

JOURNÉES COFREND TOULOUSE 2008

COFREND CONGRESS TOULOUSE 2008

COFREND – 1 rue Gaston Boissier – 75724 PARIS Cedex 15
Tél. 01 44 19 76 18 – Fax. 01 44 19 75 04
E-mail : cofrend@cofrend.com

CARACTERISATION DU BETON A L'AIDE DE LA REFLECTOMETRIE ULTRASONORE

CONCRETE CHARACTERISATION BY ULTRASONIC REFLECTOMETRY

P. Safinowski^{1,2}, B.Piwakowski¹, M. Kaczmarek², A. Kosecki¹

¹ Groupe Electronique Acoustique, Ecole Centrale de Lille (IEMN DOAE UMR
8520 CNRS) BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France, safi1@o2.pl

² Institute of Environmental Mechanics and Applied Computer Science, Bydgoszcz
University, Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz, Pologne

Résumé: L'objectif de ce travail est l'estimation non destructive des paramètres mécaniques des matériaux à l'aide de la réflectométrie ultrasonore. Dans l'article nous présentons le développement du système réflectométrique et sa validation expérimentale. Grâce à la méthode, il est possible de déterminer la vitesse d'onde longitudinale et d'onde transversale par l'analyse des angles critiques pour le signal réfléchi. De plus, à l'aide de la caractéristique du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence, il est possible d'estimer la porosité et le facteur de formation du matériau étudié. Le modèle analytique utilisé pour l'estimation des paramètres du matériau est validé expérimentalement sur les échantillons de porosité connue. La recherche est poursuivie sur les échantillons de porosité contrôlée et sur le béton avec la porosité et la densité connues. Les résultats obtenus sont très encourageants. Ainsi, la réflectométrie apparaît comme une approche très prometteuse pour la détermination non destructive de la porosité. Une des applications possibles est la caractérisation et l'évaluation des matériaux poreux comme le béton. Le dispositif présenté est capable de fonctionner dans l'eau aussi bien que dans l'air, ce qui permet les mesures sans contact.

Abstract: *The estimation of mechanical parameters of materials by ultrasonic non destructive evaluation is the objective of this paper. The development and the experimental validation of our reflectometric system are presented. In this method the longitudinal and shear wave velocities are calculated on the basis of analyse of critical angles of reflected signal. Moreover, the reflection coefficient characteristic in function of incident angle is used to estimate the porosity and formation factor of tested material. The mathematical model used for material parameters estimation is verified on the materials with known porosity. The results obtained from the samples with controlled porosity and these from concrete samples with known porosity are encouraging. This shows that the reflectometric method could become very interesting approach in non destructive tests of porosity in the porous materials like concrete. The device presented in this article can function in water but also in air. This permits measurements without any contact between ultrasonic transducer and examined surface.*

Mots clés : Béton, CND, ultrasons, porosité, module d'élasticité, réflectométrie...

1 INTRODUCTION

Les études de l'onde réfléchie à l'interface fluide – solide ont un grand potentiel en tant qu'une méthode non destructive pour déterminer les paramètres du solide. Dans les méthodes ultrasonores « classiques » des vitesses de propagation d'onde longitudinale v_L et transversale v_T sont mesurées. Sur la base de ces valeurs il est possible de calculer le module d'élasticité Y et le coefficient de Poisson ν . De plus, pour déterminer Y la masse volumique ρ doit être connue ou mesurée avec une autre méthode. La situation devient encore plus compliquée si on considère un matériau poreux comme le béton. Dans cet article deux approches de mesure reflectométrique avec le traitement de données sont présentées.

Dans le premier cas nous considérons les mesures réalisées dans l'eau sur les échantillons du métal (aluminium) et du solide poreux – le verre poreux et le béton. Afin de déterminer les vitesses v_L et v_T nous utilisons les angles critiques de la réflexion d'onde ultrasonore (Eq. 1a, 1b).

$$v_L = \frac{c}{\sin(\alpha_{CL})} \quad (1a)$$

$$v_T = \frac{c}{\sin(\alpha_{CT})} \quad (1b)$$

ou :

c – vitesse du son dans le fluide,

α_{CL} – angle critique pour l'onde longitudinale dans le solide,

α_{CT} – angle critique pour l'onde transversale dans le solide.

Notons que le premier angle critique α_{CL} est l'angle de incidence θ pour lequel l'angle de réfraction α_L est égal à 90° et le deuxième angle critique α_{CT} se produit pour α_T égale à 90° (voir fig. 1a). Les angles critiques se manifestent par les discontinuités de l'amplitude et de la phase de la caractéristique du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence (fig. 1b et 1c).

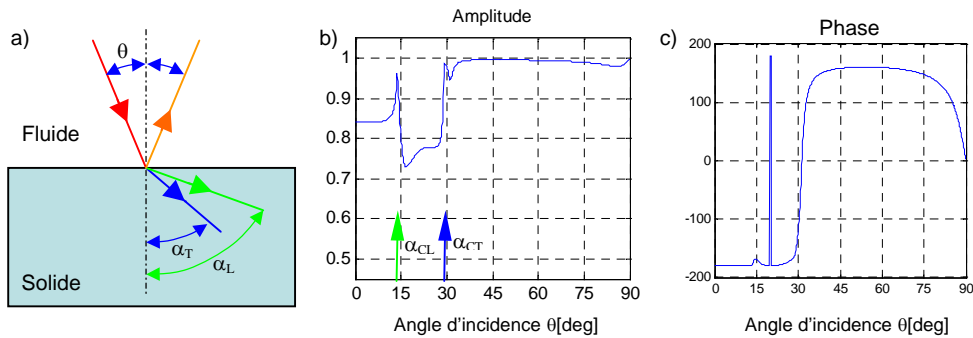


Figure 1.1 a) Schéma de réflexion/transmission des ondes entre liquide et solide, b) Caractéristique théorique du module de coefficient de réflexion $R(\theta)$ entre eau et aluminium c) Phase du coefficient du réflexion.

Les caractéristiques théoriques de l'amplitude et de la phase du coefficient de réflexion (fig. 1.1a et 1.1b) sont obtenues par un simple modèle, basé sur Eq. (2) et Eq. (3), qui suppose la propagation d'une onde plane. De plus, ces équations sont valables uniquement pour la réflexion de l'onde ultrasonore sur l'interface liquide/solide. Cette hypothèse qui exige que les transducteurs se trouvent à une distance $d \gg R_f$, ou R_f est limitée au champ lointain ce qui n'est pas valide pour les transducteurs placés à une distance finie [1]. Afin de modéliser fidèlement les conditions d'expérience, un code de calcul spécifique a été développé : **Angular Spectrum Method (ASM)** (voir courbe bleue sur la

figure 3.1). Ce code est adapté aux mesures dans le champ proche, (d comparable à R_f), et il est basé sur l'approche du spectre angulaire [4], [5], [6].

Afin de trouver les angles critiques il faut analyser la caractéristique du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence.

$$R(\theta) = \frac{1}{N} \left[\left(\frac{v_T}{v_L} \right)^2 \sin 2\alpha_L \sin 2\alpha_T + \cos^2 2\alpha_T - \frac{\rho c}{\rho_s v_L} \frac{\cos \alpha_L}{\cos \theta} \right] \quad (2)$$

où N est un facteur défini comme suit :

$$N = \left[\left(\frac{v_T}{v_L} \right)^2 \sin 2\alpha_L \sin 2\alpha_T + \cos^2 2\alpha_T + \frac{\rho c}{\rho_s v_L} \frac{\cos \alpha_L}{\cos \theta} \right] \quad (3)$$

ou:

- θ – angle d'incidence,
- α_L – angle de transmission de l'onde longitudinale,
- α_T – angle de transmission de l'onde transversale,
- ρ_s – densité du solide,
- ρ – densité du fluide,

A partir des Eqs. (2) et (4), l'analyse du coefficient R (si les autres grandeurs sont connus) permet de trouver la densité du matériau solide ρ_s .

Dans le deuxième cas les mesures sont réalisées dans l'air sur des échantillons poreux. Comme le modèle théorique, nous prenons en considération l'interface entre fluide (l'air) et solide poreux, saturé par le même fluide. Un variant de cette méthode est proposée dans [5] où deux paramètres structuraux P et α sont déterminés à partir de la mesure de l'amplitude du signal réfléchi pour deux angles d'incidence différents. Dans ce modèle, on suppose que le bâti du solide est non déformable, c'est-à-dire l'impédance acoustique du solide est beaucoup plus grande que celle du fluide. On néglige aussi la viscosité de l'air. Sur la base de ce modèle, nous pouvons établir les Eqs. (4) et (5). La relation entre porosité P et coefficient de réflexion R pour un angle d'incidence/réfraction θ est décrite par l'équation 4. Le paramètre α , connu sous le nom de tortuosité peut être trouvé à partir de l'équation 5. Cette équation nécessite la connaissance du coefficient de réflexion pour deux angles d'incidence différents $R_1(\theta_1)$ et $R_2(\theta_2)$. La tortuosité exprime en effet l'état de micro canaux dans un matériau poreux. Ainsi $\alpha = 1$ si les canaux sont droits et perpendiculaires par rapport à la surface, autrement $\alpha > 1$ jusqu'à ∞ pour les canaux fermés. La relation entre la porosité P et la tortuosité α est donnée par le facteur de formation F (Eq. (6)) [6].

$$P = \frac{\alpha(1 \pm R_i) \cos \theta_i}{(1 \pm R_i) \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta_i}} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{(1 \pm R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_2}{(1 \pm R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_1} \right)^2 \sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{\left(\frac{(1 \pm R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_2}{(1 \pm R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_1} \right)^2 - 1} \quad (5)$$

$$\alpha = F * P \quad (6)$$

Grâce aux Eqs. (4) et (5) il est possible de tracer un « nomogramme » qui visualise la relation entre deux coefficients de réflexion R_1 et R_2 , la porosité P et la tortuosité α . La caractéristique est générée pour deux angles θ_1 et θ_2 choisis (voir fig. 1.2a et 1.2b). Les valeurs P et α pour le matériau étudié sont retrouvées à partir des amplitudes du signal réfléchi, mesurées pour ces mêmes angles θ_1 et θ_2 . Plus les valeurs θ_1 et θ_2 sont éloignées, plus les résultats ainsi obtenus sont précis. L'influence de cet éloignement des angles est montrée sur la figure 1.2a et 1.2b.

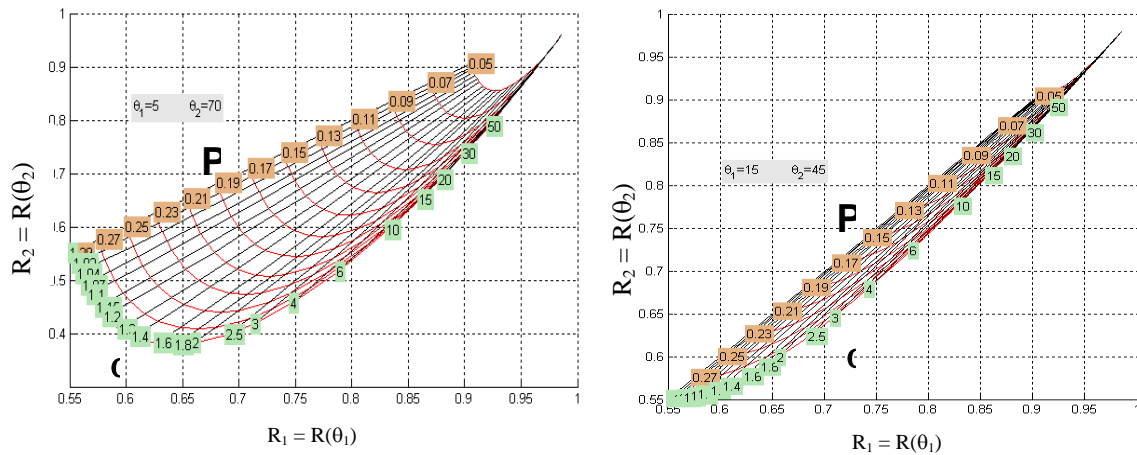


Figure 1.2 Nomogramme a) pour les angles 15° et 45° , b) pour les angles 5° et 70° .

2. DEVELOPPEMENT DU SYSTEME DE MESURES

Le schéma du système de mesures est présenté sur la figure 2.1a. Le signal impulsionnel généré par un pulser ultrasonore est émis par un transducteur et, après sa réflexion sur la surface de l'échantillon, est reçu par le récepteur et enregistré par l'ordinateur via un oscilloscope numérique. Les angles d'inclinaison d'émetteur et de récepteur sont changés automatiquement grâce à un moteur pas à pas, contrôlé par l'ordinateur. La première version du prototype (PI) (fig. 2.1b) a été construite pour fonctionner uniquement dans l'eau, avec une précision angulaire $\Delta\theta \approx 0,1^\circ$ et pour la gamme d'angles θ de 15° à 45° . Ce modèle présentait plusieurs défauts : la proximité des éléments de construction donnait lieu à des réflexions parasites, la partie mécanique n'assurait pas la précision nécessaire, l'intervalle de θ était insuffisant. Pour ces raisons un nouveau dispositif a été construit (PII) (fig.2.1c). Cette réalisation offre beaucoup plus de degrés de liberté : l'appareil peut fonctionner aussi bien dans l'eau que dans l'air (mesures sans contact avec la surface étudiée), la position des capteurs est contrôlée par l'ordinateur avec une précision supérieure à $0,02^\circ$, l'intervalle de θ couvre la zone entre 3° et 72° . La position d'étalonnage avec les capteurs face à face ($\theta = 90^\circ$) est utilisée pour normalisation de caractéristique de réflexion. Pour compenser les variations d'air autour des capteurs, une deuxième paire de capteurs est utilisée comme le signal de référence. La fixation des transducteurs est variable et permet de changer leur distance à l'échantillon entre 0 et 25 cm. L'appareil est léger et facilement portable.

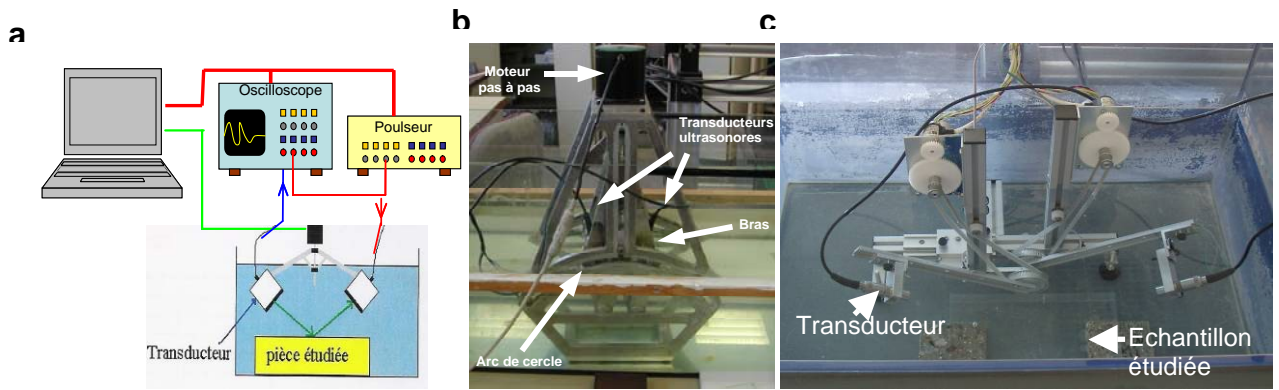


Figure 2.1 a) Schéma-bloc du système des mesures, b) 1^{er} prototype PI c) 2^{ème} dispositif PII.

3. RESULTATS

3.1 Validation

Afin de valider le fonctionnement du dispositif, les résultats des mesures de $R(\theta)$ sont comparés avec les caractéristiques théoriques. Les calculs du module $|R(\theta)|$ et de la phase $\varphi_R(\theta)$ sont réalisés pour les deux modèles.

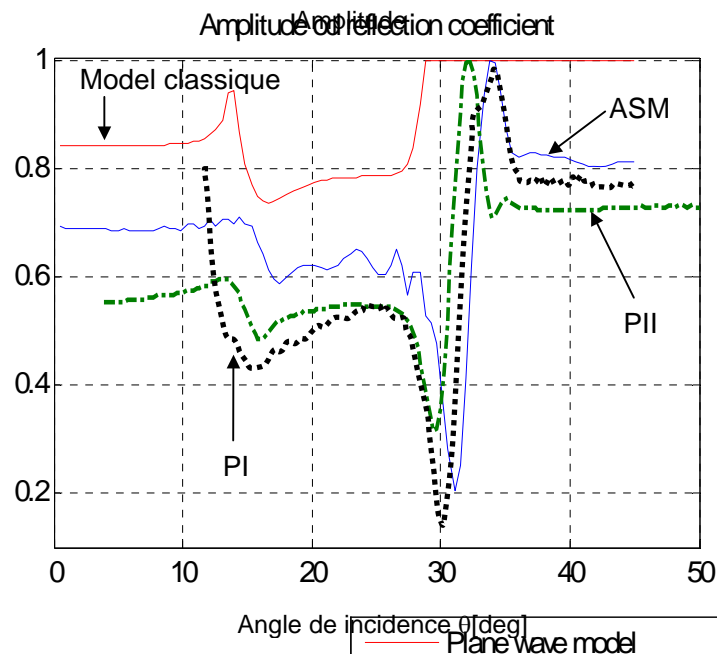


Figure 3.1 Le coefficient de réflexion eau/aluminium par le modèle classique (rouge) [1] et par ASM (bleu) comparé aux mesures par dispositif PI (noir pointillé) et PII (vert).

L'avancement de cette recherche est illustré sur la figure 3.1, sur l'exemple de l'interface « facile » eau/aluminium. Les comparaisons de la courbe $R(\theta)$ obtenue avec le PI avec celle obtenue avec le PII et, de plus, avec les calculs théoriques, montrent clairement que :

- le prototype II assure un résultat très proche (au niveau de la forme de la courbe) aux résultats obtenus à l'aide de l'ASM et ce résultat peut être considéré comme référence,

- pour les angles inférieurs à 25° , la différence entre les résultats des mesures avec PI et PII est importante, ce qui confirme que le cahier de charges formulé pour le prototype II était correct,
- les différences entre la courbe théorique et les mesures pour la PII sont probablement dus au positionnement imprécis de l'échantillon par rapport au dispositif.
- Le calcul à l'aide de l'ASM donne les résultats très différents au regard des calculs basés sur les Eqs. (2) et (3), ce qui confirme que l'utilisation du modèle en champ proche est indispensable.

3.2 Mesures dans l'eau

La figure 3.2.a montre le module de $R(\theta)$ obtenu sur les échantillons de verre de porosité contrôlée. Il est clairement visible que la porosité affecte considérablement les résultats, ce qui confirme l'intérêt potentiel de cette approche pour une mesure indirecte de P .

La figure 3.2.b montre l'effet de la saturation progressive du béton par l'eau. A partir de ces résultats on peut déduire que :

- après le temps 40 min l'échantillon est presque saturé (courbe R n'évolue plus) ;
- à partir des angles critiques et Eq. (1) on trouve les vitesses dans le béton : $v_L(t = 10 \text{ min}) = 4185 \text{ m/s}$ et $v_L(t = 40 \text{ min}) = 5130 \text{ m/s}$.

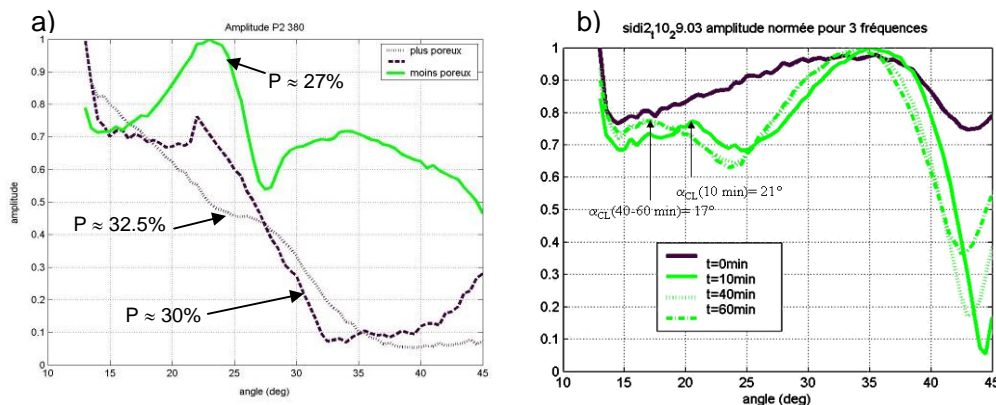


Figure 3.2 a) Le module du $R(\theta)$ en fonction de la porosité de verre (les échantillons avec la porosité 27%, 30% et 32.5%), b) Le module du $R(\theta)$ en fonction de la saturation du béton par l'eau (en fonction du temps écoulé dès la mise dans l'eau).

3.3 Mesures dans l'air

Les mesures dans l'air ont été réalisées sur trois types d'échantillons poreux. L'acier perce avec les canaux droits de diamètre 2 mm et perpendiculaires par rapport à la surface (fig. 3.3a). Pour cet échantillon la tortuosité $\alpha = 1$ et la porosité $P = 34\%$. Les porosités dans l'échantillon de verre poreux (fig. 3.3b) et dans le béton (fig. 3.3c) ont été mesurées avec une bonne précision par la porosimétrie mercure, et nous avons trouvé $P = 27.25\%$ et $P = 12.5\%$ pour le verre et le béton respectivement. La tortuosité dans l'échantillon b a été mesurée par méthode électrique ; $\alpha = 1.55$. La tortuosité du béton était inconnue.

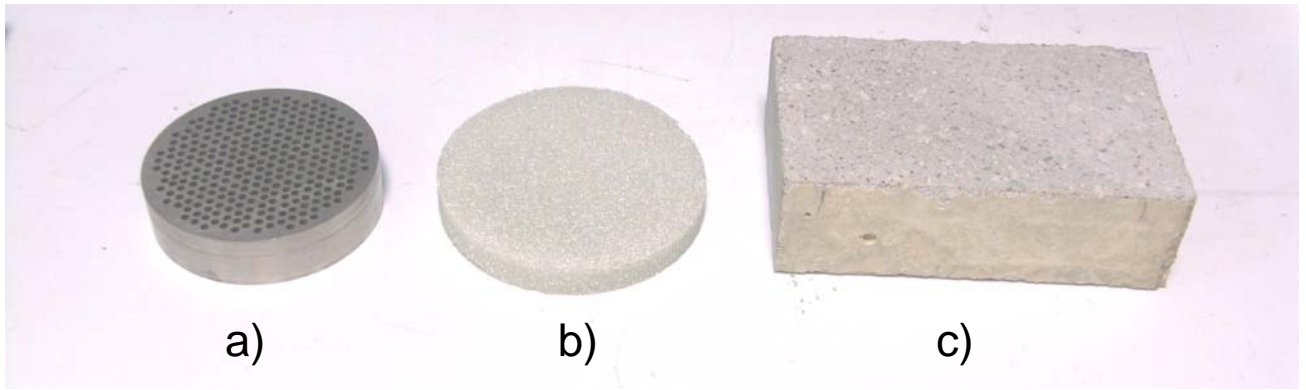


Figure 3.3 Les échantillons poreux a) acier perforé, b) verre poreux, c) béton.

La comparaison des valeurs mesurées (P_m et α_m) à l'aide de la réflectométrie avec les valeurs obtenues l'aide des autres méthodes (P_t et α_t) est montrée dans le tableau 1. Les valeurs du coefficient de réflexion mesurées pour deux angles d'incidence 5° et 70° sont utilisées pour retrouver la porosité P et la tortuosité α grâce au nomogramme présenté sur la figure 3.4. Une différence importante obtenue pour l'acier peut être due au fait que, dans ce cas, la longueur d'onde est comparable avec la taille des canaux. Dans les autres cas la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la taille de fissuration et la précision d'estimation de la porosité est très bonne.

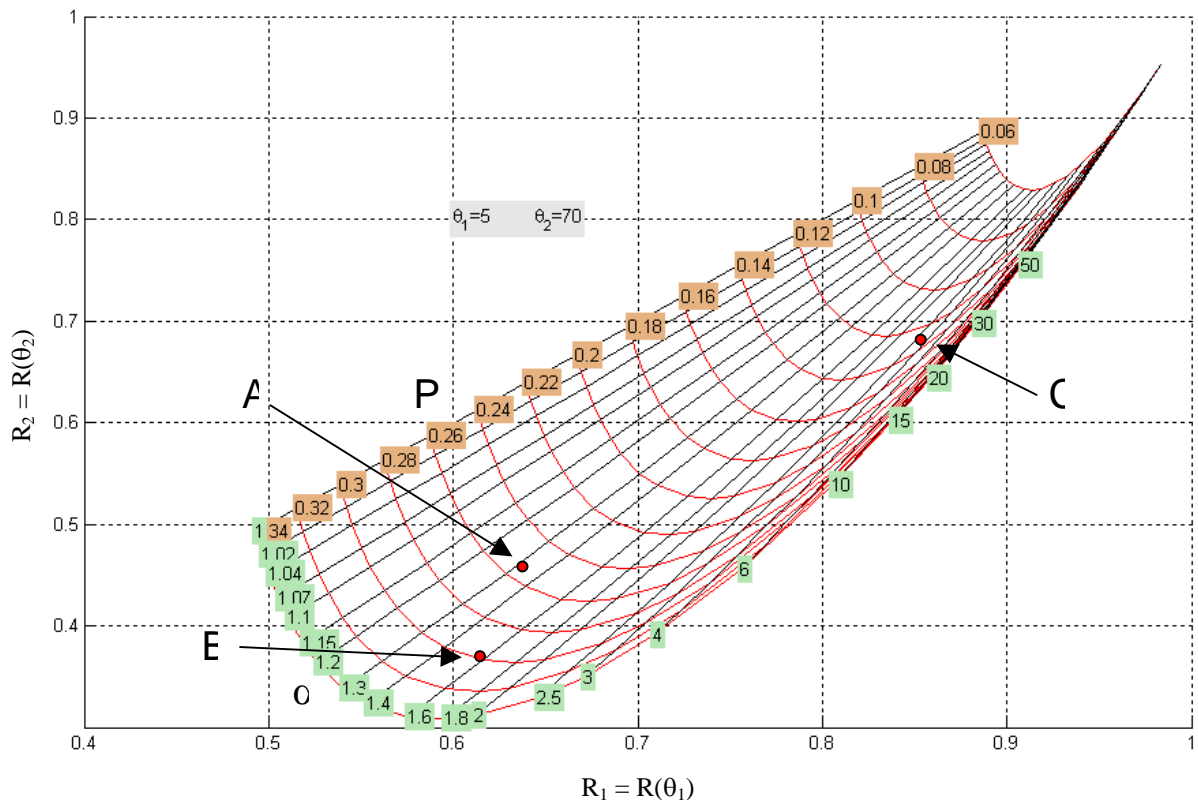


Figure 3.4 Nomogramme utilisé pour retrouver les paramètres P et α , généré pour les angles $\theta_1 = 5^\circ$ et $\theta_2 = 70^\circ$, A – acier fissuré, B – verre poreux, C – béton.

Tableau 1. Les valeurs des paramètres P et α mesurées et théoriques

Échantillon poreux	$R_1(\theta_1)$	$R_2(\theta_2)$	P_m	α_m	P_t	α_t
Acier fissuré	0.63	0.47	25.5	1.3	34%	1
Verre poreux	0.61	0.37	30%	1.55	29%	1.55
Béton	0.86	0.68	12.5%	2.5	12.5%	-

4. CONCLUSION

La méthode reflectométrique sur la base des mesures dans l'eau (avec contact) montre un potentiel pour la détermination des valeurs de v_L , v_T , P , α et ρ_s par une seule mesure de $R(\theta)$.

Néanmoins, les plus intéressants semblent être les estimations de la porosité obtenues sur la base des mesures dans l'air (sans contact). Dans un tel cas, en raison de très faible énergie du signal qui entre dans l'échantillon, la mesure des v_L et v_T semble d'être impossible, mais les paramètres P , α et ρ_s restent mesurables. La validation et les tests effectués avec ce système démontrent la fiabilité de cette approche. La combinaison de cette méthode avec une autre méthode sans contact, (déjà existante : [7], [8]) permettra de constituer un système complet de la mesure des paramètres du béton. Malgré les bons résultats obtenus, le système réflectométrique dans l'air nécessite certaines améliorations par exemple la compensation de changement des paramètres de l'air pendant la mesure et la modernisation du système de positionnement de l'échantillon ausculté. Quant aux modèles théoriques, ils nécessitent aussi une vérification d'influence des paramètres qui sont négligés dans l'approche présentée, comme la qualité de la surface ou l'épaisseur de l'échantillon.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Krauträmer J., Krauträmer H.: „*Ultrasonic Testing of Materials*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990
- [2] Chen W., Wu J., „*Reflectometry using longitudinal sheat and Rayleigh waves*“, Ultrasonics 38, pp 909-913,2000
- [3] Guy E. G., S. J. Radzevicius, J. P. Conroy; „*Computer programs for application of equations describing elastic and electromagnetic wave scattering from planar interfaces*“ Computer and Geosciences 29 (2003)
- [4] Kolesnikov Y.; „*Reflection of ultrasonic pulses from the interface between water and non-perfectly elastic media: experimental data for the case of oblique incidence*“ Physical Mesomechanics 8 1-2 (2005).
- [5] Fellah Z, E. A., S. Berger, Lauriks W., Depollier C., Aristégui C., Chapelon, J. – Y. Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence, *J. Acoust. Soc. Am.*, 113, 5, 2003, 2424-2433.
- [6] Hoffren H., Karpinnen T., Kohout T., Hggstrom E., Pesonen L., „*Measuring porosity and tortuosity of rocks by means of airborne ultrasound*“, American Geophysical , Fall Meeting 2004,
- [7] Safinowski P., Piwakowski B., Balayssac J-P., Goueyqou M., Kosecki A. “Controle non destructif du beton par ultrasons a l'aide d'un dispositif automatise” DIAGNOBETON, Aix en Provence, 10-11 mai 2007.

[8]. B.Piwakowski, P. Safinowski, A.Kosecki: »Contrôle Non Destructif Du Béton Par Ultrasons A L'aide D'un Dispositif Automatise » , Journées Cofrend, Toulouse 2008