

Evaluation des propriétés physico-mécaniques des pierres de construction du Maroc à partir des vitesses des ondes P et de la résistance au choc

Iz-Eddine EL AMRANI EL HASSANI¹ & Hamid EL AZHARI²

1. Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Département des Sciences de la Terre, Equipe de Géomatériaux et géo-environnement (GéoM&E.). e-mail: elamrani@israbat.ac.ma, izdinelamrani@yahoo.fr

2. Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Département de Géologie, B.P. 1014, Rabat R.P. e-mail: elazharihamid1@yahoo.fr

Résumé. L'étude pétrophysique menée sur 11 variétés de pierres de construction marocaines a permis de préciser la relation entre leur nature pétrographique et leurs propriétés physico-mécaniques. L'application des méthodes d'auscultation non-destructives, basées sur la mesure de la vitesse des ondes ultrasoniques (Vp) au "TICO" et la détermination de la résistance au choc, par la mesure de l'indice de rebond (IRb) au scléromètre, a contribué à bien cerner cette relation. Cette étude confirme que la saturation en eau réduit les Vp et la résistance au choc. Les taux de variation des Vp est de l'ordre de 2 à 7 % dans les marbres, 13 % dans les calcarénites et 20 % dans les granites. Le taux de variation des IRb évolue de 15 % dans les marbres jusqu'à 80 % dans les roches sédimentaires. Le rapport (IRb/Vp) en fonction de la résistance à la compression uniaxiale (Rcu) révèle une corrélation positive pour l'ensemble des roches, avec un net décalage entre les roches calcaires et granitiques. Les équations relatives à cette corrélation permettent de déterminer la Rcu d'une roche, paramètre fondamental en géotechnique, à partir des mesures *in situ* et instantanées des Vp et IRb, obtenues à l'aide respectivement d'un "TICO" et d'un scléromètre.

Mots clés : Pierre de construction, ondes P, résistance au choc, résistance à la compression, Maroc.

Evaluation of physico-mechanical properties of building stones of Morocco from P-wave velocity and shock resistance.

Abstract. Integrated petro-physical study carried out 11 varieties of building stones of Morocco, has allowed us to set the relationship between their petrographical and physico-mechanical properties. The application of non-destructive testing methods, based on measuring of the ultrasonic wave velocity (Vp) by the "TICO" and the determination of shock resistance, through the rebound index (IRb) of the Sclerometre (Schmidt Hammer), contributed to quantify this relationship. Thus, this study confirms that water saturation reduces Vp and the shock resistance of rocks at variable rates, depending on their petrographical type. The variation rate of Vp, very low in marbles (2 to 7 %), can reach 13 % in calcarenites and 20 % in granites, while the variation rate of IRb varies from 15 % in marbles to 80 % in some sedimentary rocks. The ratio (IRb/Vp) vs uniaxial compressive strength (Rcu) reveals a positive correlation for all the rocks, but with a clear gap between limestone and granite. The equations of this correlation could determine the Rcu of rocks, basic geotechnical data, from *in-situ* and instantaneous measurements of Vp and IRb, using respectively a "TICO" and a Sclerometre.

Keywords: Building stones, P-wave velocity, shock resistance, compressive strength, Morocco.

INTRODUCTION

La situation géographique particulière du Maroc, à l'extrémité NW du continent africain, lui confère une géologie riche et variée. Plusieurs types de roches y existent et sont en grande partie exploitées comme pierres de construction.

Les premières traces de l'exploitation des pierres marocaines pour la construction remontent à l'époque romaine et se trouvent au voisinage des cités antiques de Volubilis, Lixus, Chellah... D'anciennes extractions massives datent de l'époque des Almohades (XII-XIII^{ème} siècles) et portent, notamment, sur les calcarénites et les calcaires consolidés et métamorphisés qui ont servi pour l'édification de leurs principaux monuments historiques, par exemple la Tour Hassan, la Quasbah des Oudayas... (Rabat) ou la Mosquée de la Koutoubia (Marrakech).

L'exploitation industrielle de la pierre au Maroc remonte au début du XX^{ème} siècle avec l'installation de grandes marbreries européennes, ce qui a contribué à une expansion rapide de la production des marbres de la région du Maroc central. Cette production a atteint 19 000 tonnes en 1959 (Bouhaoui *et al.* 1979, Lamtahri 1979). Depuis cette date, le secteur marbrier a évolué d'une manière lente et discrète avec une activité et une production très fluctuantes (El Amrani & Haïmeur 2007, El Amrani *et al.* 2008).

Malgré l'énorme potentialité du Maroc en pierres de construction, sa production annuelle oscille ces dernières années autour de 250 000 tonnes, ce qui reste infime (< 0,4 %) par rapport à la production mondiale qui dépasse les 60 millions de tonnes par an. A titre de comparaison, la production de certains pays, tels que l'Egypte et la Turquie, dépasse les 5 millions de tonnes par an.

Selon le rapport de Burzacchini *et al.* (2002), l'un des principaux problèmes qui entravent le développement de ce secteur réside en la rareté des études techniques sur les pierres dimensionnelles du Maroc. Le présent travail vient en réponse aux recommandations de ce rapport et vise le renforcement de la recherche appliquée sur les pierres de construction du Maroc en vue de les caractériser et de les promouvoir auprès des investisseurs nationaux et étrangers, ce qui pourrait contribuer forcément à la dynamisation du secteur de l'exploitation des pierres au Maroc, secteur qui peut jouer un rôle fondamental dans le développement socio-économique national.

OBJECTIF ET METHODE

Onze variétés de pierres marocaines, parmi les plus communes et les plus demandées sur le marché, ont été sélectionnées pour cette étude. Ce choix tient compte également de la diversité des types pétrographiques

(origine, composition, couleur, texture, structure...). La répartition géographique des échantillons sélectionnés est indiquée sur la figure 1. Un échantillon de marbre de Carrare (Italie) sur lequel existent de nombreuses données pétrographiques, a été traité avec nos propres roches, comme pierre de référence.



Figure 1. Répartition géographique des pierres de construction étudiées.

La méthodologie adoptée dans ce travail de caractérisation pétrographique des pierres du Maroc est basée sur deux principes essentiels : 1) une étude pétrographique et minéralogique fine qui permet une bonne reconnaissance des matériaux étudiés et ; 2) des tests physico-mécaniques non-destructifs, notamment la mesure des vitesses des ondes ultrasoniques à l'aide d'un instrument de type "TICO" et la détermination de la résistance au choc à l'aide d'un scléromètre digital (Fig. 2).

Les tests pétrographiques ont été effectués sur des échantillons homogènes, de même forme et dimension (sur des éprouvettes de 15x10x5 cm). Le protocole des manipulations est précisé sur le schéma de la figure 3.

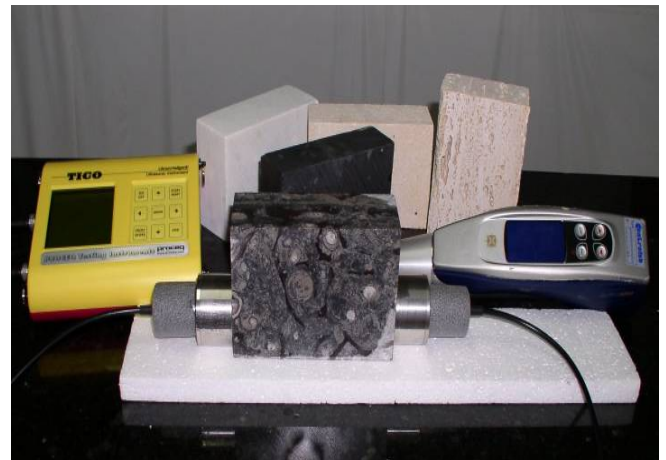


Figure 2. Instruments "TICO" et Scléromètre digital utilisés lors de cette étude.

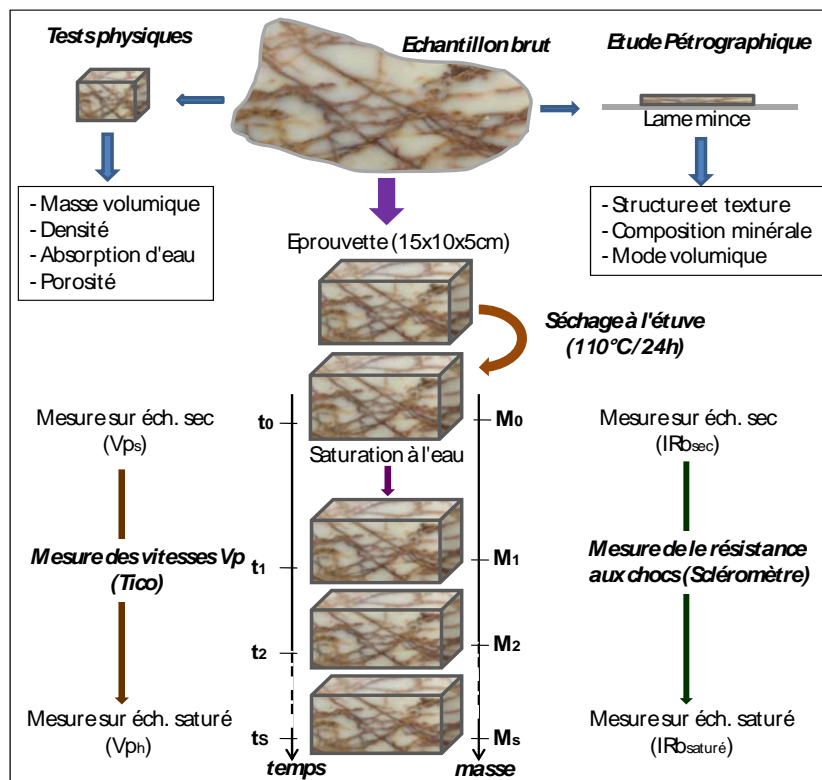


Figure 3. Protocole des manipulations effectuées lors de cette étude.

Tableau I. Appellations, références et données générales sur les échantillons de pierres de construction sélectionnées pour cette étude (voir localisation sur la carte de la figure 1). Ct : calcite; Q : quartz ; Dol : dolomite ; Arg : aragonite ; Pl : plagioclase ; Or : orthose ; Bi : biotite ; Hém : hématite ; Acc : minéraux accessoires ; Grp : graphite ; Py : pyrite ; Fos : fossiles.

Appellation locale	Référence	Origine	Composition	Structure	Granulométrie	Couleur	Polissage
Pierre de Salé	P-Sal	Sédimentaire, détritique	Q + Ct + Fos	Stratifiée	Moyenne	Gris-beige	Faible
Pierre de Ben Slimane	P-Bsl	Sédimentaire, détritique	Q + Ct + Fos	Homogène	Moyenne - fine	Beige-jaune	Moyen
Pierre de Taza	P-Taz	Sédimentaire, chimique	Ct recristallisé	Homogène	Moyenne	Gris-clair	Moyen
Travertin d'El Ksiba	T-Ksb	Sédimentaire, chimique	Ct + Arg + Dol + Q	Vacuolaire	Très fine	Beige claire	Bon
Calcaire de Nador	C-Nad	Métamorphique	Ct	Homogène	Très fine	Gris-blanc	Moyen
Calcaire d'Erfoud	C-Erf	Métamorphique	Ct + Fos	Hétérogène	Fine à grossière	Brun-marron	Faible
Marbre de l'Oued Ykem	M-Ykm	Métamorphique	Ct + Dol	Marmorisée	Fine	Gris et blanc	Bon
Marbre de Khénifra	M-Khn	Métamorphique	Ct + Dol	Veinée	Fine	Noir et blanc	Très bon
Marbre de Bou Acila	M-Bcl	Métamorphique	Ct + Dol + Hém	Veinée	Fine	Blanc-brun	Très bon
<i>Marbre de Carrare</i>	<i>M-Car</i>	<i>Métamorphique</i>	<i>Ct ± Grp ± Py</i>	<i>Uniforme</i>	<i>Moyen</i>	<i>Blanche</i>	<i>Très bon</i>
Granite d'Oulmès	G-Olm	Magmatique plutonique	Q + Bi + Or + Pl + Acc	Homogène	Grossier	Grise	Très bon
Granite de Tafraoute	G-Taf	Magmatique plutonique	Q + Bi + Or + Pl + Acc	Homogène	Grossier	Rose	Très bon

PETROGRAPHIE ET MINERALOGIE

Aspect macroscopique

Les principales données géologiques sur les pierres étudiées sont présentées en annexe I. Le tableau I récapitule leurs caractères pétrographiques macroscopiques (couleur, structure, granulométrie, composition...).

Observations microscopiques

L'étude des lames minces sous microscope polarisant apporte une bonne connaissance de la texture et de la composition minéralogique des différents groupes de roches. Les descriptions des observations microscopiques présentées ci-dessous, sont illustrées par les micrographies placées en annexe II.

Les roches sédimentaires

Les roches sédimentaires (pierres de Salé, Ben Slimane et Taza) sont composées d'éléments détritiques (fragments de roches et de minéraux) et de bioclastes (fragments de coquilles) liés par une matrice essentiellement calcaire. De nombreux pores de taille et de forme géométrique variables apparaissent entre les éléments solides de la roche (annexe II, micrographies A, B et C). La nature des éléments détritiques et leur proportion par rapport aux bioclastes ainsi que l'abondance de la matrice changent considérablement d'un échantillon à l'autre. La Pierre de Ben Slimane apparaît nettement plus riche en bioclastes et ses pores sont en grande partie colmatés par du quartz amorphe, ce qui implique son imprégnation tardive par des

fluides siliceux. La pierre de Taza s'avère moins poreuse que les autres calcarénites et montre une plus grande richesse en matériaux argileux. Par contre, la pierre de Salé est plus riche en grains de quartz et montre une porosité très élevée. Quant au travertin de Ksiba, il est formé de calcite, aragonite et dolomite, soit en cristaux polygonaux et jointifs soit en grandes lamelles. L'imbrication de ces cristaux aménage des cavités de taille millimétrique à centimétrique avec des formes souvent allongées et dont les parois sont tapissées par des concrétions de carbonates.

Les roches métamorphiques

Le calcaire de Nador et la pierre d'Erfoud montrent un fond très finement grenu, de nature micritique traduisant un très faible degré de recristallisation du carbonate d'origine sédimentaire (annexe II, micrographies D et E). La roche montre soit des petites cavités remplies de cristaux de carbonates (calcite et dolomite) tardivement recristallisés (calcaire de Nador), soit de fossiles de différentes tailles, entièrement calcitisés (pierre d'Erfoud).

Les marbres de l'Oued Ykem, Khénifra et Bou Acila montrent une plus grande granulométrie avec des cristaux de calcite de taille micrométrique (sparites) mais dont le contour reste assez diffus (annexe II, micrographies F, G et H). Le degré de métamorphisme de ces roches serait assez important, mais pas aussi élevé pour permettre une parfaite recristallisation des carbonates, comme c'est le cas des marbres de Carrare (annexe II, micrographie I). Ce dernier montre une texture granoblastique composée de cristaux polygonaux et jointifs de calcite dont la taille peut atteindre le millimètre. A noter également la forte compaction et

l'absence de pores sur ces roches carbonatées plus ou moins recristallisées.

Les roches magmatiques

Les granites montrent une texture grenue moyenne à grossière, parfois porphyrique. Ils sont composés essentiellement de quartz, plagioclases (oligoclase-andésine), d'orthose et de biotite (annexe II, micrographies J, K et L). Le granite d'Oulmès renferme, en outre, une faible proportion de muscovite. Des minéraux accessoires (apatite, zircon, hématite, ilménite...) y sont également présents. Certains faciès montrent des plagioclases séricitisés et une chloritisation avancée de leurs biotites (micrographie K), ce qui implique un début d'altération hydrothermale de la roche granitique.

PARAMETRES PHYSIQUES

Les principaux paramètres physiques des échantillons traités dans cette étude sont groupés dans le tableau II. Nous rappelons ci-dessous la signification précise de chaque paramètre et sa méthode de détermination.

La dureté

La dureté est un paramètre physique qui a des implications importantes tout au long de la chaîne de production des pierres ornementales (extraction, sciage, polissage). Parmi les techniques les plus utilisées pour l'évaluation de la dureté des roches, figurent celles qui expriment la résistance de la roche au pincement par un outil en acier très dur, telles que les méthodes de Brinell, de Rockwell, Vickers... (Perrier 1997, 2004). Toutefois, la méthode la plus proche de la réalité et la plus facile à mettre en œuvre est celle qui utilise l'échelle de dureté de Mohs pour estimer la dureté de la roche à travers celle de leurs minéraux constitutifs.

Pour une roche monominérale, la dureté est égale à celle du minéral constitutif : la dureté d'un calcaire est égale à 3 (dureté de la calcite sur échelle de Mohs = 3) ; celle d'une quartzite est égale à 7 (quartz = 7)...

Pour les roches composées de plusieurs minéraux, on tiendra compte de la dureté et de la proportion volumique de chaque minéral (mode volumique). Ainsi, la dureté d'un granite composé de 50 % de feldspath (dureté Fed = 6), 35 % de quartz (dureté Q = 7) et 25 % de micas (dureté Mic = 3) est calculée comme suit

$$[D_{\text{granite}} = (50 \times 6 + 35 \times 7 + 25 \times 3)/100 = 6,2].$$

Le tableau II montre que parmi l'ensemble des roches étudiées, les granites d'Oulmès et de Tafraoute sont les plus durs (6,1 à 6,6). Le groupe des calcarénites (pierres de Salé, Ben Slimane et Taza), riches en grains de quartz, est de dureté plus faible que celle du granite (d = 3,5 à 5,0) mais nettement supérieure à celle des calcaires et des marbres (d = 3 à 4).

La masse volumique et la densité

La masse volumique (densité apparente) est déterminée directement en calculant le rapport de la masse de l'échantillon sec, mesurée à l'aide d'une balance de précision, sur son volume. Ce dernier est facile à déterminer

pour des échantillons de forme et de dimensions bien définies. La densité réelle est déterminée en mesurant le quotient de la masse de l'échantillon par la masse du même volume d'eau distillée. Le volume d'eau équivalent au volume de l'échantillon est obtenu en plongeant l'échantillon complètement saturé dans un récipient gradué.

Le tableau II montre que la masse volumique et la densité sont dans la majorité des cas comparables, sauf pour certaines roches sédimentaires (ex. pierre de Ben Slimane) où on note une différence notable de l'ordre de 0,6. Comparés entre elles, les roches calcaires et marbres présentent des densités assez stables, largement comprises entre 2,67 et 2,78, et qui sont très proches de celle de la calcite (2,71). La densité des granites est légèrement plus faible (2,57 à 2,68), en relation directe avec la densité de leurs principaux constituants (quartz : 2,65; feldspaths : 2,55 à 2,76; micas : 2,7 à 3,3). Le groupe des roches sédimentaires affiche les plus faibles densités (1,7 à 2,5), vraisemblablement en relation directe avec leurs porosités élevées.

La porosité

La porosité contrôle tous les autres paramètres physiques de la roche (densité, perméabilité, absorption d'eau, conductivité électrique et thermique...). Elle correspond au rapport du volume total des pores sur le volume total de la roche et s'exprime en pourcentage. Dans la pratique, seule la porosité ouverte d'une roche est mesurable. L'espace aménagé entre les grains et par les microfissures est souvent comptabilisé avec le volume de la porosité ouverte. La porosimétrie à mercure est la méthode la plus largement utilisée ; elle consiste à mesurer le volume de mercure susceptible d'être absorbé par une roche (par injection à haute pression sous vide). Dans ce travail, nous avons utilisé la porosimétrie à l'eau distillée au lieu du mercure, mais suivant le même principe, et qui donne également des résultats comparables.

Le tableau II révèle la forte porosité des roches sédimentaires, notamment les pierres de Salé et de Ben Slimane (respectivement 24 et 15 %). La Pierre de Taza et le travertin de Ksiba sont relativement moins poreux (7 et 5 %). Les deux granites présentent une porosité assez faible qui ne dépasse pas 1,3 %, tandis que les calcaires affichent les porosités les plus faibles, avec toutefois une porosité minimale (0,3 %) dans les marbres (Oued Ykem, Khénifra, Bou Acila) et qui s'avère même légèrement inférieure à celle du marbre de Carrare (0,41 %).

L'absorption d'eau

L'absorption d'eau traduit la quantité d'eau maximale que peut absorber une roche. La capacité d'absorption d'eau des pierres étudiées a été mesurée selon le protocole suivant : l'échantillon est séché à l'étuve (110°C pendant 24 heures) puis on mesure sa masse (M_0). Il est ensuite immergé dans l'eau distillée pendant plusieurs heures jusqu'à saturation complète et on mesure sa masse M_s . Le pourcentage d'absorption d'eau est calculé comme suit

$$A = [100(M_s - M_0)/M_0]$$

Tableau II. Paramètres physiques et mécaniques des pierres de construction du Maroc faisant l'objet de cette étude.

$$dRcu = [100 (Rcu \text{ à sec} - Rcu \text{ à saturation}) / Rcu \text{ à sec}].$$

Appellation locale	Réf.	Dureté (Mohs)	Mas. volm (g/cm ³)	Densité	Porosité (%)	Abs. d'eau (%)	Rcu (MPa)		dRcu (%)
							sec	saturé	
Pierre de Salé	P-Sal	4,2	1,93	1,72	23,90	12,37	57	49	14
P. de B. Slimane	P-Bsl	5,0	2,09	2,34	14,59	7,00	70	62	11
Pierre de Taza	P-Taz	3,5	2,54	2,54	5,20	2,06	68	55	19
Trav. d'El Ksiba	T-Ksb	3,0	2,31	2,47	6,90	3,00	62	57	08
Calcaire de Nador	C-Nad	3,0	2,66	2,67	0,38	0,14	78	65	17
Calcaire d'Erfoud	C-Erf	3,0	2,73	2,74	0,72	0,26	63	58	08
Marbre d'O. Ykem	M-Ykm	3,5	2,71	2,72	0,34	0,13	98	88	10
Marbre Khénifra	M-Khn	3,4	2,78	2,78	0,25	0,09	100	89	11
Marbre de Bou Acila	M-Bcl	4,0	2,76	2,73	0,28	0,10	92	77	16
Marbre de Carrare	M-Car	3,0	2,75	2,75	0,41	0,15	97	82	15
Granite d'Oulmès	G-Olm	6,1	2,43	2,57	1,21	0,50	173	153	12
Granite Tafraoute	G-Taf	6,6	2,59	2,68	1,33	0,52	162	135	17

Le tableau II montre que les roches sédimentaires sont les plus absorbantes avec à leur tête la pierre de Salé (12 %), puis celle de Ben Slimane (7 %). L'absorption du travertin de Ksiba et de la pierre de Taza est nettement plus faible (respectivement 3 et 2 %). Les deux variétés de granites affichent une absorption très réduite (0,5 %), tandis que l'absorption des calcaires métamorphiques ne dépasse pas 0,15 %.

La résistance à la compression uniaxiale

La résistance à la compression simple ou uniaxiale (Rcu) est l'un des tests les plus utilisés pour définir la performance mécanique des roches. Le principe consiste à écraser un échantillon de roche entre les plateaux d'une presse puissante. La Rcu est déterminée à partir du moment où l'échantillon montre les premiers signes de destruction (fissuration et éclatement). Elle correspond à une force ou une contrainte par unité de surface et s'exprime généralement soit en Kgf/cm² ou en MPa (1MPa = 10 Kgf/cm²). La taille et la forme de l'échantillon influencent considérablement la mesure de la Rcu, d'où la recommandation d'effectuer la mesure sur des éprouvettes de forme cylindrique et d'une hauteur 2,5 fois supérieure au diamètre (Perrier 2002). Les tests sont effectués généralement sur des échantillons secs. La saturation en eau abaisse, d'une manière parfois substantielle (jusqu'à 50 %) la Rcu des roches (Lévêque 1984, Félix 1991).

Les mesures de la Rcu à sec et à saturation (Tab. II) indiquent des variations importantes d'un groupe de roches à l'autre. En termes de valeurs relatives, les roches sédimentaires présentent des Rcu à sec assez faibles (57 à 70 MPa) et s'avèrent nettement moins résistantes que les roches calcaires métamorphisées (92 à 100 MPa), qui sont à leur tour moins résistantes que les granites (150 à 170 MPa). Par ailleurs, la saturation à l'eau réduit la Rcu d'une manière très sélective. Les coefficients de perte de résistance après saturation (dRcu) varient largement : 8 à 19 % dans les roches sédimentaires ; 10 à 15 % dans les

roches métamorphiques ; et 12 à 17 % dans les roches granitiques.

VITESSE DES ONDES P

La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (ondes de compression ou primaires = Vp) dépend des constantes élastiques du matériau (ϵ : Module de Young et ν : coefficient de poisson) et de la densité (ρ). Dans le cas précis des roches, ces paramètres physiques sont étroitement liés à la nature pétrographique, à la porosité et au degré de saturation (Guéguen & Palciauskas 1992). De nombreux travaux ont été réalisés ces dernières années, dans le but de déterminer les propriétés physico-mécaniques des roches à partir des mesures de leur vitesse des ondes P (Inoue & Ohomi 1981, Babuska & Pros 1984, Gaviglio 1989, Kern 1993, Barruol & Kern 1996, Karpuz & Pasamehmetoglu 1997, Kahraman 2001, 2007, Del Rio *et al.* 2006, Kahraman & Yeken 2008). L'avantage de cette technique, notamment dans le domaine de l'ingénierie et de la construction en pierre, tient au fait qu'elle est non-destructive et permet d'avoir des informations fiables et en très peu de temps.

Les mesures des Vp ont été déterminées à l'aide d'un instrument léger de type "TICO" (Fig. 2) composé d'un générateur central de vibrations (0,1 à 6 500 μ s; 1 impulsion/s) et de 2 transducteurs (45 kHz) servant d'émetteur et de récepteur. Elles ont été effectuées dans les mêmes conditions sur des échantillons de même dimension (Fig. 3). Deux séries de mesures ont été effectuées (Tab. III) :

- sur des échantillons secs et suivant deux directions perpendiculaires : Vpl (suivant la longueur = 15 cm) et Vpe (suivant l'épaisseur = 5 cm) ;
- sur des échantillons d'abord séchés à l'étuve (Vps) et saturés à l'eau distillée (Vph).

La première série de mesures indique des valeurs de Vp comprises entre 3 et 6 km/s, qui sont compatibles avec celles généralement indiquées dans la littérature sur la

majorité des roches cohérentes (Perrier 2002, Kahraman 2007). Des variations de même grandeur sont enregistrées, pour certains échantillons, suivant la direction de mesure. Cette variation, exprimée par le paramètre dVpl-e (Tabl. III), serait due à une anisotropie de la roche (stratification, schistosité...) et/ou à la présence de fissures. Les valeurs des Vp peuvent varier également selon

l'orientation de la direction de propagation par rapport aux plans de l'anisotropie de la roche. Dans les roches calcaires, l'orientation des microfissures perpendiculairement à la direction de propagation des ondes entraîne une réduction des valeurs des Vp de l'ordre de 17 à 20 % (Birch 1960, Gaviglio 1989, Perrier 2002).

Tableau III. Vitesses de propagation des ondes ultrasoniques (Vp en km/s) dans les échantillons de pierres de construction du Maroc. Vpl : mesure suivant la longueur (15 cm) ; Vpe : mesures suivant l'épaisseur (5 cm) ; Vps : mesure sur échantillon sec ; Vph : mesure sur échantillon saturé. dVpl-e : $[100(V_{p_{max}} - V_{p_{min}}) / V_{p_{max}}]$; dVps-h : $[100(V_{ph} - V_{ps}) / V_{ph}]$.

Appellation locale	Référence	Air ambiant		dVpl-e (%)	Sec Vps	Saturé Vph	d'Vps-h (%)
		Vpl	Vpe				
Pierre de Salé	P-Sal	3,53	3,00	15,01	3,32	3,78	12,17
P. de B. Slimane	P-Bsl	3,17	3,76	15,69	3,25	3,71	12,40
Pierre de Taza	P-Taz	4,40	3,53	19,77	4,36	4,90	11,02
Trav. d'El Ksiba	T-Ksb	5,03	4,17	17,10	4,73	5,44	13,05
Calcaire de Nador	C-Nad	6,17	6,29	1,91	6,17	6,28	1,75
Calcaire d'Erfoud	C-Erf	5,68	6,22	8,68	5,63	5,88	4,25
Marbre d'O. Ykem	M-Ykm	5,64	4,12	26,95	6,05	6,33	4,42
Marbre Khénifra	M-Khn	5,25	3,50	33,33	6,12	6,30	2,86
Marbre de Bou Acila	M-Bcl	5,79	5,99	3,34	5,97	6,19	3,55
Marbre de Carrare	M-Car	4,89	5,29	7,56	4,68	5,02	6,77
Granite d'Oulmès	G-Olm	3,98	4,18	4,78	4,09	5,09	19,65
Granite Tafraoute	G-Taf	4,11	4,37	5,95	4,00	5,03	20,48

Les roches sédimentaires, avec des dVpl-e de l'ordre de 15 à 20 % s'avèrent assez hétérogènes, ce qui serait lié à leur mode de genèse et à leur composition. Les calcaires, marbres et granites sont relativement plus homogènes (dVpl-e inférieurs à 8 %) sauf dans le cas des marbres de l'Oued Ykem et Khénifra où leur dVpl-e dépasse 33 %. Du point de vue pétrographique, ces deux variétés de marbres présentent une forte hétérogénéité structurale avec une abondance de micro-joints de calcite anastomosés.

Les mesures des Vp à sec (Vps) et après saturation (Vph) ont été réalisées sur le même échantillon et suivant la même direction (L = 15 cm) pour éliminer l'effet de l'anisotropie. Les résultats de ces mesures (Tab. III) montrent, tout d'abord, que les Vph sont systématiquement plus élevées que les Vps, ce qui indique que l'eau retenue par la roche fait augmenter la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques. Ce constat corrobore les résultats des travaux antérieurs (Willy *et al.* 1956, Thill & Bur 1969, Nur & Simmons 1969, Gregory 1976).

Le taux de variation des Vp entre l'état sec et saturé (dVps-h) varie largement d'un groupe de roches à l'autre ; il apparaît très faible dans le cas des calcaires et des marbres (2 à 7 %), moyen dans les roches sédimentaires (11 à 13 %) et assez élevé dans les granites (20 %).

RESISTANCE AU CHOC

La résistance au choc (Rch) exprime l'aptitude d'une pierre de construction, taillée en dalle de faible épaisseur (2 cm), à résister à un choc superficiel brutal. Sa détermination selon une ancienne norme italienne consiste à

placer une dalle de pierre de 20x20x3 cm sur un lit de sable de 10 cm, puis de faire tomber dessus une sphère d'acier de 1 kg depuis des hauteurs croissantes. La Rch correspond à la hauteur en cm à partir de laquelle la dalle se brise. A titre indicatif, les Rch sont de l'ordre de : 26 à 34 cm pour une pierre calcaire ; 31 à 79 cm pour le marbre de Carrare ; 58 à 72cm pour les granites (Perrier 2002). La résistance au choc ne correspond ni à la dureté de la roche ni à sa résistance à la compression, toutefois des relations étroites existent entre ces trois paramètres (Katz *et al.* 2000, Kahraman 2001, 2007).

La résistance au choc peut être mesurée à l'aide d'un scléromètre ou marteau de Schmidt. Il s'agit d'un instrument portable, conçu à l'origine pour effectuer des tests non-destructifs sur le béton mais dont le champ d'utilisation s'est rapidement élargi aux roches (Katz *et al.* 2000, Kahraman 2001, 2007, Del Rio *et al.* 2006, Goudie 2006, Kahraman & Yeken 2008, Török 2008). Son principe repose sur la mesure de la hauteur de rebond d'une masse après son impact sur la surface à tester. La valeur de rebond (ou indice de rebond : IRb) est d'autant plus élevée que la dureté de la surface est grande. Ainsi, on admet que la Rch est directement proportionnelle à l'IRb.

Nos tests ont été effectués à l'aide d'un scléromètre digital de type N (énergie d'impact = 2,207 Joules) sur les mêmes échantillons utilisés pour la mesure des Vp (éprouvette de 15x10x5 cm). Ceux-ci étant placés suivant leur plus grande surface (15 x 10 cm) sur une surface plane et rigide, le scléromètre est tenu verticalement avec sa tige dirigée vers le bas (angle d'attaque $\alpha = 90^\circ$). Vingt

percussions par échantillon, avec une distance de 2 cm entre chaque point d'impact, ont permis de calculer l'indice de rebond (IRb) moyen. Deux séries de mesures ont été réalisées (Fig. 3) :

- sur les échantillons séchés à 110°C pendant 24 heures ;
- sur les échantillons saturés (trempés dans l'eau distillée jusqu'à saturation).

Le tableau IV récapitule les valeurs des IRb obtenues. La comparaison des valeurs brutes permet de faire une approche de la performance mécanique relative des roches étudiées. Deux remarques peuvent être formulées :

1- *Variation de la Rch selon la nature pétrographique.*

Les tests effectués sur le groupe des roches sédimentaires (calcarénite et travertin) révèlent des IRb assez faibles (< 21), ce qui implique une forte absorption de l'énergie du choc par la surface de ces roches. La répétition des essais au même endroit de la surface de la calcarénite provoque une pulvérisation de la matière minérale et montre une chute rapide des IRb après chaque essai. Les roches calcaires compactes (calcaires de Nador et d'Erfoud) enregistrent des

IRb nettement plus élevés (30 à 35). L'impact de la tige du scléromètre enfonce légèrement la surface de la roche mais sans la détruire. Les essais sur les marbres se distinguent par l'émission d'un son sec avec des IRb allant de 40 à 43. La surface des roches granitiques (Oulmès et Tafraoute) montre une grande insensibilité à l'impact du scléromètre qui dégage une forte sonorité et indique des indices de rebond également élevés (39 à 43).

2- *Réduction de la Rch avec la saturation.* La saturation à l'eau réduit la valeur des IRb de toutes les variétés de roches étudiées (Tabl. IV). La Rch semble ainsi évoluer dans le même sens que la résistance à la compression uniaxiale (Rcu), ce qui concorde avec les résultats des travaux antérieurs (Lévêque 1984, Félix 1991). Par ailleurs, le taux de réduction des indices de rebond en fonction de la saturation (dIRb) change d'une manière notable d'un groupe de roches à un autre. Il apparaît élevé dans les roches sédimentaires où il atteint 80 % dans le cas de la Pierre de Ben Slimane. Par contre, il est moins élevé dans les granites (35 à 41 %). Ce taux est minimum dans les marbres où il ne dépasse pas 15 %.

Tableau IV. Indices de rebond au scléromètre (IRb) des pierres de construction du Maroc.
dIRb = [100 (IRb sec – IRb saturé) / IRb sec].

Appellation locale	Référence	IRb sec	IRb saturé	dIRb (%)
Pierre de Salé	P-Sal	6	3	50
P. de B. Slimane	P-Bsl	10	2	80
Pierre de Taza	P-Taz	21	16	24
Trav. d'El Ksiba	T-Ksb	15	11	27
Calcaire de Nador	C-Nad	35	30	14
Calcaire d'Erfoud	C-Erf	32	27	15
Marbre O. Ykem	M-Ykm	40	37	08
Marbre Khénifra	M-Khn	41	35	15
Marbre de B Acila	M-Bcl	43	38	12
<i>Marbre de Carrare</i>	<i>M-Car</i>	43	38	12
Granite d'Oulmès	G-Olm	39	23	41
Granite Tafraoute	G-Taf	43	28	35

DISCUSSION

La présente étude pétrophysique dégage la relation qui existe entre la pétrographie d'une roche et ses propriétés physico-mécaniques et corrobore ainsi les résultats de ces dernières années sur ce sujet (Barruol & Kern 1996, Karpuz & Pasamehmetoglu 1997, Kahraman 2001, 2007, Del Rio *et al.* 2006, Kahraman & Yeken 2008, Goudie 2006, Török 2008, Çobanoglu & Çelik 2008). Les courbes de la figure 4 apportent des précisions sur les tendances des corrélations entre les différents paramètres. Les roches sédimentaires (pierres de Salé, Taza et Ben Slimane), à porosité élevée, montrent des densités relativement faibles et une grande capacité à retenir l'eau. Par contre, les calcaires et les marbres, relativement plus compacts, sont moins poreux et faiblement absorbants. Les 2 variétés de granite étudiées, de densité plus faible que les marbres, sont à porosité et à absorption d'eau sensiblement plus élevés. Cela serait lié,

en partie à leur nature minéralogique et à leur structure, mais aussi à l'altération de leurs feldspaths ; la séricitisation des plagioclases du granite d'Oulmès, bien visible à l'échelle microscopique, agit sur la structure de la roche et fait augmenter son taux d'absorption (El Amrani 1994).

Du point de vue mécanique, la saturation en eau réduit la résistance à la compression uniaxiale (Rcu) de toutes les variétés de roches (Lévêque 1984). Cette résistance augmente en allant des roches sédimentaires vers les marbres puis les granites. La forte Rcu de ces derniers serait liée à leur dureté (6,1 à 6,6 ; Tab. II) et leur texture magmatique grenue, ce qui explique leur plus grande performance mécanique par rapport aux marbres, de dureté plus faible (3 à 4) et à texture granoblastique. Les 3 variétés de marbres marocains (O. Ykem, Khénifra et Bou Acila) présentent des propriétés physico-mécaniques très comparables à celles des marbres italiens de Carrare.

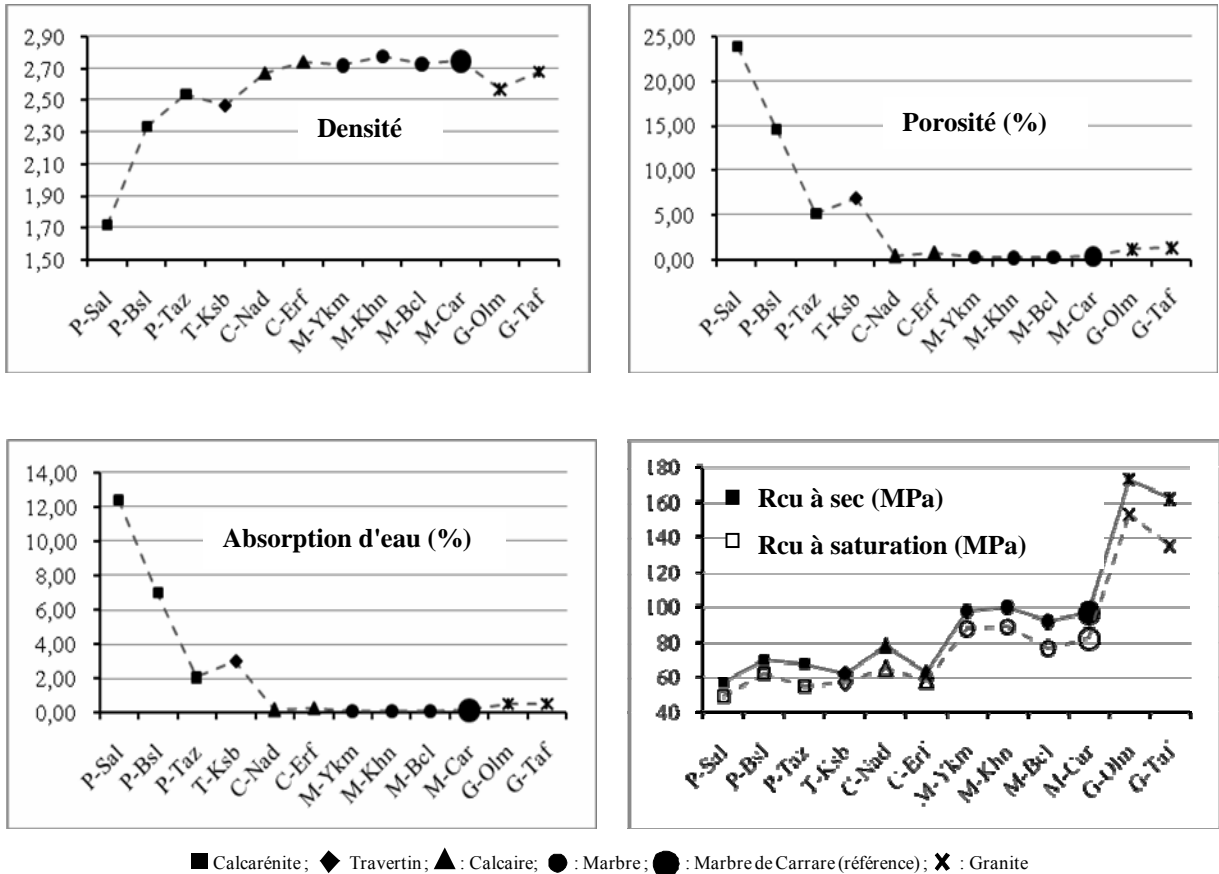


Figure 4. Evolution des paramètres physico-mécaniques en fonction de la nature pétrographique des pierres de construction étudiées.

Les courbes de la figure 5 révèlent des relations très nettes entre les paramètres Vp, IRb, Rcu et la porosité. Les Vp augmentent sensiblement avec la réduction de la porosité, ce qui permet de distinguer les roches sédimentaires des calcaires et des marbres. Les granites ne semblent pas suivre la même tendance puisqu'ils affichent des Vp assez faibles (4 km/s) alors que leurs porosités sont voisines de celles des marbres, pour lesquels les Vp varient autour de 6 km/s. Concernant les variations des Vp en fonction de Rcu, une corrélation positive apparaît pour toutes les roches sauf les granites (Fig. 5). Les valeurs des IRb montrent les mêmes tendances que les Vp avec la porosité et la Rcu. A noter là aussi la position décalée des granites par rapport aux roches sédimentaires et métamorphiques.

Nous retenons ainsi des diagrammes de la figure 5 que les vitesses de propagation des ondes ultrasoniques ainsi que les résistances aux chocs sont directement liées à la nature pétrographique et structurale des roches. Toutefois, la logique qui lie ces paramètres ne semble pas être la même pour toutes les roches ; les règles régissant les relations des roches sédimentaires et métamorphiques, qui sont pour l'essentiel de nature carbonatée, seraient bien distinctes de celles des roches granitiques. Des travaux antérieurs indiquent, en effet, que la chute des Vp en fonction de la porosité est plus forte dans les granites que dans les roches carbonatées et les grès (Guéguen & Palciauskas 1992, Perrier 2002, Yasar & Erdogan 2004).

Les variétés de marbres marocains, notamment ceux de l'Oued Ykem, de Khénifra et de Bou Acila, se distinguent nettement de la variété de marbre de Carrare par des Vp plus élevées (6 contre 5 km/s). Etant donné que les deux marbres ont pratiquement les mêmes compositions, les mêmes porosités et des Rcu comparables, cette différence de Vp serait liée à la présence dans le marbre de Carrare de veinules grisâtres, riches en graphite et pyrite, qui seraient vraisemblablement responsables du ralentissement de la vitesse de propagation des ondes P.

Certains auteurs antérieurs ont essayé de quantifier la relation entre les trois paramètres Vp, IRb et Rcu (Gaviglio 1989, Yasar & Erdogan 2004, Kahraman 2007, Kahraman & Yeken 2008). Des équations mathématiques ont ainsi été proposées pour calculer théoriquement la Rcu des roches à partir de la mesure de leurs vitesses de propagation des ondes ultrasoniques et de leurs indices sclérométriques.

Notre investigation sur les pierres marocaines, dans ce sens, confirme l'étroite relation qui lie ces trois paramètres. Le diagramme Vp vs IRb montre une bonne corrélation linéaire et positive ($y = 10,75x - 25$; $R^2 = 0,72$). Le choix de projeter l'ensemble des roches étudiées sur l'espace Rcu vs (IRb/Vp) nous semble intéressant ; il permet de dégager deux droites d'équations linéaires selon les types de roches prises en considération (Fig. 6) :

[1] $(IRb/Vp) = 0,111Rcu - 3,335$ ($R^2 = 0,704$), en considérant uniquement les roches carbonatées

sédimentaires et métamorphiques dont le rapport IRb/Vp est généralement inférieur à 9 ;

[2] $(IRb/Vp) = 0,062.Rcu + 0,395$ ($R^2 = 0,733$), en considérant l'ensemble des roches, aussi bien les carbonatées que les granitiques dont le rapport IRb / Vp est

supérieur à 9.

Ces deux équations sont d'un grand intérêt pratique puisqu'elles permettent de déterminer la Rcu d'une roche à partir de la connaissance de sa vitesse ultrasonique (Vp) et son indice de rebond au scléromètre (IRb).

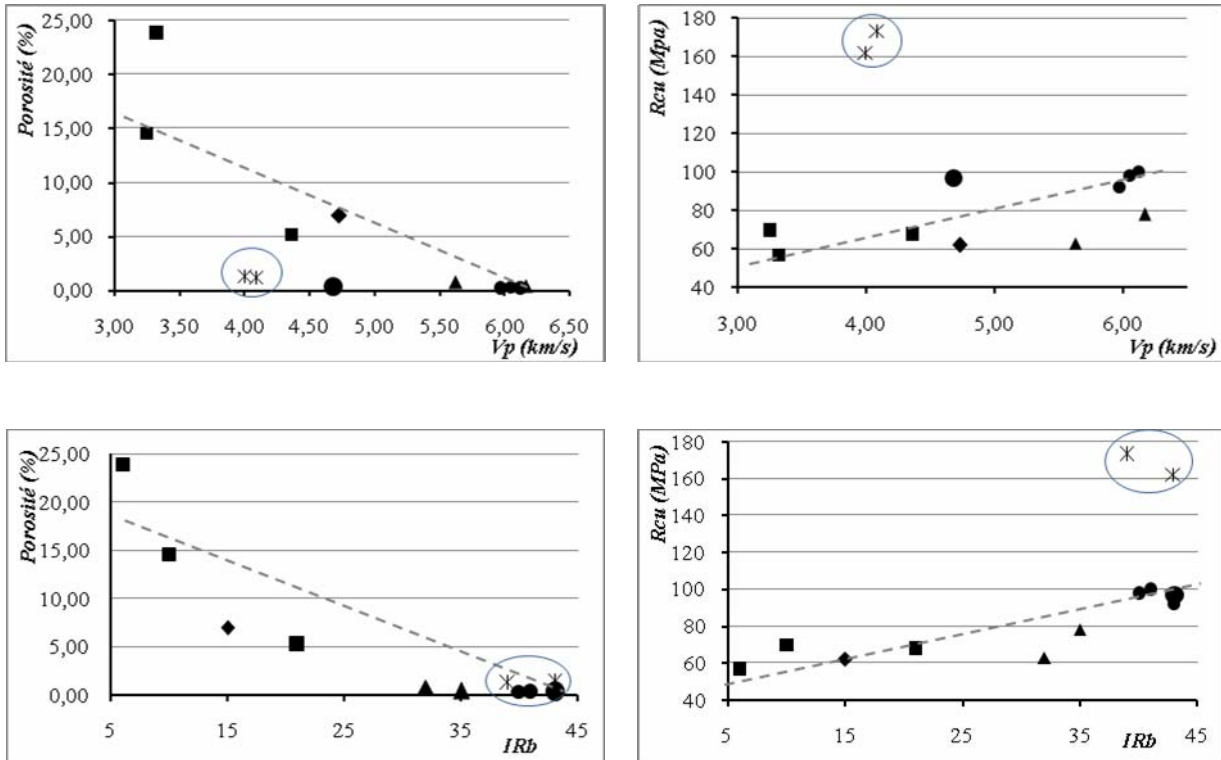


Figure 5. Variation des Vp et des IRb en fonction de la porosité et de la Rcu (même légende que Fig. 4).

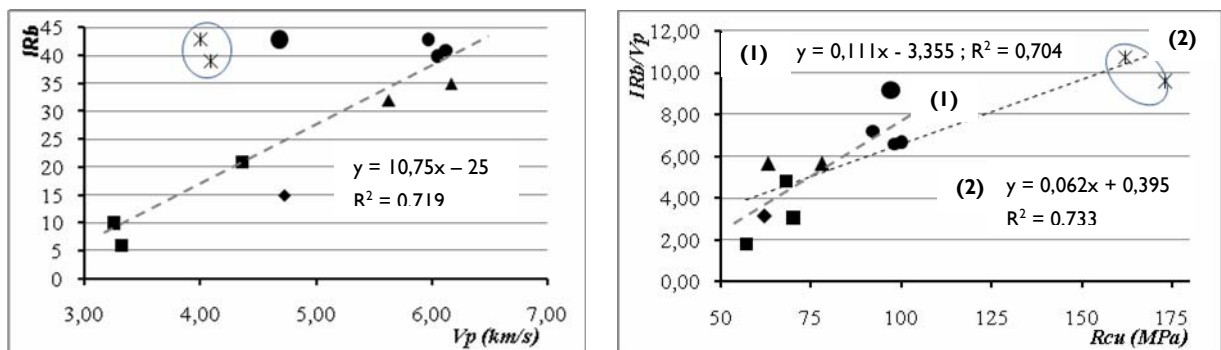


Figure 6. Relation Vp – IRb et évolution de la Rcu en fonction du rapport (IRb/VP) (même légende que Fig. 4)

CONCLUSION

Les 11 échantillons sélectionnés pour cette étude représentent les principales variétés de pierres de construction exploitées au Maroc. Ils sont de nature pétrographique différente (calcarénite, travertin, calcaire consolidé, marbre, granite) et se distinguent les uns des autres par leur coloration, structures, composition...

Cette étude intégrée a permis de bien dégager la relation qui existe entre leur nature pétrographique et leurs

propriétés physico-mécaniques. Les calcarénites, à porosité élevée, montrent des densités relativement faibles et une grande capacité d'absorption d'eau. Les calcaires et les marbres, relativement plus compacts sont plus faiblement poreux et moins absorbants. Les deux granites marocains affichent une densité légèrement plus faible que les marbres et une absorption d'eau sensiblement plus élevée, ce qui serait lié en partie à l'altération de leurs feldspaths. Du point de vue mécanique, la Rcu, étroitement liée à la dureté et la compaction, augmente en allant des roches sédimentaires

(< 70 MPa) vers les marbres (90 à 100 MPa) puis les granites (> 150 MPa). Cette résistance baisse avec la saturation en eau de 8 à 17 % selon les roches.

L'utilisation des méthodes non-destructives, basées sur la mesure des vitesses des ondes ultrasoniques (Vp) et de la résistance au choc à travers l'indice de rebond du scléromètre (IRb) ont permis d'établir des corrélations très nettes entre les principaux paramètres (pétrographie, porosité, Rcu, Vp et IRb).

Parmi l'ensemble des corrélations, celle reliant le rapport (IRb/Vp) à la Rcu nous semble très intéressante. Elle permet de dégager deux droites d'équations linéaires :

[1] $(IRb/Vp) = 0,111Rcu - 3,335$ ($R^2 = 0,704$), valable pour toutes les roches carbonatées sédimentaires et métamorphiques dont le rapport IRb/Vp est inférieur à 9 ;

[2] $(IRb/Vp) = 0,062Rcu + 0,395$ ($R^2 = 0,733$), valable pour l'ensemble des roches, aussi bien les carbonatées que les granitiques dont le rapport IRb/Vp est supérieur à 9.

Ces équations présentent l'intérêt de pouvoir déterminer la Rcu d'une roche donnée, paramètre fondamental en géotechnique, à partir des mesures *in-situ* et d'une manière instantanée de leur Vp et IRb.

Une recherche plus poussée, basée sur un plus grand nombre de variétés de roches, notamment d'origine magmatique, est envisageable pour conforter les résultats de cette étude.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement l'Etablissement BEN THAMI du Marbre et de Pierres Sculptées (Salé) de nous avoir fourni les échantillons de roches nécessaires pour cette étude. Nous exprimons également notre gratitude aux professeurs Raymond PERRIER et Lahcen BAHY sur leurs remarques et suggestions constructives.

Références

- Babuska V. & Pros Z. 1984. Velocity anisotropy in granodiorite and quartzite due to the distribution of microcracks. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 76, 121-127.
- Barruol G. & Kern Z. 1996. Seismic anisotropy and shear-wave splitting in lower crust and upper mantle rocks from the Ivrea zone: experimental and calculated data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 95, 175-194.
- Birch F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks 10 kbars. Part 1. *J. Geophys. Res.*, 65, 83-1102.
- Bouhaouli A., Caraman V. & Hilali E. 1979. Les marbres du Maroc. *Mines, Géologie & Energie*, 45, 35-102.
- Burzacchini G., Ciccu R. & Berbach A. 2002. *Etude d'analyse du potentiel de la branche "Pierre dimensionnelle" au Maroc*. Rapport inédit : N° ACR 202-Etude-5-PC. 133 p.
- Çobanoğlu I. & Çelik S.B. 2008. Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hammer and P-wave velocity. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67, 491-498.
- Del Rio L.M., Lopez F., Esteban F.J., Tejado J.J., Mota M., González I., San Emeterio J.L. & Ramos A. 2006. Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain). *Ultrasonics*, 44, e1057-e1061.
- El Amrani E.I. 1994. *Genèse et mise en place des granitoïdes peralumineux à biotite et cordiérite des Jbilet centrales (Maroc)*. Thèse d'état, Université Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 219 p.
- El Amrani E.I. & Haïmeur J. 2007. *Potentialités du Maroc en roches ornementales et problèmes liés à leur exploitation sur l'environnement*. Rapport inédit N°5 de l'équipe de Géomatériaux et Géoenvironnement, Institut Scientifique, Rabat, 55 p.
- El Amrani E.I., Fedan B. & Tahiri A. 2008. "Fenêtre" sur la Richesse du Maroc en Minéraux, Roches et Fossiles. *Bull. d'Information de l'Académie Hassan II des Sci. & Tech.*, 3, 92-92.
- El Azhari H. 1999. *Etude géologique et techniques des principales variétés de roches ornementales du Maroc*. Mémoire de Master, Fac. Sci. Rabat, Université Mohammed V-Agdal. 62p.
- El Azhari H., El Amrani E.I., Garoum M. & Haïmeur J. 2005. Les propriétés thermiques des roches ornementales du Maroc : analyse et intérêt en construction. *18^{ème} Colloque des Bassins Sédimentaires*; Fès, 10-12 novembre 2005, 75-75.
- Félix C. 1991. Essais physiques et critères de sélection pour la restauration des grès. *Mines et Carrières, Les Techniques*, 2/91, 87-90.
- Gaviglio P. 1989. Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density. *Rock Mech. Rock Eng.*, 22, 299-306.
- Guéguen Y. & Palciauskas V. 1992. *Introduction à la physique des roches*. Herman, éditeurs des Sciences et des Arts. 299 p.
- Goudie A.S. 2006. The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, 30, 703-718.
- Gregory A.R. 1976. Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, 41, 721-895.
- Inoue M. & Ohomi M. 1981. Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock. *Proceedings of the International Symposium on Weak rocks Tokyo*, 9-13.
- Kahraman S. 2001. A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, 729-733.
- Kahraman S. 2007. The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics* 46, 4, 341-348.
- Kahraman S. & Yeken T. 2008. Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67, 277-281.
- Karpuz C. & Paşamehmetoğlu A.G. 1997. Field characterization of weathered Ankara andesites. *Eng. Geol.*, 46, 1-17.
- Kern H.P. 1993. P and QS wave anisotropy and shear-wave splitting at pressure and temperature in possible mantle rocks and their relation to the rock fabric. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 78, 245-256.
- Katz O., Reches Z., & Roegiers, J.C. 2000. Evolution of mechanical rock properties using Schmidt Hammer. *Tech. Note Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 723-728.
- Lamtahri F. 1979. L'industrie du marbre au Maroc. *Mines, Géologie & Energie*, 45, 113-122.
- Lévêque P.C. 1984. *Géologie appliquée au génie nucléaire et à l'environnement*. Tech. et Docum. Lavoisier, Paris, 120 p.
- Nur A. & Simmons G. 1969. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 7, 183-193.
- Perrier R. 1995. Gisements de roches ornementales du Maroc. *Le Mausolée*, 708, 54-64.

- Perrier R. 1997. Mesure de la dureté des roches par une plaquette de diamant polycristallin. *Mines et Carrières*, 79, 32-38.
- Perrier R. 2002. Méthodes antiques d'extraction des roches encore en usage au Cambodge. *Pierre Actual.*, 790, 69-73.
- Perrier R. 2004. *Les roches Ornementales*. Edition Pro Roc. 703 p.
- Thill R.E. & Bur T.E. 1969. An automated ultrasonic pulse measurement system. *Geophysics*, 34, 101-105.
- Török A. 2008. Schmidt Hammer and duroscope tests in assessing surface properties of stones. *International Workshop SMW 08: In situ monitoring of monumental surfaces*, Ed. Tiano and Pardini, 207-214.
- Willy M.R.J., Gregory, A.R. & Gardner L.W. 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*. 21, 41-70.
- Yasar E. & Erdogan Y. 2004. Correlating sound velocity with density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 41, 871-875.

Manuscrit reçu le 9 novembre 2009
Version acceptée le 31 décembre 2009

ANNEXE I

Données géologiques et situations géographiques des pierres de construction du Maroc faisant l'objet de cette étude.

1- Les roches sédimentaires

Pierre de Salé (P-Sal)

Il s'agit d'une biocalcarénite appartenant aux cordons dunaires, d'âge plio-quaternaire, qui s'étendent parallèlement à la côte atlantique, entre El Jadida et Larache. Roche compacte, de teinte gris-beige, à grains de quartz millimétriques et fragments de coquilles liés par un ciment calcaire. Elle montre des niveaux de stratification (S_0) avec variations locales de la taille des grains, de la compacité et de l'abondance des fragments de coquilles.

Provenance de l'échantillon : Sidi Bou-Knadel, à quelques km au Nord de Salé.

Pierre de Ben Slimane (P-Bsl)

C'est un grès calcaire faisant partie des cordons dunaires atlantiques d'âge pliocène. En surface, la roche montre une croûte noirâtre avec de nombreuses cavités de dissolution. La roche fraîche est de teinte beige clair, à grain fin, assez compacte et d'une ténacité supérieure à celle des calcarénites ordinaires. Cette ténacité serait due à une silicification tardive de la roche, se traduisant par un remplissage des pores par du quartz amorphe.

Provenance de l'échantillon : Carrière de Tlat de Ben Slimane.

Pierre de Taza (P-Taz)

C'est un grès calcaire du Miocène terminal, appartenant à la série transgressive qui repose sur les schistes paléozoïques de Tazekka. D'aspect conglomératique à la base, il passe vers des grès-calcaires homogènes, puis des marnes. La série montre de nombreuses variations verticales et latérales. La roche exploitable est à grain moyen et de teinte grise à beige-verdâtre avec, localement, des niveaux hétérogènes avec des nuances grises, d'aspect ondulé.

Provenance de l'échantillon: Carrières de l'Oued Amlil.

Travertin d'El Ksiba (T-Ksb)

Faciès calcaire continental, affleurant dans différentes régions du Maroc central (M'Rirt, El Ksiba...) en masses à contour irrégulier et de taille décamétrique à kilométrique. Son âge est Pliocène-Quaternaire. Couleur blanche à grisâtre, et aspect concrétionné à caverneux, avec de nombreuses vacuoles. Ces dernières sont souvent étirées parallèlement au plan du dépôt de la masse de travertin qui montre souvent une structure litée.

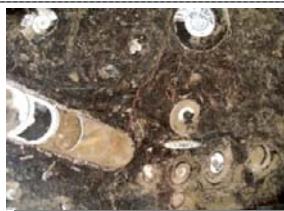
Provenance de l'échantillon : Région d'El Ksiba, au NNE de Beni Mellal.

2- Les roches métamorphiques

Calcaire de Nador (C-Nad)

Roche calcaire associée aux schistes, grès et quartzites des formations métamorphiques d'âge paléozoïque du Rif nord-oriental. Elle est de teinte beige clair, à grain fin et d'aspect marmorisé. Localement, elle présente des traces de microorganismes, des vacuoles et des microfissures qui lui donnent une certaine hétérogénéité et fragilité. La roche est difficilement polissable en raison de son faible degré de métamorphisme.

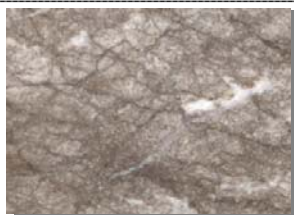
Provenance de l'échantillon : NW de Nador, vers la mer Méditerranée.

Calcaire (Pierre) d'Erfoud (C-Erf)

Il s'agit d'un calcaire pélagique du Dévonien inférieur (Emsien) de l'Anti-Atlas oriental. La roche est brun marron à violacée, à grain fin et montre une forte richesse en fossiles (*Goniatites* et *Orthocères*) de grande taille. Des joints de calcite parcourent localement la roche. La faible recrystallisation du calcaire rend les dalles assez fragiles et facilement rayables, d'où le recours à des traitements de surface par des résines protectrices.

Provenance de l'échantillon : Carrières situées au SE d'Erfoud.

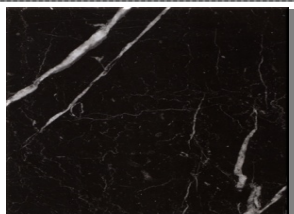
Marbre de l'Oued Ykem (M-Ykm)



Calcaire massif du Dévonien moyen qui constitue, avec les schistes, les conglomérats et les quartzites... du Dévonien supérieur et du Carbonifère inférieur, le socle paléozoïque affleurant au niveau de l'Oued Ykem. La couche de calcaire exploitable se présente en bancs métriques. La roche est massive, gris clair à foncé avec une trame dense de veinules blanches. Sa grande dureté traduit une importante recristallisation et dolomitisation.

Provenance de l'échantillon : Carrière près de l'autoroute Rabat-Casablanca.

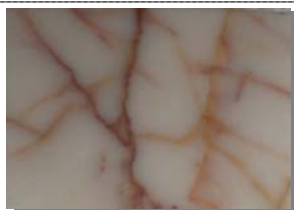
Marbre de Khénifra (M-Khn)



Calcaire massif, d'âge dévonien supérieur, qui se présente en bancs peu épais et fortement inclinés vers l'Ouest. La roche, faiblement métamorphique, est de couleur grise à noire et parfois d'aspect griottes ou noduleux. Localement, elle renferme des concentrations de fossiles (Céphalopodes, Conodontes...). La variété noire, très recherchée, montre un aspect compact et une trame de microfissures dont certaines sont remplies de calcite blanche.

Provenance de l'échantillon : Carrière à quelques km à l'Ouest de Khénifra

Marbre de Bou Acila (M-Bcl)

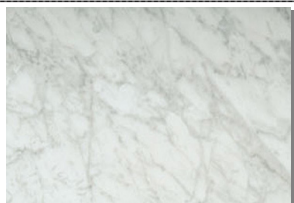


Calcaire massif, du Cambrien inférieur affleurant au sein d'un puissant complexe volcano-sédimentaire d'âge précambrien III de l'anticlinal de Bou Acila-Ourhdad. Il s'agit d'un banc de calcaire épimétamorphique d'une centaine de mètres d'épaisseur, montrant un fond blanc laiteux, à grain fin et sur lequel se détache une trame assez dense de veines rouge-brique. La roche tient un très bon poli et montre, malgré sa trame veineuse, une très grande dureté.

Provenance de l'échantillon : Carrière située à quelques km de Bou-Acila.

Pierre de référence

Marbre de Carrare (M-Car)



Les célèbres marbres de Carrare, affleurent dans les Alpes Apuanes d'Italie sous forme d'une "boutonnière" au sein de la nappe plissée de la Toscane. Ils sont attribués au Lias et présentent une puissance allant jusqu'à 500 m. Ils montrent localement une déformation intense et un métamorphisme régional de degré élevé. Différents faciès sont distingués: tacheté, veiné, nuageux... L'échantillon choisi appartient à la variété veinée (Venato).

Provenance de l'échantillon : (Marbrerie) marbre importé de l'Italie.

3- Les roches magmatiques

Granite d'Oulmès (G-Olm)



Le granite d'Oulmès affleure dans le massif central marocain. C'est un granite gris à deux micas, daté à 262±4Ma (Permien inférieur) et serait lié à la fin de l'orogénèse hercynienne. La roche est homogène et présente une texture grenue isogranulaire. Le cœur du pluton est affecté par une importante arénisation, tandis que les faciès de bordure, à grain fin, montrent des déformations associées à des altérations hydrothermales.

Provenance de l'échantillon : Carrière située au Centre-Est du pluton d'Oulmès..

Granite de Tafraoute (G-Taf)

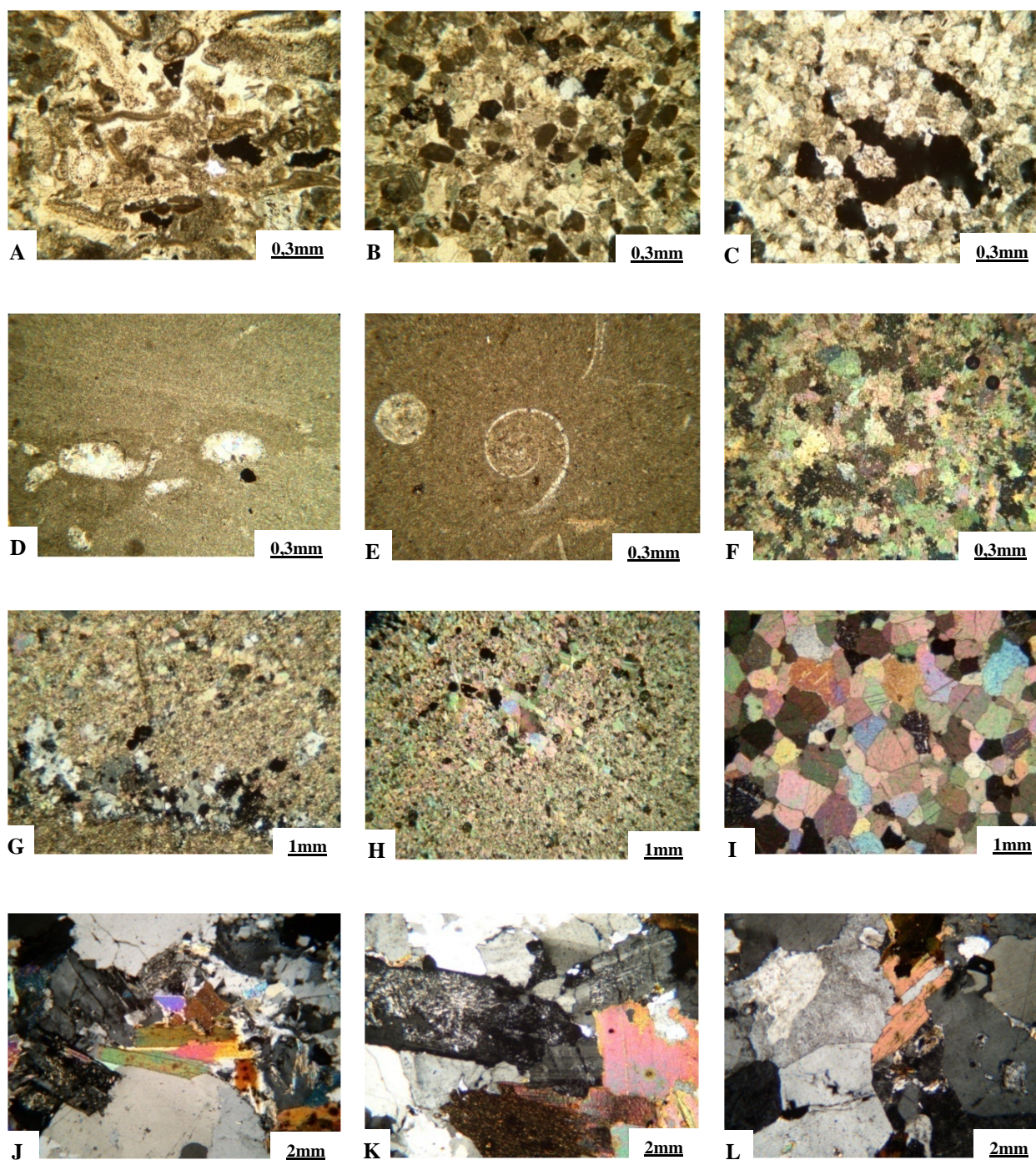


Le pluton de Tafraoute affleure en masse subcirculaire dans la boutonnière précambrienne de Kerdous, située à 100 km au SE d'Agadir. C'est un granite rose à biotite, daté à 549±10 Ma (Cambrien inférieur). Il apparaît sous forme de grand piton très fracturé et désagrégé en boules géantes. La roche présente une teinte rose et une texture grenue grossière, avec toutefois des tendances vers des teintes gris clair et un grain plus fin.

Provenance de l'échantillon : Grande carrière située près du centre de Tafraoute.

ANNEXE II

Micrographies des pierres de construction du Maroc étudiées



Observations réalisées en lumière polarisée et analysée

Pierres d'origine sédimentaire : (A) pierre de Ben Slimane ; (B) pierre de Taza ; (C) travertin de Ksiba.

Pierres d'origine carbonatée faiblement métamorphiques : (D) calcaire de Nador ; (E) pierre d'Erfoud ; (F) marbre de l'Oued Ykem.

Pierres d'origine carbonatée bien recristallisées: (G) marbre de Khénifra ; (H) marbre de Bou Acila ; (I) marbre de Carrare.

Pierres d'origine magmatique : (J) granite d'Oulmès frais ; (K) granite d'Oulmès altéré ; (L) granite de Tafraoute frais.