme :

$$v_{ph}(\omega) = \frac{\omega(R_2 - R_1)}{\varphi_2 - \varphi_1} = \omega \frac{\Delta R}{\Delta \varphi(\omega)} \quad (\text{II.2.1})$$

ou $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ indique la différence entre les phases du signal à deux distances différentes entre le point d'observation et la source ($\Delta R = R_1 - R_2$) ; $v(\omega)$ est calculé à l'aide de la transformation Slant Stack [8];

2. Les quatre valeurs distinctes de la vitesse
 - la vitesse de groupe v_g calculée également à l'aide de la transformation Slant Stack [8]
 - une valeur particulière de vitesse obtenue à partir de la caractéristique de dispersion comme $v(f = f_c)$ ou f_c est la fréquence centrale dominante dans la série $x(t,R)$,
 - deux valeurs de vitesse obtenues par la corrélation croisée des signaux $x(t,R)$ dans le domaine temporel ;
3. La caractéristique du coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence $\alpha(\omega)$ [9] calculée comme

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{R_i - R_j} \left[10 \text{Log} \left(\frac{X_i(\omega)}{X_j(\omega)} \right) - 10 \text{Log} \left(\frac{R_j}{R_i} \right) \right]; \quad (7)$$

pour chaque paire i,j dans l'ensemble de $i = 1 \dots j \dots N$, puis moyenné ;

4. Les huit valeurs particulières de $\alpha(f_c)$ obtenus par la recherche de la meilleure corrélation de la courbe de décroissance des différents attributs du signal $x(R)$ avec l'amplitude de la fonction de Green pour des ondes de surface dans le milieu absorbant :

$$Ampl(X(w, R, a(f_c))) = \frac{e^{-\alpha(f_c)R}}{\sqrt{R}} \quad (8)$$

5. L'atténuation α qui est exprimée également à l'aide du coefficient de qualité $Q(\omega_c) = \pi / [\alpha(\omega_c) \lambda_c]$ utilisé habituellement dans le domaine du Génie Civil.

L'ensemble des paramètres de sortie obtenus pour un profil de mesure (résumé dans le tableau 1) est enregistré automatiquement sous format de document Excel.

Tab.1 Paramètres déterminées à partir les signaux enregistrés pour un profil

Unités	m/s	m/s	dB/m	dB/m	Sans unité
Grandeur calculée	4 valeurs de vitesse v_i , $i=1..4$		8 valeurs d'atténuation $\alpha(\omega_0)_i$, $i=1..8$		Coefficient de qualité Q
Valeur finale de sortie	Valeur moyenne de v + écart type Δv	Courbe de dispersion $v(\omega)$ + écart type	Valeur moyenne $\alpha(\omega_0)$ + écart type $\Delta \alpha$	Courbe d'atténuation $\alpha(\omega)$ + écart type	Valeur moyenne + écart type

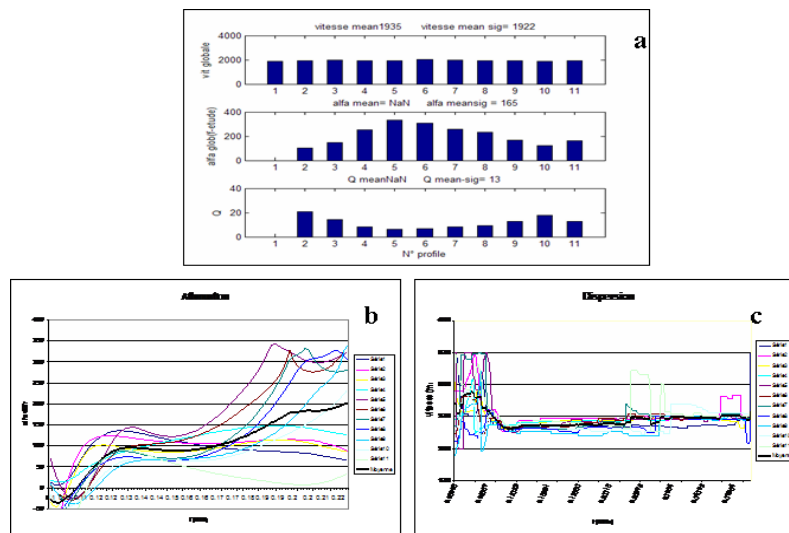


Figure 8. Exemple d'un résultat obtenu sur une dalle de béton à partir de la mesure comprenant $P = 10$ profils a) Vitesse $v(f_c)$, atténuation $\alpha(f_c)$ et $Q(f_c)$ pour le profil 1, 2...10 et leurs valeurs moyennes (valeurs #11); b) caractéristiques de l'atténuation $\alpha(f)$ pour $P = 1, 2...10$ et leur caractéristique moyenne; c) Caractéristiques de la dispersion de vitesse $v(f)$ pour $P = 1, 2...10$ et leur caractéristique moyenne.

Les résultats obtenus pour un profil ne sont pas représentatives à l'échelle de l'échantillon entière en raison de non homogénéité du milieu. Afin obtenir les caractéristiques globales du béton inspecté les mesures sont répétées P fois sur P profils parallèles, espacés de minimum de $\lambda = v/f_c$. Le résultat final est obtenu par le moyennage des valeurs obtenus pour chaque profil. L'exemple d'un tel résultat pour une dalle de béton est illustré sur la figure 8

3. RESULTATS

Les résultats obtenus avec le dispositif sont illustrés par un exemple de mesures réalisées dans le cadre du projet SENSO. Lors de deux campagnes des mesures, 270 éprouvettes de béton sec, de béton saturé en 100% puis saturé partiellement en eau ont été testées. La vitesse des ondes de surface v et l'atténuation α déterminées en fonction de la fréquence puis leurs valeurs pour $f_0 = 150$ kHz ont été analysées en fonction de la porosité du béton, de la saturation, de la taille et du type de granulat. L'influence de ces paramètres, est présentée sur la figure 9. Les relations vitesse/porosité en fonction de la degré de la saturation ne sont pas aussi simples qu'on puisse supposer à la base de la relation théorique simplifiée : $v=v_0(1-aP)$ [10]. Cette relation s'avère valide uniquement pour les porosités faibles. Si la porosité augmente au dessus de 16% la présence d'eau domine la porosité et provoque une augmentation de la vitesse. L'atténuation aussi présente une relation compliquée. Pour la saturation faible (< 40%), l'atténuation augmente approximativement come $\alpha=\alpha_0(1+aP)$ mais pour les saturations supérieures, la quantité d'eau qui favorise la propagation domine et

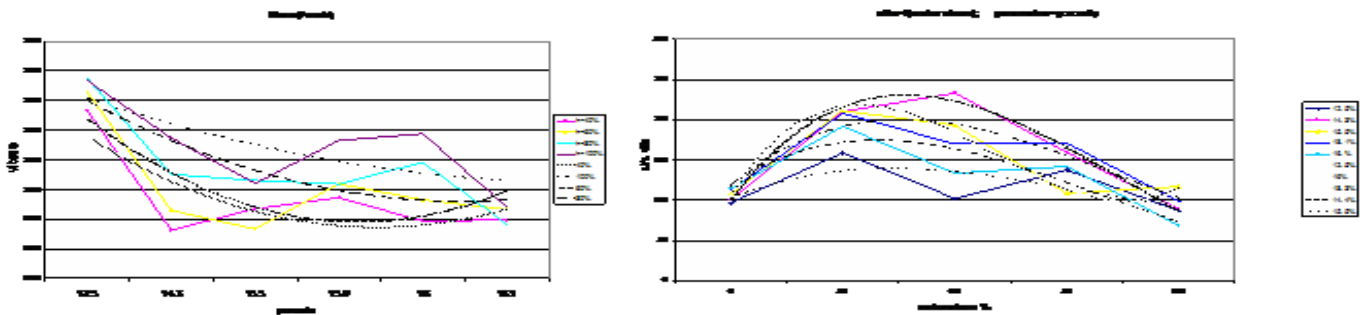


Figure 9. gauche : Vitesse $v(f=150\text{kHz})$ en fonction de la porosité pour différent degrés de saturation ; droit Atténuation $\alpha(f=150\text{ kHz})$ en fonction de la saturation pour différent porosités

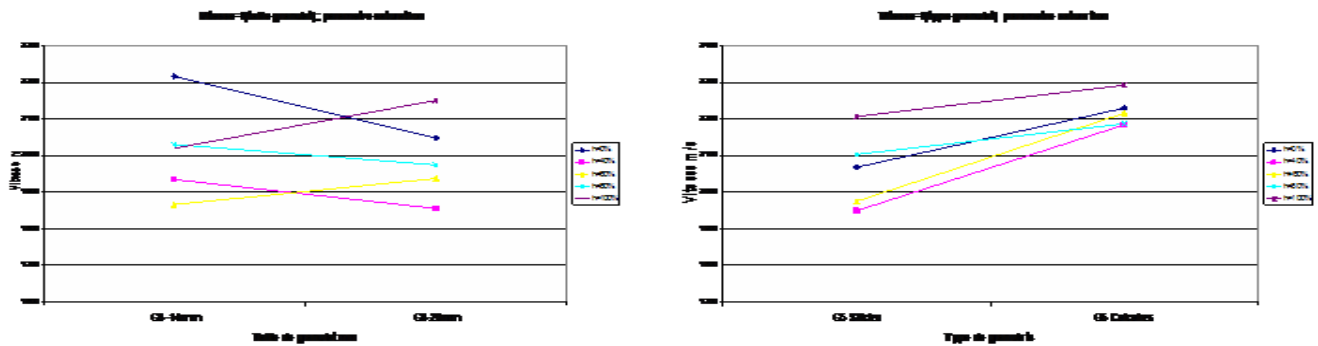


Figure 10 Vitesse des ondes de surface en fonction de : taille de granulat et type de granulat pour differents saturations

En ce qui concerne le taille de granulat, au principe il est admis que si la taille augmente, la vitesse diminue. Les résultats montrent que la présence d'eau peut inverser cette principe. (Fig.10.a). Au contraire unchangement du type de granulat affecte la vitesse indépendamment de la saturation.(Fig.10.b)

Le module d'élasticité dynamique E a été estimé à partir de v et des mesures complémentaires de la vitesse longitudinale v_L et de la densité volumique ρ à partir des relations :

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad v_R = \sqrt{\frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu}} v_T \quad \frac{v_T}{v_L} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (9)$$

Où :

v_L – vitesse de l'onde longitudinale
 v_R – vitesse de l'onde de surface
 E – module de Young
 ν – coefficient de Poisson
 ρ – densité

Il était ensuite confronté aux résultats obtenus par la méthode destructive (module statique). Les résultats obtenus pour les différentes dalles de béton, ayant la porosité et compositions différents, sont représentées sur la figure.11. Pour le béton sec, la précision sur Y obtenu est très bonne, les modules dynamiques et statiques sont bien corrélés et l'erreur ne dépasse pas 7%. Au contraire l'augmentation de la vitesse dans le béton saturé (ref. fig.9) implique une erreur supplémentaire.

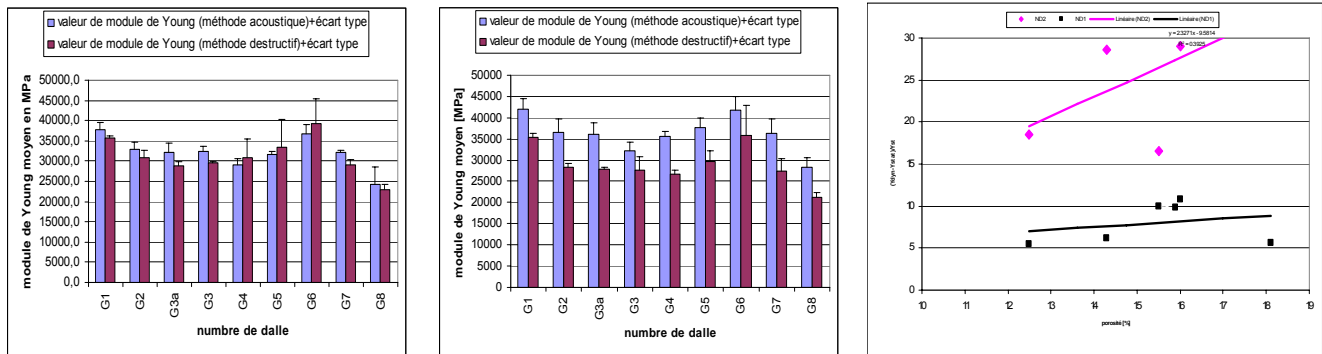


Figure 11 Valeurs du Module de Young Y statiques et dynamiques en fonction du type du béton : dalles sec (gauche) et les dalles saturés 100% (centre), erreur relative (Y dynamique- Y statique)% en fonction de la porosité (droite)

CONCLUSION

- Le système automatisé de mesures ultrasonores est développé, validé et mis à l'épreuve pendant des mesures sur 270 éprouvettes de béton. Il a confirmé son utilité en assurant une mesure de haute qualité avec rendement de $N = 10$ points (un profil) de mesure par minute.
- Le dispositif est totalement portable et ne nécessite l'accès qu'à un seul côté de l'échantillon. Il peut être utilisé dans des conditions différentes; aussi bien dans un laboratoire que sur un chantier.
- Les résultats obtenus comprennent des relations originales entre la vitesse, l'atténuation, la porosité, la saturation et la taille de granulats et constituent une base de données originale qui sera utilisée pour l'évaluation quantitative du béton courant la recherche ultérieure.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet SENSO financé par le Ministère de la Recherche et le Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U)

REFERENCES

- [1] J. Kouassi, Contribution à l'auscultation dynamique des superstructures par les mesures de la célérité et de l'atténuation des ondes planes élastiques-application au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1989.
- [2] J. Perdijs, Le contrôle non destructif par ultrasons, Hermès, 1993.
- [3] Krauträmer J., Krauträmer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 199

- [4] Piwakowski B, Fnine A, Goueygou M., Buyle-Bodin F, " Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples" *Ultrasonics, Volume 42, Issues 1-9, April 2004, Pages395-402*
- [5] Safinowski P.: *Mechanical design of an ultrasonic inspection device for non destructive damage evaluation of concrete structures covers*, Projet l'étudiant, Polytech Lille 2004,
- [6] Klauder, J.R., Price, A.C., Darlington, S. and Albersheim, W.J.: *The theory and design of chirp radars*, Bell System Tech. Journal 39, 745-807, 1960
- [7] Misaridis, T and Jensen, J.A., "Use of Modulated Excitation Signals in Medical Ultrasound ". Part II: Design and Performance for Medical Imaging Applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 52, No 2, 2005
- [8] Yilmaz O, *Seismic Signal Processing*, Society of Exploration Geophysicists (1987)
- [9] Goueygou, M., Piwakowski, B, Ould Naffa, S., Buyle-Bodin, F « Assessment of broadband ultrasonic attenuation measurements in inhomogeneous media" *Ultrasonics 2002* pp 77-82
- [10] Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, M., Kaczmarek, M "Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content" *Cement & Concrete Research*, Vol. 36 n°4, pp. 625-633 (2006).