

Nondestructive characterization of ornamental rocks with ultrasound

Dris El Abassi¹, Bouazza Faiz¹, Abedrahmane Ibhi², Idris Aboudaoud¹, Salma Aziam¹

¹Laboratoire de Métrologie et Traitement de l'Information, Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

²Equipe de Pétrologie, Minéralogie et Matériaux (EPM), Département de Géologie, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

Abstract. Because of their esthetic, mechanical and thermic properties, marble and granite are the most used ornamental rock for the construction of buildings. In the last years the characterization of these materials received a high scientific and practical attention. Yet the actually disposable methods of inspection are sometimes inadequate, expensive and destructive. Under all the newly developed methods the ultrasound method appears to be the most attractive because it allows to determine the physical properties of marble and granite in a nondestructive, nonexpensive and practical way. For this purpose we used two identical piezoelectric transducers with a central frequency of 5 MHz in order to measure the transmission of ultrasound through rock samples for determining their ultrasound parameters, i.e. the longitudinal and transversal velocity as well as the damping of ultrasound waves inside the rock samples. We present also a discussion of the factors, which are responsible for the variation of the velocity and the damping of the ultrasound waves. We also studied, if it would be possible to use the dispersion of Lamb modes as a new alternative for replacing the ordinary destructive tests used by geologists (thin sections, electron microprobe, rock powder etc.) with a nondestructive ultrasound technique in order to classify rocks. Our work confirmed that the velocity and damping of ultrasound waves in marble and granite might be used efficiently as criteria for estimating the mechanical properties of these materials.

1 Introduction

Les techniques ultrasonores sont des techniques non-destructives et faciles à appliquer. Elles sont généralement utilisées à la fois dans le site et en laboratoire pour caractériser et déterminer les propriétés physiques des roches. Plusieurs chercheurs [1] (D'Andrea et al., 1965); [2] (Deere et Miller, 1966); [3] (Youash, 1970); [4] (Gardner et al., 1974); [5] (Lama et Vutukuri, 1978); [6] (Inoue et Ohomi, 1981); [7] (Gaviglio, 1989); [8] (Yasar et Erdogan, 2004)) ont étudié la relation entre les propriétés physiques des roches et leurs paramètres ultrasonores. Ils ont déduit deux constatations intéressantes: (i) la vitesse des ultrasons est étroitement liée aux propriétés dynamiques des roches, (ii) l'existence d'un certain nombre de facteurs qui influence l'atténuation et la vitesse des ondes ultrasonores dans les roches. Ces facteurs sont: la taille des grains, la forme, le type, la densité volumique, les propriétés élastiques, la porosité et l'anisotropie de la roche [8, 9, 10].

Dans ce travail, nous proposons une méthode ultrasonore pour caractériser les roches ornementales (marbres et granites). Ces roches ont de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux de construction. L'utilisation de ces roches a nettement augmenté durant cette dernière décennie dans la construction des bâtiments. Cela nécessite la mise au point de techniques de contrôle efficaces afin de répondre aux règles de qualité et de sécurité souhaitées. Ce travail vient pour répondre à ces consignes et vise à renforcer la

recherche appliquée sur les roches ornementales au Maroc en vue de les caractériser et de les promouvoir auprès des investisseurs nationaux et étrangers.

Pour caractériser ces roches, nous avons utilisé la méthode en transmission pour mesurer les paramètres ultrasonores spécifiques des marbres et des granites. Les mesures expérimentales sont effectuées par le biais de deux transducteurs plans et identiques de fréquence centrale 5MHz. Les échantillons des roches étudiés sont préparés sous forme de plaques de 4 mm d'épaisseur, 10 cm en longueur et 5 cm en largeur. D'autre part, nous avons essayé d'utiliser le dispositif expérimental mis au point au laboratoire afin de générer et de détecter les ondes de Lamb au sein des échantillons étudiés. Ainsi, nous avons tracé les courbes de dispersion des modes de Lamb en représentant les angles de rotation de la cible en fonction de la fréquence [11]. Pour exploiter ces courbes de dispersion, nous avons pensé à nous servir de la sensibilité des pentes de descente des différentes modes de Lamb en fonction de la grandeur fréquence-épaisseur comme critère significatif pour caractériser les roches étudiés.

2 Les roches étudiées

Le granite est une roche magmatique plutonique à texture grenue, c'est-à-dire entièrement cristallisée et composée de minéraux bien développés et visibles à l'œil nu. Celle-ci est le résultat du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma qui formeront des plutons, ces derniers étant actuellement en surface grâce au jeu de

l'érosion qui a découpé les roches sus-jacentes. Ces magmas, acides (c'est-à-dire relativement riches en silice) sont essentiellement le résultat de la fusion partielle de la croûte terrestre continentale. La composition chimique moyenne du granite est : SiO₂ : 72.5 %, Al₂O₃ : 14 %, (Na₂O, K₂O) : 9.5 %, oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca) : 2 %. Le granite est une roche acide, dense (densité moyenne : 2,7) [12,13].

Le marbre est une roche métamorphique qui a subi une augmentation de la pression et de la température par rapport à d'autres roches sédimentaires, notamment les calcaires et les dolomies. Si les sédiments originels sont formés de carbonates pratiquement purs, les produits du métamorphisme donnent un marbre blanc qui est utilisé pour la décoration. Le marbre cipolin est un marbre au sens strict, c'est à dire un calcaire ayant acquis un grain régulier et homogène par suite d'une recristallisation. Ce sont des roches métamorphiques faiblement recristallisées, qui n'ont pas développé d'autres minéraux que de la calcite et qui se singularisent en général par l'absence de feuilletage (ce qui indique un échauffement sans action de fortes pressions).

3 Expériences de laboratoire

3.1 Préparation des échantillons

Dans cette étude, la préparation des échantillons pour les caractériser par la technique ultrasonore est très importante car cette étape s'avère décisive pour préparer au mieux la roche au format adaptée. Pour bien élaborer l'échantillon, deux étapes sont à suivre : la première est le découpage via une scie à disque diamanté, pendant cette étape l'opérateur tente à découper la roche sous forme d'une plaque à faces parallèles tout en respectant les dimensions [10cm x 5cm x 4mm]. La deuxième étape concerne le polissage de la plaque. Cette étape a pour but d'obtenir une surface la plus lisse possible. Pour mener à bien cette opération de polissage, un disque en fonte est disponible. Le polissage sur le disque est effectué à l'aide de la poudre de Silice selon la dureté du matériau, le choix de différentes granulométries des grains est effectué. Le tableau 1 représente les échantillons des roches étudiées ainsi que leurs localisations et leurs classes.

Table 1. Description des roches étudiée

Code d'échantillon	Type de roche	Localisation	Classe de roche
1	Marbre (Cipolin)	Benguerir (Maroc)	métamorphique
2	Marbre blanc	Lakhsas (Maroc)	métamorphique
3	Granite gris	Tafraoute (Maroc)	magmatique
4	Granite rose	Tafraoute (Maroc)	magmatique

3.2. Dispositif de mesure

Pour mesurer les vitesses longitudinale et transversale ainsi que l'atténuation des ondes ultrasonores dans les échantillons, nous avons utilisé la technique ultrasonore en transmission. Le dispositif expérimental est constitué d'un générateur d'impulsions qui envoie des impulsions électriques à un transducteur ultrasonore qui génère en réponse à cette excitation des ondes ultrasonores qui se propagent dans l'eau. Après ces ondes vont traverser l'échantillon à caractériser, ensuite elles seront captées par un deuxième transducteur identique qui joue le rôle de récepteur. Ce dernier fait la conversion des ondes reçues en signal électrique qui sera visualisé à l'aide d'oscilloscope. Après l'opération du moyennage, les signaux ultrasonores visualisés seront envoyés vers l'ordinateur par le biais d'une carte d'acquisition de données National Instruments. Nous avons développé une plate forme sous l'environnement du logiciel LabView qui nous permet, par son interface, le traitement des signaux acquis, ainsi que la détermination des paramètres ultrasoniques des roches étudiées.

Les deux transducteurs sont placés face à face sur le même axe, de part et d'autre de la plaque rocheuse figure 1. Au début, nous faisons l'acquisition du signal ultrasonore transmis en incidence normale, après nous faisons la rotation de la cible à l'aide d'un moteur pas à pas (avec précision 10⁻³) par un angle de rotation d'un degré. Pour chaque angle de rotation, nous faisons l'acquisition du signal temporel transmis. Nous continuons ce processus jusqu'à l'angle critique correspondant à la plaque rocheuse. Cet angle critique se traduit par la disparition du signal ultrasonore transmis. En conclusion, pour chaque angle d'incidence, le signal temporel transmis est enregistré et son amplitude spectrale est calculée. Après nous superposons les amplitudes spectrales calculées dans un fichier résultat et enfin à l'aide du logiciel Spyglass nous déduisons la courbe de dispersion des modes de Lamb de la cible rocheuse.

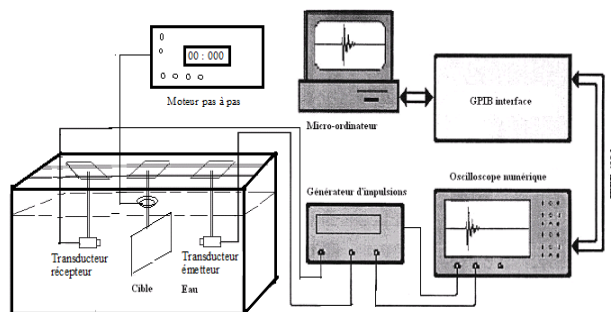


Fig.1. Schéma du montage de transmission.

3.1 Préparation des échantillons

En utilisant le montage expérimental bistatique décrit dans le paragraphe précédent, on reçoit en incidence normal le signal transmis qui est composé de plusieurs échos dus aux réflexions multiples à l'intérieur de la plaque rocheuse du Marbre de 4 mm d'épaisseur figure 2. La figure 3 représente le spectre de signal transmis par cette dernière.

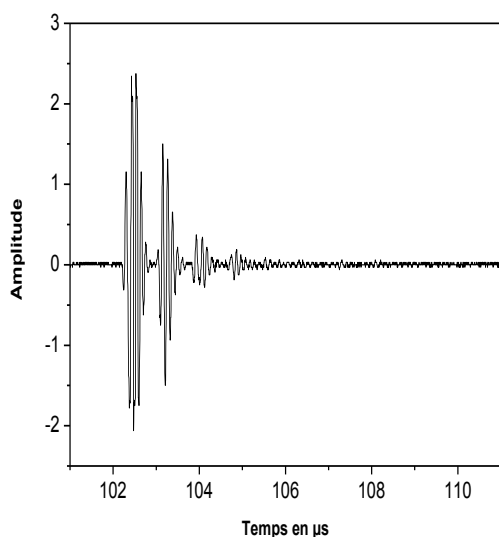


Fig.2. Signal transmis par une plaque rocheux de Marbre de 4 mm d'épaisseur.

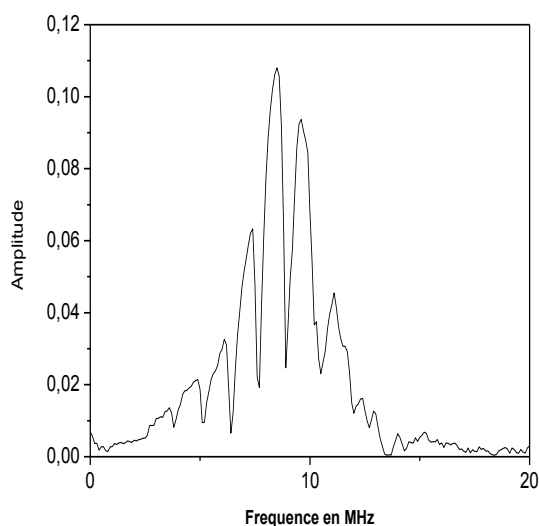


Fig.3. Spectre transmis d'une plaque rocheux de Marbre de 4 mm d'épaisseur.

4 Résultats et discussions

4.1 Propriétés ultrasoniques et mécaniques des échantillons étudiées

Le tableau 2 ci-dessous illustre les résultats expérimentaux des mesures ultrasonores. Dans ce tableau, nous avons noté les mesures des vitesses longitudinale (V_L) et transversal (V_T) ainsi que l'atténuation (α). Pour la densité volumique (ρ) et la porosité (ϕ), nous les mesurons expérimentalement. Ensuite à partir des mesures des vitesses, nous déduisons les propriétés mécaniques des échantillons à savoir: le module de Young (E) et le coefficient de poisson (ν).

Table 2. Les propriétés mécaniques et ultrasonores des échantillons étudiées

propriétés	Marbre Cipolin	Marbre blanc	Granite rose	Granite gris
V_L [m/s]	4256	4942	4306	4705
V_T [m/s]	2343	2846	2746	3069
ρ [kg/m ³]	2720	2728	2617	2690
α dB/m	18	63	66	33
E [GPa]	38,30	55,32	45,67	57,24
ν	0,28	0,25	0,15	0,12
ϕ [%]	2,06	2,04	2,42	2,23

Les valeurs des vitesses mesurées expérimentalement par cette technique ultrasonore ainsi pour les densités volumiques sont en concordance avec les valeurs trouvées en littérature. Ce résultat nous donne la confirmation que notre technique est valable pour la caractérisation des roches du point de vue ultrasonore et nous permet de remonter aux propriétés mécaniques de ceux-ci. De nombreux travaux ont été réalisés ces dernières années, dans le but de déterminer les propriétés physico-mécaniques des roches à partir de la mesure de la vitesse des ondes longitudinales [6, 9,10]. L'originalité de notre travail consiste dans l'utilisation des plaques rocheuses au contraire des massives rocheux sous forme des éprouvettes [8]. L'avantage de notre technique consiste dans son caractère non destructif, rapide et aboutissant à des résultats fiables. Une première application immédiate de cette technique est la caractérisation des roches de construction en génie civil.

4.1 La dispersion des modes de Lamb dans les roches

Les figures 2, 3, 4 et 5 ci-dessous illustrent les courbes de dispersion des modes de Lamb des plaques rocheuses étudiées. Pour chaque roche, nous représentons la courbe de dispersion correspondante. Les courbes de dispersion diffèrent d'un échantillon à un autre au niveau du nombre, la position et la forme des modes (Figures 2, 3, 4, et 5). Pour les deux échantillons du marbre, nous remarquons que la forme des modes est la même mais la différence consiste dans le nombre des modes ainsi que leurs localisation. Le nombre de modes de Lamb dans le marbre cipolin est grand par rapport au marbre blanc. Concernant les deux échantillons du granite, nous observons que les courbes de dispersion correspondantes ne sont pas assez lisibles, mais quand même nous remarquons que la forme des modes est la même pour les deux granites et la différence est le nombre des modes de Lamb. Le nombre des modes dans le granite rose est plus grand par rapport au granite gris. Nous pouvons expliquer la différence des courbes de dispersion des échantillons étudiées par la différence de la taille des grains qui les composent.

Pour aborder la faisabilité de la caractérisation des roches à partir des courbes de dispersion correspondantes, nous avons tenté de travailler sur la forme de ces modes en tenant compte du calcul de la pente de descente pour chaque mode dans la bande des fréquences [3 ; 5 MHz] et l'intervalle des angles de rotation [0° ; 5°] comme critère significatif. Nous avons choisi cette bande de fréquences car c'est autour de cette dernière que la majorité des modes est présente, d'ailleurs celle-ci est aussi la bande centrale des deux transducteurs utilisés dans l'étude expérimentale. Pour l'intervalle des angles de rotation choisi, nous sommes obligés de travailler sur cette intervalle car au-delà de cette intervalle la forme des modes change et par conséquent leurs pentes aussi.

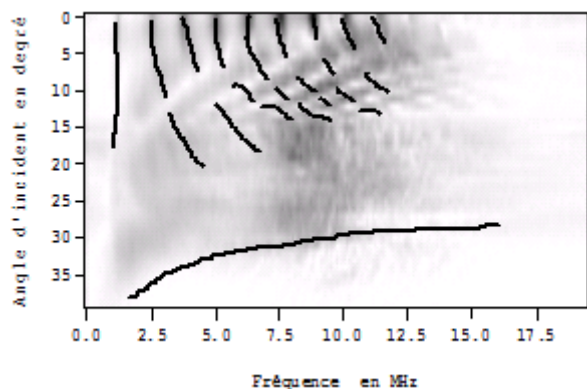


Fig.2. Courbes de dispersion pour le Marbre cipolin

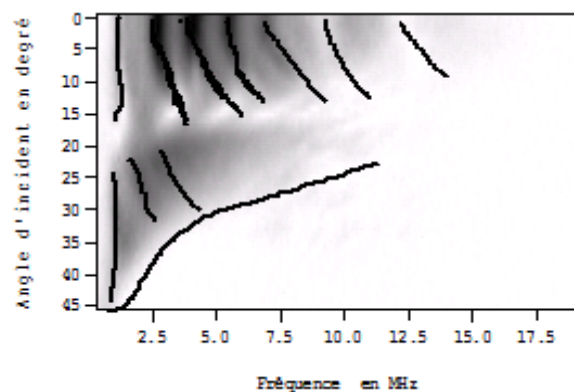


Fig.3. Courbes de dispersion pour le Marbre blanc

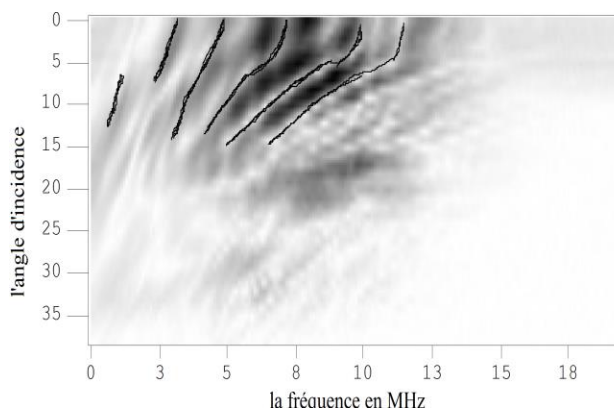


Fig.4. Courbes de dispersion pour le granite rose

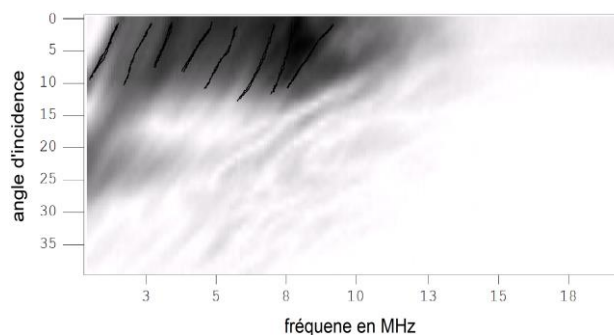


Fig.5. Courbes de dispersion pour le granite gris

4.1 La pente et le produit Fréquence. Epaisseur des modes de Lamb des roches dans la bande des fréquences [3MHz ; 5MHz]

Les tableaux 3, 4, 5 et 6 montrent les valeurs calculées des pentes pour chaque mode de Lamb situé dans la gamme des fréquences [3MHz ; 5MHz] et dans l'intervalle des angles de rotation [0°, 5°]. D'après ces valeurs, nous constatons que la pente peut être négative ou infini. En se basant sur les valeurs calculées de la pente, nous pouvons classer les échantillons des roches étudiées en deux classes : la première classe ayant la pente négative pour les deux roches granitiques (granite rose, granite gris) et comme nous le savons, le granite fait partie des roches magmatiques; la deuxième classe ayant la pente infinie pour les deux roches du marbre (marbre blanc ; marbre Cipolin), d'ailleurs le marbre fait partie des roches métamorphique.

En comparant cette classification par rapport à celle des géologues, nous observons que la classification du point de vue ultrasonore est analogue à celle des géologues. Etant donné que la classification géologique est basée principalement sur le mode de formation des roches, notre classification ultrasonore est basée sur le calcul de la pente de descente des modes.

Tableau 3. Pente de descente des modes de Lamb dans le marbre Cipolin

Marbre Cipolin	mode	3	4
	F x d	15,6	20,4
	pente	infini	infini

Tableau 5. Pente de descente des modes de Lamb dans le granite rose

Granite rose	mode	1	2
	F x d	12,4	19,2
	pente	- 10	- 10

4 Conclusion

Nous avons pu démontrer par cette étude la validité de notre technique ultrasonore pour mesurer les paramètres ultrasonores des roches ornementales, ainsi que leurs propriétés mécaniques. Nous avons trouvé des valeurs des vitesses, longitudinale et transversale, qui sont situés dans les intervalles mentionnés dans la littérature. L'originalité de notre étude consiste à l'utilisation des courbes de dispersion des modes de Lamb comme une nouvelle alternative pour caractériser et faciliter la classification des roches, au contraire des méthodes basées sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales (Onde P). Les échantillons sélectionnés pour cette étude sont de nature pétrographique différente (granites et marbres) et se distinguent les unes des autres par leur coloration, structure, texture, densité et composition chimique. Dans notre étude, nous avons dégagé le lien qui existe entre la nature pétrographique de la roche et la pente de descente des différentes modes de Lamb dans sa courbe de dispersion. Nous avons montré que la pente de descente est un critère significatif et décisif pour classer les roches du point de vue ultrasonore. Cette étude a démontré aussi que la technique ultrasonore développée pendant ce travail peut être adapté pour caractériser les roches d'une manière non destructive et non couteuse. Une recherche plus poussée pour d'autres types de roches est envisageable, en se basant toujours sur notre méthode d'utilisation des courbes de dispersion des modes de Lamb.

References

1. D.V. D'andrea, R.L. Fische, D.E. Fogelson. U.S, Bureau of Mines Report of Investigations 6702 (1965).
2. D.U. Deere, R.P. Miller, Air Force Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland Base, New Mexico (1966).
3. Y. Youash. Dynamic physical properties of rocks: Part 2, Experimental result (1970)

Tableau 4. Pente de descente des modes de Lamb dans le marbre blanc

marbre blanc	mode	3	4
	F x d	16,4	22
	pente	infini	infini

Tableau 6. Pente de descente des modes de Lamb dans le granite gris

Granite gris	mode	1	2
	F x d	13,6	19,6
	pente	- 13	- 13

4. R.D. Lama, V.S. Vutukuri.1978. Handbook on mechanical properties of rocks. Trans. Tech. Publ., Edn. 21 (1978).
5. M. Inoue, M. Ohomi. Proceedings of the International Symposium on Weak rocks Tokyo, 9-13 (1981)
6. P. Gaviglio, Rock Mech. Rock Eng. vol. 22, pp. 299-306 (1989)
7. E. Yasar, Y. Erdogan, Int. J.Rock Mech. Min. Sci., vol. 41, pp. 871-875 (2004).
8. S. Kahraman,U. Ulker, M.S.A. Delibal ave velocity and its application to stone cutting with gang saws
9. S. Kahraman, ultrasonics 46 (4) 341-8. Epub 2007 Jun 7 (2007)
10. S. Kahraman, T. Yeken, Eng. Geol. Environ. 67, 277-281(2008).
11. B. Faiz, A. Maze, A. Mouden, D. Decultot, Annales de Chimie Science des Matériaux Volume 23, Issue 4, April, Pages 563-574(1998)
12. M. François, Paris, Belin, Orléans, BRGM éditions, 2005, (ISBN 2701140811). p. 60
13. B. Bourbie, O. Coussy, B. Zinszner, Editions Technip, 1986