

Application De L'ultrason A L'étude De L'homogénéité Des Briques Réfractaires

*Djiragbou N. B. R.,
Boffoué M. O.,
Kouadio K. C.,
Kouakou C. H.,
Emeruwa E.*

Laboratoire de Géomatériaux et des technologies de l'habitat,
UFR des sciences de la terre et des ressources minières,
Université Felix Houphouet Boigny Abidjan, Abidjan

doi: 10.19044/esj.2016.v13n3p61 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v13n3p61](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v13n3p61)

Abstract

The quality of refractory bricks such as their ability to resist to thermal shocks essentially depends on the homogeneity of their structure. The imperfections observed in the structure of some refractory bricks arise from the mode of their preparation. Thus, the homogeneity of bricks manually elaborated with refractory clays and sintered at 1280°C was studied. The speed of ultrasounds in different areas of the bricks was measured with an ultrasound auscultation device. The results point out the speeds of ultrasounds may vary from one zone to another revealing heterogeneities into some bricks. This technique allows showing the distribution of possible heterogeneities in these materials.

Keywords: Ultrasound, refractory bricks, structure, homogeneity

Resume

La qualité d'une brique réfractaire notamment sa capacité à résister aux chocs thermiques dépend en grande partie de l'homogénéité de sa structure. Le mode de confection de ces produits peut être à la base de nombreux défauts au niveau de la structure de ceux-ci. Ainsi, l'homogénéité de briques élaborées manuellement et cuites à 1280°C à base d'argiles à caractères réfractaires a été étudiée. A l'aide d'un dispositif d'auscultation ultrasonique, la vitesse de propagation des ultrasons en différentes zones de ces briques ont été mesurées. Les résultats indiquent que les vitesses des ultrasons varient parfois d'une zone à une autre révélant ainsi la présence d'hétérogénéité à l'intérieur de certaines briques. Cette technique permet en

outre d'avoir une cartographie de la répartition des éventuelles hétérogénéités dans ces matériaux.

Mots clés : Ultrason, Matériaux réfractaires, Structure, Homogénéité

Introduction

L'industrialisation des états africains passe nécessairement par la modernisation et le développement des activités productrices de matériaux telles que la céramique, la sidérurgie, les forges etc. (**Eméruwa, 1993**). La cuisson à de hautes températures devient de ce fait une technique incontournable dans la production des matériaux (**Lecomte, 2004 ; Traoré, 2003**). Une telle activité demande l'utilisation des briques et autres composants réfractaires. Les briques d'argiles réfractaires sont beaucoup utilisées pour le revêtement des parois internes des fours, des hauts fourneaux etc. La présence de défauts au niveau de la structure des réfractaires est défavorable à certaines propriétés notamment leur bonne tenue face aux chocs thermiques. Les briques élaborées manuellement sont souvent sujettes à la présence d'hétérogénéité dans leur structure. L'utilisation des ultrasons va permettre d'étudier l'homogénéité des briques.

Les ultrasons sont des vibrations sonores mécaniques et élastiques de fréquences comprises entre 20 kHz et 100 MHz qui ne se propagent que dans des fluides ou solides (**Bodian, 2011 ; Riquier et Wirzbicki, 2006**). Elles sont utilisées dans de nombreux domaines dont la médecine, la chimie, la physique et le domaine des matériaux où elles servent notamment à apprécier l'uniformité des bétons (**Controls, 2013**).

Les vitesses des ultrasons dépendent de la nature et de la densité du corps traversé. En effet leurs vitesses sont plus grandes dans les corps minéraux (supérieures à 2000 m/s) que dans l'air où la valeur est d'environ 340 m/s (**Olympus, 2014**). La vitesse des ultrasons dépend également de la structure du corps traversé notamment de la porométrie (distribution et taille de pores). Pendant la propagation des ultrasons dans un matériau poreux (béton, brique, etc.), lorsqu'une onde ultrasonique rencontre une interface grain minéral-air, il y a une diffraction et une réflexion qui atténue la vitesse et allonge donc le temps de propagation (**Controls, 2013; Thummen, 2004**).

Dans un matériau à structure homogène (c'est-à-dire où les "vides" (pores, fissures) sont repartis de manière uniforme) les ultrasons auront une vitesse constante d'une zone à une autre. En utilisant ce principe, il est possible de déceler les défauts (regroupement de pores, zones dégradées) dans le matériau et la présence d'inclusions dans les milieux non poreux (**Budnik, 1997**). Les vitesses y seront bien-entendu différentes par rapport à l'ensemble du milieu.

Les ultrasons font de plus en plus l'objet d'utilisation pour la caractérisation des défauts dans les matériaux notamment les composites, **(Budnik, 1997; Mercier, 1974)**. **Budnik** a décrit deux techniques d'ultrason très utilisées en particulier en aéronautique qui sont :

- la méthode par transmission, qui est mise en œuvre pour la recherche d'anomalies internes,
- la méthode par réflexion, qui s'applique à la détection et au dimensionnement des défauts.

Les ultrasons servent également pour les essais d'auscultation dynamiques des bétons **(Controls, 2013; Belaribi, 2007)** ou pour détecter les fissurations, les détériorations dues au gel ou au feu et aussi pour étudier l'uniformité du béton dans des éléments semblables **(Chung et Law, 1983 in Belaribi, 2007)**.

Matériels et méthodes de travail

Matières premières

Les matières premières utilisées pour la réalisation de cette étude sont deux terres argileuses prélevées à Anguédedou (1) et à Alépé (2), des localités situées respectivement au Nord-Ouest et au Nord-Est d'Abidjan, Côte d'Ivoire (figure 1) et de tessons de sanitaires usagés collectés dans les décharges à Abidjan.

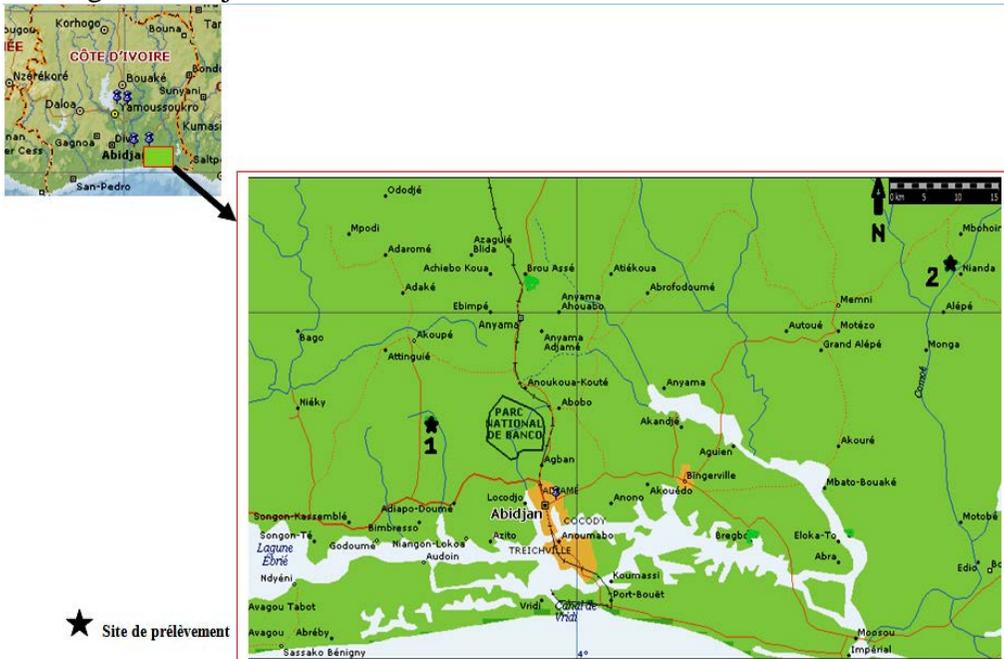


Figure 1 : Localisation des gisements des argiles

La composition chimique de ces matières premières est présentée dans le tableau I. Les argiles ont un caractère réfractaire c'est-à-dire qu'elles ont une teneur en alumine élevée et en alcalins fondants faibles ($\leq 3\%$), teneurs recommandées pour l'élaboration des réfractaires (Hury, 1995). La chamotte utilisée pour la confection des briques est constituée de tessons de sanitaire usagé de granulométrie inférieure à 1 mm. Ces céramiques du fait de leurs teneurs en silice et en alumine assez élevées peuvent être insérées dans le groupe LF 10 des réfractaires silico-argileux (EN 12475) (Poirier, 2014).

Tableau I : Composition chimique des matières premières

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃
Alépé	60,60	32,50	3,47	0,78	<0,01	3,51	0,12	0,85	<0,01	-	0,67
Anguédedou	53,90	39,80	2,90	2,87	<0,01	0,44	0,04	0,19	0,37	-	0,74
Sanitaire	56,95	25,11	2,10	1,37	0,33	1,74	0,93	3,97	0,70	0,02	-

Elaboration des briques

Les briques sont obtenues à partir de plusieurs compositions faites de mélanges argile-chamotte-eau. Le compactage s'est fait à l'aide d'une presse manuelle à compactage statique dont le moule en forme de parallélépipède rectangle permet d'obtenir des blocs de dimensions 22 x 10 x 4 cm. Les blocs après séchage pendant 30 jours dans une salle dont la température est de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ et d'humidité d'environ 65%, ont subi une cuisson à 1280°C dans un four électrique intermittent selon du cycle présenté par la figure 2.

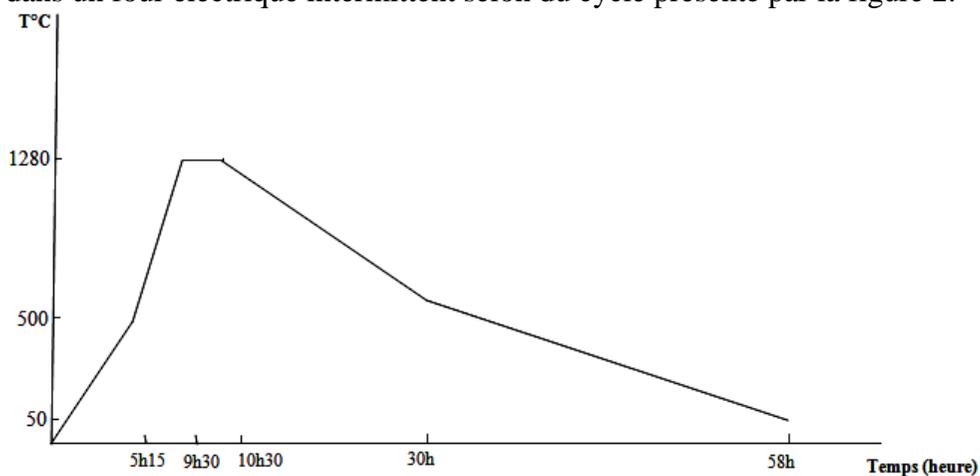


Figure 2 : Cycle de cuisson des briques

L'ensemble des étapes de confection des briques réfractaires peut être résumé par le schéma suivant (figure 3):

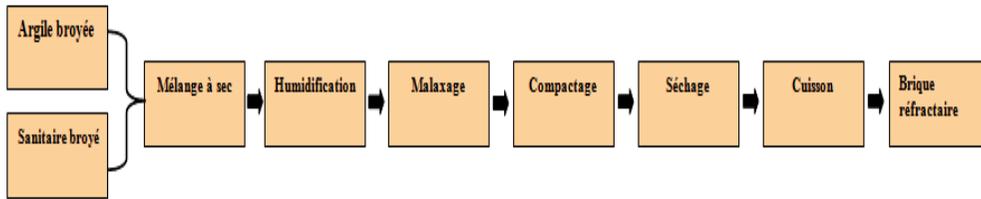


Figure 3: Etapes de confection des briques

Le mélange des granulats à sec s’est fait manuellement dans une cuvette en inox à l’aide d’une petite truelle. Après humidification le malaxage s’est fait à la main. La durée de chacune de ces deux étapes est de 5 minutes.

Les briques objets de cette étude contiennent en proportion massique 60% d’argile, 40% de chamotte et 20% d’eau par rapport à la masse totale de granulats. Ces briques ont présenté des caractéristiques mécaniques quelque peu disparates (écart-type des résistances à la compression égale à 7 MPa pour une moyenne de 34 MPa (essais portant sur des séries de 5 échantillons), d’où l’intérêt d’étudier leur structure.

Caractérisation des briques

Préparation des échantillons

Les surfaces des briques obtenues ont été subdivisées en 10 zones de même aire et portant chacune un numéro (figure 4). La mesure des vitesses des ultrasons se fera dans chacune de ces zones.



Figure 4 : photo du quadrillage des briques

Mesure de la vitesse

- Le temps de propagation de l’ultrason dans chaque zone est déterminé par l’appareil *Pulsonic* (figure 5). Cet appareil génère des ondes ultrasonores à la puissance de 2500 V produisant une fréquence de 50 kHz et introduite dans le matériau par une sonde piézoélectrique émettrice appliquée sur la surface de la zone à examiner. Ces ondes sont captées par une sonde

réceptrice de mêmes caractéristiques, appliquée en opposition sur l'autre face de la zone. Ce type de disposition est dit "transmission directe" (figure 6). Le temps mis par l'onde pour traverser le matériau dans le sens de l'épaisseur est affiché sur le moniteur de l'appareil (**Controls, 2013**).



Figure 5 : appareil d'auscultation *Pulsonic*

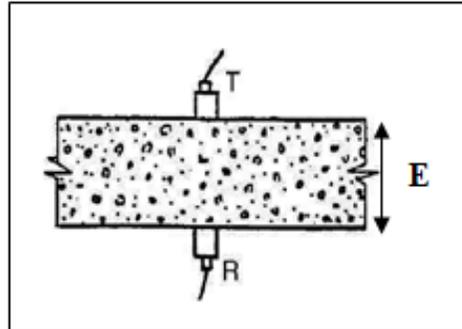


Figure 6 : positionnement des transducteurs

Les briques sont constituées d'une matrice minérale, de pores et éventuellement de fissures, la régularité ou non des vitesses de traversée permettra d'apprécier la structures des différents blocs.

- Les épaisseurs des différentes zones ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse à affichage digital.

- Les vitesses des ultrasons dans les briques ont été calculées à partir de la formule :

$$V = \frac{E}{t}$$

E : Epaisseur en mm
Où t : Temps en μ s
V : Vitesse en km/s

- L'appareillage utilisé et les conditions expérimentales ont permis de calculer les vitesses avec une précision de $p = 0,1$ km/s.

Masse volumique apparente et porosité totale.

La masse volumique apparente des briques a été déterminée par méthode de pesée hydrostatique, et leur porosité totale a été évaluée par la technique de tomographie aux rayons X.

Le traitement des données

Les différentes vitesses mesurées ont subi un traitement statistique consistant à déterminer leur moyenne, leur écart type. La moyenne et la précision des mesures permettront de définir les zones d'homogénéité.

La vitesse des ultrasons dans une zone dépend de l'importance de sa porosité.

Soit : V_i soit la vitesse de traversée des ultrasons dans la zone i
 V_m , la vitesse moyenne des ultrasons dans l'ensemble du matériau, et
 p , la précision des mesures effectuées avec l'appareillage utilisé.

Le matériau sera dit à structure homogène si quelque soit la zone i considérée, on a :

$$V_i = V_m \pm p \quad (1)$$

Ainsi pour un matériau homogène, la vitesse de toute zone i est telle que

$$V_m - p \leq V_i \leq V_m + p \quad (2)$$

d'où

$$1 - \frac{p}{V_m} \leq \frac{V_i}{V_m} \leq 1 + \frac{p}{V_m} \quad (3)$$

Toute zone dont la vitesse de traversée des ultrasons ne respecte pas la relation (3) est considérée comme étant une zone de défauts (regroupement de pores ou milieu plus dense).

Cette théorie sera utilisée pour étudier l'état d'homogénéité des briques confectionnées.

Pour la localisation des défauts sur les briques, sur chaque zone sont placés des figures caractéristiques. Ces figures vont matérialiser la porosité.

La taille et le nombre de figures de chaque zone est fonction de l'importance de la porosité de celle-ci.

Images de la structure

Des images de coupes transversales à la scie diamantée effectuées sur les briques seront analysées. Ces images obtenues par différents moyens (la microscopie électronique (MEB) et des appareils de photographie numérique) permettront d'observer l'organisation de la structure des briques et de mettre en évidence d'éventuels défauts.

Résultats et discussion

Répartition des vitesses dans les briques.

Les vitesses et les rapports V_i / V_m des briques d'Alépé et d'Anguédedou sont présentés dans le tableau II.

Tableau II : vitesses et rapport de vitesses des ultrasons par zone

zone		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	V_m	Et
Bloc d'Alépé	V_i	4,06	6,41	6,96	6,94	6,06	9,01	8,13	5,85	10,1	7,41	7,11	1,80
	(km/s)												
Bloc Anguédedou	V_i/V_m	0,5	0,9	0,9	0,9	0,8	1,2	1,1	0,8	1,4	1,0	2,58	0,40
	(km/s)	2,87	3,44	2,34	2,77	2,41	1,87	2,39	2,43	2,63	2,63		
	V_i/V_m	1,1	1,3	0,9	1,0	0,9	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1		

V_i : vitesse dans la zone i , V_m : vitesse moyenne, Et : écart-type.

Il est à signaler à ce niveau que la densité apparente de la brique d'Alépé est de 1,78 et de porosité totale d'environ 20%. La brique d'Anguédedou elle a une densité de 1,65 pour une porosité totale se situant autour des 30%.

La vitesse moyenne dans le bloc d'Alépé est de 7,11 km/s, celle d'Anguédedou de 2,58 km/s. Ainsi dans les deux matériaux, les calculs indiquent qu'une zone i se trouve dans le domaine d'homogénéité si le rapport V_i / V_m est tel que : $0,9 \leq V_i / V_m \leq 1,1$ (4)

Les rapports V_i / V_m des différentes zones et les limites de l'intervalle sont projetés sur les figures 7 a et b. Les zones d'homogénéité sont celles dont les vitesses se trouvent à l'intérieur de l'intervalle défini par les lignes matérialisant les limites de la relation (4).

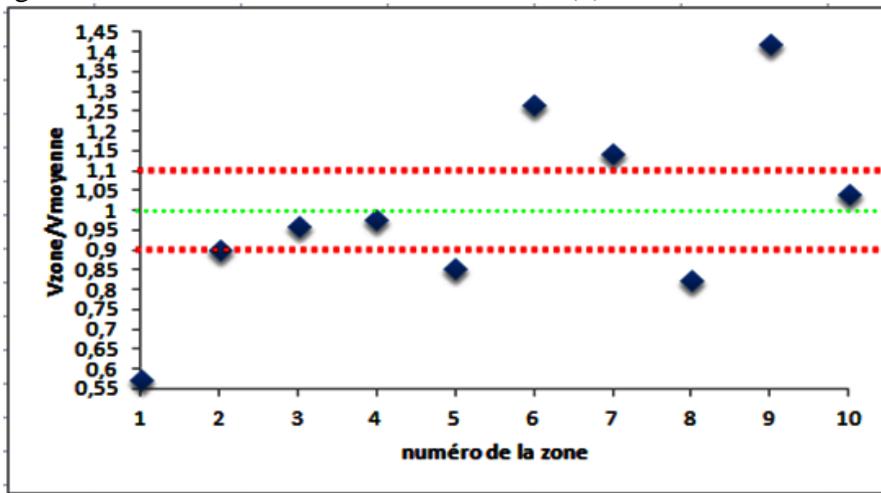


Figure 7 a : les zones d'homogénéité du bloc d'Alépé

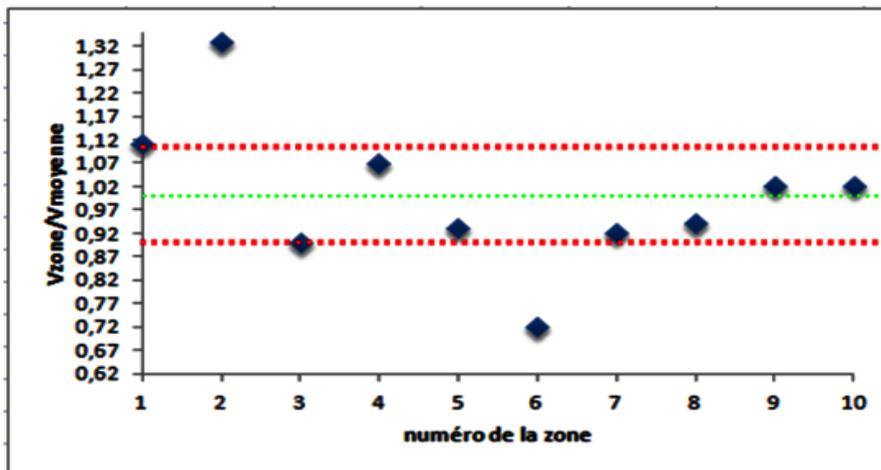
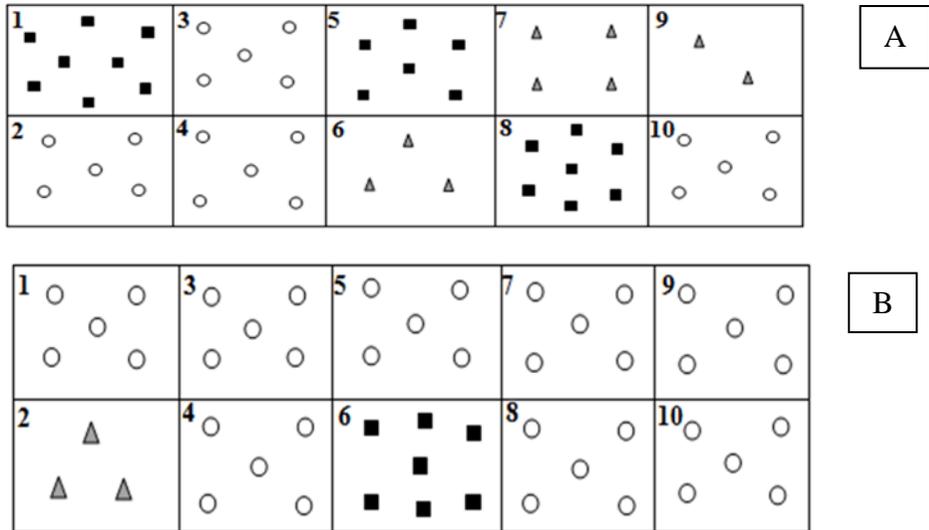


Figure 7 b : les zones d'homogénéité du bloc d'Anguédedou

La répartition des différents défauts dans la structure des blocs est présentée sur la figure 8 suivante.



A) brique d'Alépé

B) brique d'Anguédedou

Figure 8 : Répartition des zones d'hétérogénéités dans les briques

- Les cercles (○) indiquent les zones d'homogénéité,
- Les carrés (■) indiquent les zones d'hétérogénéité avec des vitesses inférieures à la moyenne : zones de regroupement de pores et / ou de fissures,
- Les triangles (▲) pour les zones d'hétérogénéité avec des vitesses supérieures à la moyenne : zones contenant moins de pores et / ou de fissures.

De l'analyse du tableau I et des figures 7 et 8, il ressort que :

- Les vitesses dans les différentes zones du bloc d'Anguédedou sont sensiblement les mêmes d'où leur regroupement dans l'aire d'homogénéité à l'exception des zones 2 et 6 (figures 7 b et 8 b).
- Les vitesses dans le bloc d'Alépé présentent une grande dispersion (tableau II); ce bloc présente de ce fait une structure plus hétérogène (la majorité des zones se trouve hors de l'aire d'homogénéité (figure 7a).
- Les hétérogénéités de la brique d'Alépé semblent se localiser d'un côté du bloc, notamment dans les zones (5, 6, 7, 8, et 9) (figure 8a), révélant ainsi l'inégale répartition des discontinuités (pores, fissures) qui se concentrent dans une partie du bloc d'Alépé.

Il ressort de l'observation de la distribution des différentes vitesses que la brique d'Anguédedou présente une structure plus homogène que celle d'Alépé ; les pores dans le bloc d'Anguédedou seraient repartis de manière uniforme dans la masse contrairement au bloc d'Alépé où les hétérogénéités semblent se concentrer dans une partie de ce dernier. La brique d'Alépé présente donc plus de défauts que celle d'Anguédedou.

- La brique d'Alépé présente les vitesses de propagation les plus élevées avec une moyenne de 7,11 km/s contre 2,58 km/s pour le bloc d'Anguédedou (tableau II).

- La brique d'Alépé semble être plus compacte car les vitesses sont plus grandes dans celle-ci par rapport à la brique d'Anguédedou. En effet la brique d'Alépé est plus dense (sa masse volumique est de 1,78 g/cm³ contre 1,65 g/cm³ pour Anguédedou) et une porosité plus basse (20% contre 30% pour Anguédedou) ; les ultrasons traversent donc plus vite le bloc d'Alépé car un matériau est d'autant moins poreux qu'il est traversé plus rapidement par les ultrasons (**Controls, 2013**).

L'étude des vitesses des ultrasons dans les briques indiquent que celles-ci présentent des hétérogénéités au sein de leur structure ; aussi pour confirmer ces observations des images de coupes de ces briques seront-elles analysées.

Observation de la structure des briques

L'analyse des images de photographies numériques et du MEB de sections transversales des différentes briques ont donné des informations qui vont dans le même sens que les observations faites à partir de la vitesse des ultrasons. Les photos numériques montrent en effet la brique d'Anguédedou présente une texture granulaire avec de nombreux pores uniformément repartis dans la matrice (figures 9 b). La brique d'Alépé quant à elle est plus compacte (figure 9 a) et présente des discontinuités allongées isolées dans certaines parties de la matrice minérale. Les observations au détail à partir du MEB renvoient aux mêmes informations. Des grains minéraux sont bien visibles sur la coupe de la brique d'Anguédedou, et entre ces grains se trouvent de nombreux pores (figure 10 b). Au niveau de la brique d'Alépé, il est observé plutôt une masse minérale avec néanmoins des pores à l'intérieur (figure 10 a).

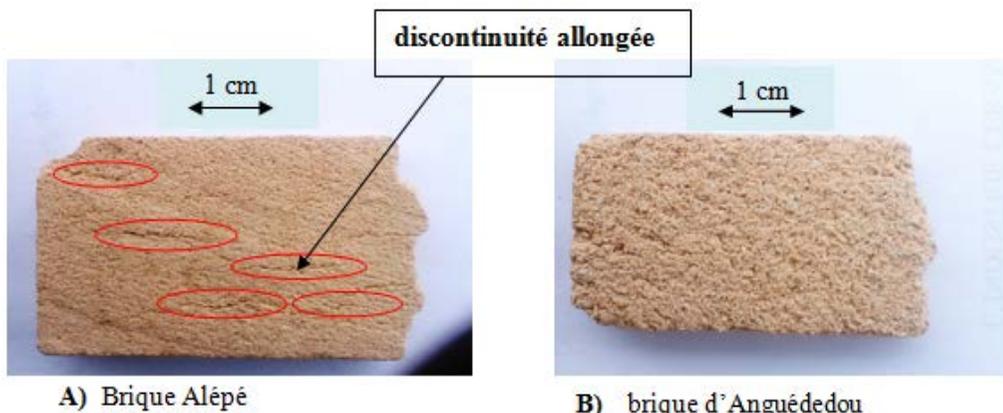


Figure 9 : Photographie de coupe transversale des briques

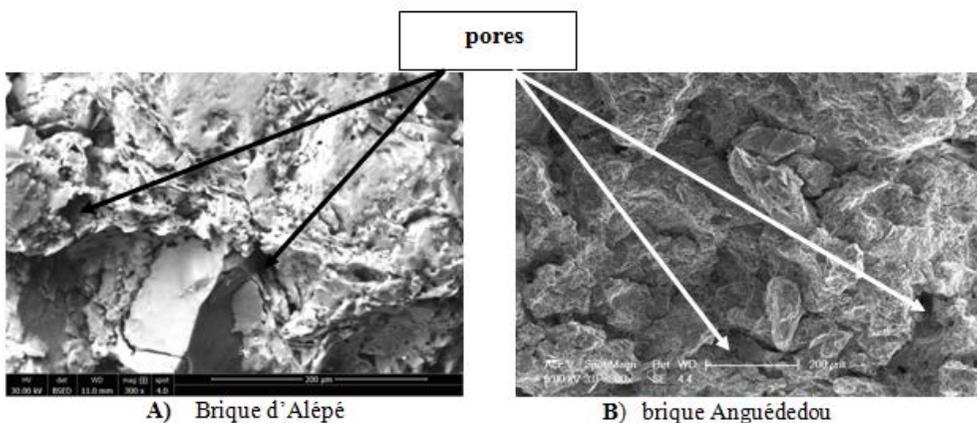


Figure 10 : Images MEB des briques réfractaires

La présence d'hétérogénéités dans la structure d'un matériau est due à de nombreux facteurs qui sont soit liés à la technique ou au matériel de confection soit à la qualité même des différentes matières premières.

Origines et conséquences des hétérogénéités dans les briques réfractaires élaborées

- Origine

La brique d'Anguédédou présente la structure la plus homogène. La brique d'Anguédédou a une texture granulaire avec de nombreux pores uniformément repartis dans la matrice. Ce phénomène est caractéristique des argiles réfractaires qui plus elles sont riches en alumine et plus elles cuisent en restant poreuses ; **Rigaud (1975)** soutient en effet que chez les argiles réfractaires la cuisson intervient avant la fermeture de la pâte c'est-à-dire avant leur vitrification.

La brique d'Alépé montre une certaine vitrification avec de ce fait une porosité plus faible et donc une densité plus élevée. L'argile d'Alépé est

en effet plus riche en alcalins fondants ($K_2O + Na_2O = 3,52\%$ contre $0,45\%$ pour celle d'Anguédedou). Les pores du bloc d'Alépé sont plus regroupés par endroit (zone 1, 5, et 8 (figure 8 a)). Ces zones sont caractérisées par des vitesses basses. On note en outre dans la brique d'Alépé des discontinuités allongées isolées dans certaines parties de la matrice minérale. Ce sont ces discontinuités qui sont à l'origine de l'hétérogénéité plus accentuée de sa structure. Les discontinuités apparaîtraient dans les blocs d'Alépé au moment du démoulage des blocs et cela à cause d'une certaine détente de la matière comprimée à l'ouverture du moule de la presse. En effet l'argile d'Alépé est moins plastique que celle d'Anguédedou (indice de plasticité d'Alépé : 23% et limite de plasticité : 27% ; indice de plasticité d'Anguédedou : 34% et limite de plasticité 23%) et avec une teneur massique en eau de gâchage de 20% , les particules de l'argile d'Alépé ne seraient pas suffisamment adhérentes les unes aux autres d'où leur séparation au moment de la détente de la matière. Dans la brique d'Anguédedou ce phénomène ne s'observe pas car l'argile est assez plastique et la teneur en eau plus proche de la limite de plasticité donc les particules argileuses sont mieux liées.

- **Conséquences**

L'homogénéité de la structure d'un réfractaire est un paramètre qui contribue à optimiser les performances mécaniques et physico-thermiques de celui-ci. L'abondance de défauts dans la structure d'un matériau réfractaire aura pour conséquence la dégradation précoce de ce dernier pendant son utilisation. Ainsi, **Kakroudi (2007)** soutient que le design (l'optimisation) de la microstructure passe par un choix réfléchi des désaccords dilatométriques entre phases, des anisotropies de dilatation, des orientations relatives et des tailles de grains dans l'objectif de maximiser le réseau de défauts c'est-à-dire rendre leur distribution homogène dans le matériau. L'hétérogénéité de la structure d'une brique réfractaire entraîne un régime de compression ou de traction différentiel de celle-ci lors des variations de température. Ces phénomènes vont induire un gradient au niveau des variations dimensionnelles qui peuvent provoquer l'apparition de fissures ou l'écaillage (dégradation en surface des réfractaires qui affecte des épaisseurs de quelques millimètres à quelques centimètre (**Poirier, 2004**). Ces discontinuités apparaissent généralement pendant le refroidissement (où le matériau est en régime de traction) car les matériaux céramiques résistent mieux à la compression qu'à la traction (**CARMA, 1999, Amrane, 2003**). Dans la brique d'Alépé on note un regroupement plus accentué des défauts dans une partie de celle-ci. Ce type de disposition va entraîner une ruine rapide de la brique pendant les cycles de cuisson-refroidissement car les différentes parties de celle-ci n'auront pas la même amplitude de dilatation ou de contraction lorsque les températures vont varier.

Les ultrasons ont été beaucoup utilisés pour la caractérisation des matériaux notamment les bétons et les composites dans l'aéronautique. Cette technique a été employée pour détecter des défauts (cavités, corps étrangers) au niveau des matériaux composites utilisés en aviation (**Mercier, 1974 ; Budnik, 1997**) à partir de l'analyse du spectre de l'oscillogramme de propagation des ultrasons ou encore pour mesurer la résistance à la compression des bétons (**Hassani et Momayez, 2004**) à partir de corrélations utilisant leurs vitesses. Ces différentes techniques ont donné des résultats satisfaisants tant en laboratoire pendant la conception des matériaux que sur les chantiers au moment d'étudier l'état de détérioration des structures en bétons au cours de leur utilisation. Dans le présent travail, les ultrasons ont plutôt servi à vérifier à partir de l'étude de la distribution des différentes vitesses, l'état d'homogénéité des briques réfractaires élaborées et d'établir la cartographie des hétérogénéités au niveau de leur structure. Cette technique s'avère utile car elle peut faire ressortir à l'image des spectres des oscillogrammes d'éventuels défauts de conception au cours des différentes étapes de l'élaboration des briques réfractaires. L'étude de la distribution des vitesses des ultrasons se présente par ailleurs comme étant une technique simple pour la détection des défauts dans un matériau car sa mise en œuvre et son interprétation est plus facile que l'analyse du spectre du déplacement des ultrasons à l'oscilloscope. L'étude de la distribution des vitesses des ultrasons est une méthode rapide de vérification de l'homogénéité d'un réfractaire ; cette homogénéité étant en grande partie le gage de sa bonne tenue aux chocs thermiques.

L'analyse de la propagation des ondes ultrasonores peuvent de ce fait être associée à l'étude de la porosité et de la densité des matériaux réfractaires et permettre ainsi d'étudier la structure générale des pièces élaborées.

Conclusion

L'étude de la propagation des ultrasons a permis d'avoir une idée de la structure des briques notamment de connaître l'état d'homogénéité de celles-ci et la répartition des éventuelles hétérogénéités dans ces briques. Ainsi les briques d'Anguédédou ont présenté des vitesses d'ultrasons plus uniformes que celles d'Alépé révélant ainsi qu'elles ont une structure plus homogène. Cette étude s'avère nécessaire pour les réfractaires car la qualité d'une brique réfractaire requiert certaines performances notamment la résistance pyroscopique qui peut être assurée par une teneur importante en alumine mais aussi et surtout la résistance aux chocs thermiques qui elle dépend en partie de l'homogénéité de la structure du réfractaire. Certaines briques réalisées manuellement présentent des hétérogénéités qui sont liées à des défauts de conception (mélange de granulats, humidification et

compactage non uniformes) et qui peuvent s'avérer nuisibles pour certaines caractéristiques notamment la bonne tenue aux chocs thermiques. L'étude de la propagation des ultrasons dans un matériau se présente donc comme une technique non destructrice de diagnostic de la structure de ce dernier.

References:

1. **Amrane B. (2003)**. Elaboration et caractérisation d'un matériau réfractaire thermorésistant pour supports de cuisson rapide des produits céramiques. Mémoire de magister, université de Boumerdes, département de génie des matériaux. pp 73-78.
2. **Belaribi H. (2007)**. Essais non destructifs du béton. *Thèse de l'université de Biskra*. pp 54-63
3. <http://www.thesis.univ-biskra.dz>
4. **Bodian P. (2011)**. Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope : Application a l'évaluation des propriétés d'élasticité et d'atténuation d'aciers moules par centrifugation et de soudures en inconel, Thèse N°2011 ISAL 0024 École doctorale Matériaux Lyon, pp 19-31.
5. **Budnik C. (1997)**. Caractérisation et propriétés d'usage des composites. Journal technique de l'ingénieur (TI). N° AM5407 v1
6. **CARMA (1999)**. Les Céramiques Industrielles. Applications industrielles et développements potentiels dans les Alpes-Maritimes. pp 33-42.
7. **Controls (2013)**. Manuel d'utilisation appareil d'auscultation sonore 58-E4900. pp 13- 36
8. **Eméruwa E. (1993)**. Les matières premières à usage céramique de Côte d'Ivoire. Rapport de SODEMI n°634, Abidjan, 16p.
9. **Hassani F. et Momayez M. (2004)**. Conception d'un nouvel appareil d'auscultation des couches de béton projeté sur les parois des galeries de mines souterraines. Rapport R-389 de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSSST)
10. <http://www.irsst.qc.ca>
11. **Hury J. (1995)**. Matières premières entrant dans la composition des pâtes céramiques. Cours de céramique, 12p
12. **Kakroudi M. (2007)**. Comportement thermomécanique en traction de bétons réfractaires : influence de la nature des agrégats et de l'histoire thermique. Thèse de l'université de Limoges, pp112-129.
13. **Lecomte G. (2004)**. Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite-muscovite. Thèse N° 53 – 2004, faculté des sciences et techniques Université de Limoges, pp1-40.

14. **Mercier N. (1974).** Contrôle non destructif de matériaux par ultrasons. Note Technique N° 232 Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), pp 6 - 47
15. **Olympus (2014).** Vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans les matériaux. Document web. <http://www.olympus-ims.com/fr/>
16. **Poirier J. (2014).** Céramiques réfractaires. Journal technique de l'ingénieur (TI) N° 4804, 26p
17. **Rigaud J. (1975).** La cuisson des matières premières et des pâtes céramiques. Journal L'INDUSTRIE CERAMIQUE, Juin 1975, N° 685 pp 391-397
18. **Riquier R. et Wirzbicki N. (2006)** Les ultrasons : document web, 20p
19. <http://www.phgeorges.free.fr>
20. **Thummen F. (2004)** Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires. Thèse N° 2004 ISAL 0027 Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Pp 8-48
21. **Traoré K. (2003).** Frittage à basse température d'une argile kaolinitique du Burkina Faso : transformations thermiques et réorganisations structurales. Thèse n° 15-2003 Université de Limoges, pp 1-20.