



## **Potentialité d'utilisation d'argiles Djiboutiennes dans l'industrie céramique**

Mohamed Osman Awaleh<sup>1\*</sup>, Idriss Guirreh Farah<sup>1</sup>, Leila Farah Adawe<sup>1</sup>, Nima Moussa Egueh<sup>1</sup>, Youssouf Djibril Soubaneh<sup>2</sup>, Antoine Marie Caminiti<sup>3</sup>, Farhan Bouraleh Hoch<sup>1</sup>, Joël Etoubleau<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institut des Sciences de la Terre, Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti (CERD), route de l'aéroport, Djibouti, B.P. 486, République de Djibouti.

<sup>2</sup>Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 310, Allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, Canada.

<sup>3</sup>Ministère de l'Énergie chargé des Ressources Naturelles, Cité Ministérielle, B.P. 1010, République de Djibouti

<sup>4</sup>IFREMER, Centre de Brest, BP 70 - 29280 Plouzané, France.

### **Résumé**

Les argiles de la zone du Lac Abhé (Djibouti) ont été étudiées pour emploi en céramique. Les études réalisées ont porté sur des échantillons jugés représentatifs, prélevés dans une formation à dominance argileuse, légèrement métamorphisée, qui affleure dans la plaine de Goba'ad au nord ouest du village de Koûtaboûyya. Les analyses physico-chimiques, les études minéralogiques et les essais technologiques effectués sur ces échantillons indiquent que ces argiles peuvent être considérées comme argiles grésantes (non réfractaires) pouvant être utilisées pour la fabrication de produits céramiques. Le processus de cuisson a été suivi par spectroscopie infrarouge. En outre, la tenue en température des pièces cuites de ces argiles a été étudiée. Des briques d'essais, cuites à 1050 °C, restent plates, sans déformation ou défaut et de teinte blanchâtre. Celles-ci présentent une perte en poids tolérable et un coefficient de retrait à la cuisson peu élevé (16 %) ; ce dernier peut être corrigé par l'ajout d'un dégraissant. La diffraction des rayons X montre que ces argiles proviennent principalement de la détérioration de rhyolites.

**Mot clefs** : argile; minéralogie; essais technologiques; céramiques; tenue en température; spectroscopie infrarouge

**Abstract**

The clays of Abhe Lake area (Djibouti) have been studied for their use in ceramic industry. The realised studies were carried out on representatifs samples, taken from a clay dominated formation that outcrops in Goba'ad plain north east of Koûtaboûyya village. The chemical analyses, mineralogical studies, and advanced technological test undertaken on the samples soil indicate that these clays can be considered as non-refractory material, so they can be used to the manufacturing of ceramic products. The firing of these clays was followed by means of infrared spectroscopy. Moreover, the temperature behaviour of the cooked parts of these clays was studied. The tested briquettes, cooked at 1050 °C, remain flat, without deformation or defects; and have a white color. The loss in weight of these briquettes remains tolerable with a slightly high firing shrinkage (16 %) that can be corrected by the addition of a degreaser. The X-ray diffraction shows that these clays come mainly from the deterioration of rhyolite.

**Keywords:** clay; mineralogy; technological tests; ceramic; temperature behavior; infrared spectroscopy

**1. Introduction**

Les argiles des sols s'organisent en des particules primaires s'associant elles-mêmes pour former des unités morphologiques dont la taille et la forme dépendent du type d'argile [1]. Leur origine est, soit un héritage à partir du matériau originel, soit une transformation des minéraux primaires, soit une néoformation dans les sols dans des conditions particulières [2].

Les argiles constituent des minéraux naturels de granulométrie fine et qui sont composés surtout de silicates hydratés d'aluminium, auxquels s'ajoutent du fer, des alcalis et des éléments alcalino-terreux.

Dans l'industrie, les argiles sont utilisées pour l'élaboration des céramiques et des matériaux de construction. Elle sert aussi à fabriquer d'autres produits que les céramiques. En effet, on l'utilise notamment comme agent anti-agglutinant dans les engrais et comme matière de charge dans les plastiques, ainsi qu'à synthétiser des produits chimiques et pour raffiner le pétrole.

Pour toutes ces raisons, nous avons entrepris une étude systématique des argiles Djiboutiennes afin de sélectionner les variétés les plus adaptées pour des exploitations industrielles. Ces études comme ceux portant sur les perlites naturelles ou expansées d'Egeralayta sont exécutées dans le cadre du projet de Valorisation des Géomatériaux Djiboutiens initiée au Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti [3].

Il est à signaler qu'à Djibouti, les études portant sur les séries argileuses sont pratiquement inexistantes. Un seul rapport portant sur les matériaux de construction décrit un gisement d'argile à attapulgite riche en inclusions millimétriques de carbonates de type encroûtement [4a, 4b].

Notre étude porte sur la possibilité d'emploi en céramique d'une variété d'argile de la région de Dikhil, plus particulièrement de la zone du Lac Abhé. La présente note décrit le contexte géologique de cette argile ainsi que les caractérisations physico-chimiques, minéralogique, la tenue en température et les tests géotechniques de cette argile. En outre, la cuisson de cette argile a été suivie par spectroscopie infrarouge.

## **2. Matériaux et méthodes expérimentales**

Afin d'avoir une fraction représentative de l'échantillon représentatif brut pour les analyses, l'échantillon a été séchée dans une étuve à une température de 40°C jusqu'à ce que la masse soit constante. Cette étape est suivie d'une réduction des mottes et tamisage de l'échantillon jusqu'à obtenir un diamètre moyen  $\leq 2$  mm. Ainsi, toutes les analyses physico-chimiques ont été menées avec des échantillons préparés de cette façon.

L'humidité résiduelle a été calculée selon la norme NF X31-102. Le principe est le séchage d'une masse d'échantillon dans une étuve à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que la masse soit constante.

La mesure du pH a été faite selon la norme NF X31-103. La conductivité électrique est déterminée selon la norme NF X31-113 qui est basée sur l'extraction des sels d'un échantillon, solubles dans l'eau, dans un rapport sédiment/eau égal à 1/5 (M/M). Un multi-paramètre C862 a été utilisé pour la mesure de la conductivité.

L'analyse multi-élémentaire de l'argile a été faite par Fluorescence X (S8, Tiger) qui fonctionne avec un tube à Rayon X à anticathode de Rhodium. Les éléments majeurs et traces ont été analysés.

Les analyses par spectroscopie IR ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre Bruker ALPHA Infrarouge à transformé de Fourier. Le dispersant utilisé est le bromure de potassium.

Les analyses radiocristallographiques ont été réalisées sur un diffractomètre D8 Advance dont les conditions d'acquisition sont de 40 kV, 40 mA avec une source de rayonnement du Cu K $\alpha$  (1.543 Å), un filtre de nickel supprime la raie K $\beta$  du Cu. Les échantillons préparés pour essai sont fixés sur un support en Polychlorure de vinyl avant leur introduction dans le diffractomètre de rayons X. Pour chacun des échantillons, l'acquisition d'un pré-scan permet d'évaluer le domaine angulaire utile. Chacun des diagrammes a ensuite été enregistré entre 10 et 70 degrés en 2 $\theta$  avec un pas angulaire de 0.016° et un temps d'acquisition d'1 seconde par pas et une fente de 0.05 mm. Le bruit de fond soustrait, chaque diagramme comporte environ une quinzaine de pics importants. Les fentes utilisées dans ces expériences sont 1mm.

La méthode de sédimentation a été utilisée pour la détermination de la distribution granulométrique des argiles.

Pour le dosage des matières organiques des argiles, on pèse 0.25g d'échantillon préparé pour essai dans une capsule en quartz, puis on place cette capsule dans un four pour la calciner à 450 °C pendant 3h. Ensuite on retire la capsule et on la laisse refroidir dans un dessiccateur. Le pourcentage de perte de masse engendrée par la calcination représente le pourcentage en matière organique.

### **3. Cadre géologique**

Les échantillons argilo-carbonatés proviennent des dépôts lacustres Holocène supérieur prélevés près du Lac Abhé. Ces dépôts correspondent à un haut niveau du lac au Quaternaire situé à l'extrémité occidentale du grand bassin de Goba'Ad.

La dépression du Gob'Aad est une cuvette remplie de sédiments détritiques d'origine fluviale et de sédiments lacustres depuis le Pliocène jusqu'à l'Actuel, pouvant atteindre une épaisseur de près de six cent mètres sur son flanc Sud [5]. Elle est bordée par des failles normales formant des horsts au Nord, le plateau de Gamari - Akka et au Sud, frontière éthiopienne, le plateau Ayrorre - Ud'Aie, et qui se poursuit en Ethiopie par le rift de Tendaho de direction NO-SE. Les horsts bordant ce bassin sont formés par la série stratoïde constituée essentiellement de basaltes et quelques dômes de rhyolites et de trachytes au Nord.

D'un point de vue tectonique régional, la zone du lac Abhé a été interprétée comme étant un point Triple (rift Mer Rouge, Golfe d'Aden et Est Africain) [6].

Actuellement la superficie du lac serait de moins de 180 km<sup>2</sup>, avec une profondeur moyenne de 12 mètres [7]. Depuis quelques décennies, ce lac subit une régression drastique avec une salinité de plus de 160 g/l.



**Figure 1** : A- Carte schématique de la Dépression. Le rectangle représente la République de Djibouti. B- Carte géologique de Djibouti [11]. Le lac Abhé est situé à l'extrémité occidentale du bassin de Gob Aad. L'étoile jaune situe les cheminées hydrothermales. C- Exemple d'un important dépôt de l'argile Holocène supérieur, plaine de Gob'Aad.

#### 4. Résultats et discussion

L'argile de la zone du Lac Abhé a une couleur grisâtre qui s'apparente à celle du "cendre". Il est important de noter que les caractérisations faites dans le cadre de la présente étude correspondent à l'état de l'argile à l'instant où l'analyse a été réalisée. La caractérisation ne tient donc pas compte de toutes les modifications des conditions environnementales telles que le changement de potentiel redox et de pH que subissent les argiles du moment où elles ont été draguées et tamisées, jusqu'à l'analyse au laboratoire.

Il est important de signaler que la perte de masse observée lors du séchage à 103°C ne correspond pas uniquement à la perte d'eau, elle peut également correspondre à l'évaporation de la matière organique volatile susceptible d'intervenir à partir de 60°C.

L'humidité totale ( $H_T$ ) d'une argile donnée est la somme de l'humidité à 40 °C ( $H_{40}$ ) et de l'humidité résiduelle ( $H_r$ ). Les valeurs de  $H_{40}$  et  $H_r$  de l'argile de la zone du lac Abhé sont respectivement 3,6 % et 6 %.

Le pourcentage en matière organique de l'argile de la présente étude est environ 7%.

La conductivité électrique est une mesure qui donne une approximation de la concentration des sels solubles présents dans l'échantillon. Il s'est avéré que l'argile de la zone d'étude est très salinisée avec une conductivité électrique à 25°C de 7140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La teneur en carbonate de cette argile est 6.4 %. Ce teneur en carbonate pourrait expliquer le pH basique de cette argile (pH = 8.4).

La détermination granulométrique montre une texture à prédominance sablo-limoneuse (Sable grossier = 1.7 % ; Sable fin = 21.3 % ; Limon grossier = 14 % ; Limon fin = 41 % ; Argile = 22 %)

##### *Analyse physico-chimiques de l'argile*

Les éléments métalliques traces de l'argile peuvent être mis en solution par attaque à l'eau régale ou par attaque à l'acide fluorhydrique. Ces méthodes conduisent à l'obtention d'une solution destinée à des dosages par spectrométrie d'émission atomique. La première méthode, celle à l'eau régale, a pour principe la mise en solution de l'échantillon dans un mélange

d'acide chlorhydrique et nitrique par ébullition sous réfrigérant à reflux. L'inconvénient c'est qu'elle ne permet pas la mise en solution des métaux liés à la structure silicatée. La méthode à l'acide fluorhydrique par contre, permet de dissoudre les composés silicatés. Cette méthode pourrait nécessiter une calcination préalable à 450°C. Cette calcination qui permet de détruire la matière organique est suivie d'une mise en solution dans l'acide fluorhydrique et perchlorique par évaporation. Après élimination des acides fluorhydrique et perchlorique par évaporation, le résidu est attaqué par des acides chlorhydrique et nitrique. L'inconvénient de ce procédé est l'éventuelle perte d'éléments sous forme de composés volatils tels que le mercure ou le plomb tétraéthyle lors de la calcination ainsi que l'évaporation de la silice sous forme de  $\text{SiF}_4$ . Toutefois, il est à noter qu'il existe plusieurs procédés de mise en solution des argiles à des fins d'analyse spectroscopique qui ne nécessite pas une étape de calcination. Néanmoins, nous avons préféré utilisé la fluorescence X pour la détermination des éléments métalliques majeurs de l'argile de la présente étude. Les analyses chimiques quantitatives de ces argiles sont regroupées dans le *Tableau 1*.

Les résultats de ces analyses montrent que l'argile de la zone du Lac Abhé est essentiellement constituée de silice, d'alumine et d'oxyde de calcium (environ 63.04%). Par ailleurs, les teneurs en oxydes alcalins et alcalino-terreux sont faibles (*Tableau 1*). Ces analyses chimiques montrent clairement aussi que le taux d'alumine, 9.87% est faible comparativement aux teneurs en alumine des argiles réfractaires 45% [12]. Cette faible teneur en alumine confère aux pièces en céramiques, produites à partir de l'argile de la présente étude, une faible tenue en température. En d'autres termes, nous avons observés que ces pièces de céramiques ne peuvent pas tenir une température supérieure à environ 1200°C.

D'autre part, il a été démontré qu'un excès de CaO libre peut générer une porosité importante [13]. Bien que la présence de calcite réduise le retrait au frittage, la formation de phases cristallines intermédiaires génère une porosité multimode, qui détériore les propriétés mécaniques dès que le taux de calcite dépasse 5 % [14]. Le taux de calcite de l'argile de la zone du lac Abhé, 6.4%, est légèrement supérieur à ce seuil. Ceci pourrait expliquer les fissures des pièces cuites. Il faudrait noter que ces fissures sont observées pour les pièces produites avec une cuisson continue. Afin de palier à cet inconvénient, nous avons testé différents modes de cuissons. Nous reviendrons sur les résultats de ces tests dans la partie comportement thermique des argiles.

**Tableau 1** : Composition chimique de l'argile de la zone du lac Abhé

SiO <sub>2</sub> (%)	40.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	9.87
CaO (%)	12.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7.30
MgO (%)	5.15
K <sub>2</sub> O (%)	1.62
TiO <sub>2</sub> (%)	1.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.25
S total (%)	0.44
MnO (%)	0.13
Perte au feu (%)	16.95

**Comportement thermiques des argiles**

A fin de suivre la perte en poids à la cuisson de l'argile de la présente étude, nous avons préparé des briquettes de dimension 7 cm x 3 cm x 1 cm.

La diminution du poids de chaque briquette entre le séchage à 110 °C et les différentes températures de cuisson est déterminée selon la formule suivante :

Perte en poids (%) =  $100(m_{110} - m_t) / m_{110}$ , où  $m_{110}$  est la masse de l'échantillon à 110 °C et  $m_t$  la masse de l'échantillon cuit à la température  $t$ .

Les pourcentages de la perte en poids à des températures de 950, 1000 et 1050 °C sont fournis dans le **Tableau 2**.

**Tableau 2** : Perte en poids à la cuisson

	950 °C	1000 °C	1050 °C
Perte en poids (%)	16 (±0.13)	16 (±0.14)	16 (±0.14)

On remarque que la perte en poids est à peu près constante (16%), quelle que soit la température et quelque soit l'échantillon. Ce pourcentage concerne surtout l'eau moléculaire,

l'oxydation de FeO et la décomposition des sulfates [15]. Ces pourcentages sont très tolérables, ce qui rend le matériau très rentable pour l'exploitation industrielle.

La détermination de la valeur de retrait se fait par l'étude de la variation de la moyenne des longueurs des traits enregistrés sur les briquettes entre le séchage à 110°C et la cuisson à différentes températures.

La formule suivante permet le calcul du retrait à la cuisson :

$$\text{Retrait à la cuisson (\%)} = (L_{110} - L_t/L_{110}) \times 100$$

Avec  $L_t$  la longueur à la cuisson à la température  $t$ ,  $L_{110}$  la longueur au séchage à 110°C

Le pourcentage du retrait à la cuisson aux températures 950, 1000 et 1050°C est constante et vaut 5,5%.

Pour tester l'utilisation en céramique des argiles de la zone du lac Abhé, différents programmes de chauffe ont été testés (**Tableau 3**). Ces programmes de cuisson sont les seuls qui ont permis d'assurer une meilleure tenue en température des argiles testées (**Tableau 3**). Autrement la cuisson de ces argiles produit des pièces qui se fissurent lors de leur refroidissement. En effet, l'objectif de la présente étude était de produire de manière routinière des céramiques à partir des argiles à faibles teneurs en alumine de la zone du lac Abhé. Cette côté pratique de la chose nous permet de proposer aux petites unités industrielles intéressées à confectionner des pièces en céramique à partir de ces argiles, particulièrement situées dans une zone touristique, des programmes de chauffe adapter pour la production de telles céramiques. D'autre part, une étude plus fondamentale est cours pour étudier les causes des fissures des pièces en céramiques faites à partir de cette argile lors d'une cuisson continue.

Il est ressortit de ces tests qu'il faudra cuire les pièces d'argiles moulées en trois étapes. Dans la première phase (dit de préchauffe ou séchage) les pièces d'argiles préalablement séchées au soleil sont portées à 100°C avec une rampe de 30 – 40°C/h et un palier de 10 min (**Tableau 3**). Après 1 – 2 heures de refroidissement à la température ambiante, les mêmes pièces sont portées à 170°C avec une rampe de 30 - 40°C/h et un palier de 10 – 20 min. Cette étape permet d'éliminer les molécules d'eau des pièces d'argiles moulées. En effet, pour ce qui est de l'argile de la présente étude, il s'est avéré que cette étape était nécessaire pour la prévention de toute fissuration des pièces cuites.

La deuxième étape (dit de cuisson) consiste à produire des pièces d’argiles cuites. Dans cette étape, deux segments de chauffe sont utilisés. Les rampes, températures de chauffe et paliers des deux segments sont résumés dans le *Tableau 3*.

**Tableau 3** : Programmes de Chauffe optimisés des argiles de la zone du lac Abhé

	Segment 1			Segment 2			Energie
	Rampe(°C/h)	T <sub>1</sub> (°C)	Palier(min)	Rampe(°C/h)	T <sub>2</sub> (°C)	Palier(min)	Energie (Kwh)
<b>Préchauffe ou séchage</b>	30	100	10				0.604
	30	120	10				0.680
	40	150	10				1.237
	30	170	20				0.976
	30	180	20				0.878
	30	200	20				1.127
<b>Cuisson</b>	30	250	30	60	800	10	10.97
	40	250	10	60	800	10	9.853
	40	250	10	60	800	10	12.22
	30	250	20	60	800	10	11.67
	30	250	10	60	800	10	9.361
<b>Emaille</b>	40	200	10	60	950	10	15.37

Enfin, la troisième étape (dit de la mise en email) consiste à émailler les pièces produites dans la seconde étape. En effet, les pièces d’argiles cuites, de la seconde étape, refroidies à la température ambiante sont émaillées en deux segments (*Tableau 3*).

La cuisson des biscuits (argile cuite sans émaille) se décompose en quatre étapes : (1) Processus de séchage ; (2) Elimination de l’eau chimique, les pièces doivent être enfournées complètement sèches sinon elles peuvent éclater ; (3) Processus de transformation du quartz, il faut absolument respecter la durée de deux heures sinon les pièces peuvent se casser en deux, (4) Température maximale pour la cuisson du biscuit.

La cuisson des pièces émaillées se décompose en quatre étapes : (1) Processus de transformation du quartz; (2) Processus de vitrification et de fusion de l’email ; (3) Température maximale pour la cuisson.

Il faudrait noter que les courbes de cuissons des biscuits et des pièces émaillées sont obtenues à partir des tests de chauffe résumé dans le *Tableau 3*.

Il faudrait noter que nous avons utilisé le courant du secteur dans la présente étude. De surcroît le coût d'électricité en république de Djibouti est très élevé, où 1 Kwh coûte en moyenne 0.23 US\$. Les fours programmables utilisés dans le cadre de la présente étude ont permis d'estimer l'énergie nécessaire pour chaque programme de chauffe (*Tableau 3*). Par exemple, la cuisson complète de 10 pièces de céramiques de taille moyennes (20 à 30 cm de hauteur, *Figure 2*) nécessite environ 26 kwh. De ce fait, chaque pièce de céramique produite dans le cadre de la présente étude coûterait en énergie environ 0.83 US\$. D'ailleurs, il est intéressant de noter que présentement de telles pièces de céramique emportées coûtent environ 4.50 – 16.85 US\$ sur le marché local, d'où la nécessité de développer une telle industrie en république de Djibouti. En outre, il est possible de réduire le coût en énergie pour la cuisson des pièces en céramiques des argiles de la présente étude en utilisant des huiles usagées par exemple.



**Figure 2** : Pièces de céramiques produites à partir de l'argile de la zone du lac Abhé.

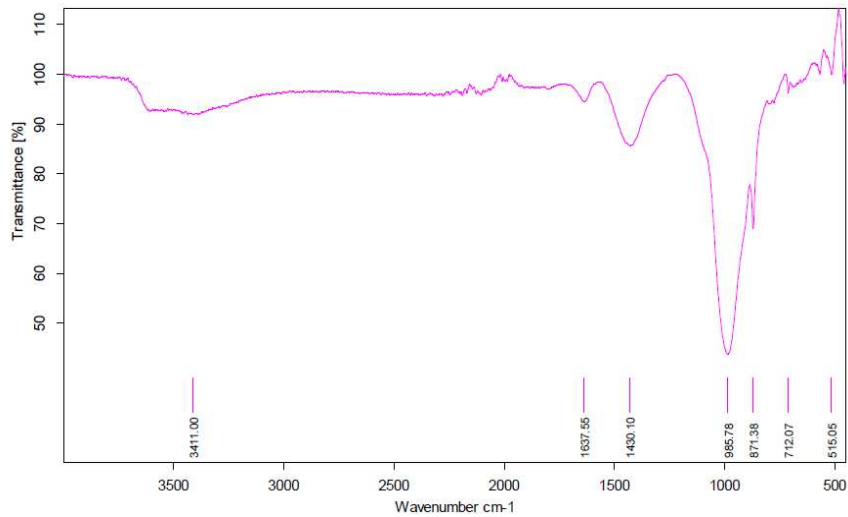
### *Spectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier*

Le spectre infrarouge de l'argile étudiée dans le cadre de la présente étude est présenté dans la *Figure 3*.

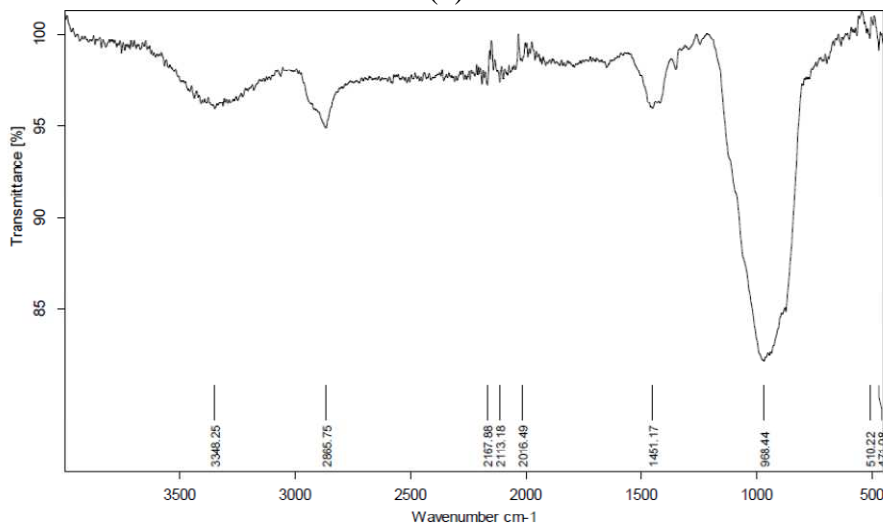
La bande de vibration  $3400\text{ cm}^{-1}$  est caractéristique des molécules d'eau. Par voie de conséquence, cette fréquence a été assignée à la vibration de valence de l'eau absorbée par l'argile de la zone du lac Abhé. La fréquence  $1640\text{ cm}^{-1}$  est attribuée à la vibration de

déformation de l'eau d'absorption (*Figure 3*). Quant aux fréquences de vibrations à 712, 875 et 1430  $\text{cm}^{-1}$ , elles ont été assignées à la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) [14 – 17].

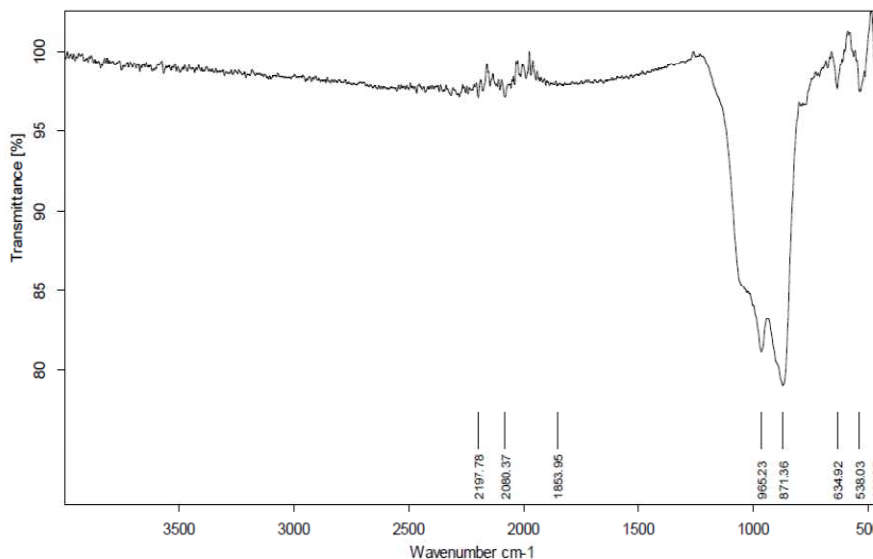
Les silicates ont des bandes de vibration caractéristiques à 460, 800 et 1090  $\text{cm}^{-1}$  [17 – 25]. Pour ce qui est de l'argile de la présente étude, les fréquences de vibration à 457, 515 et 986  $\text{cm}^{-1}$  sont attribuées à  $\text{SiO}_2$  [18 – 25]. Quant à l'intense bande de vibration 986  $\text{cm}^{-1}$ , elle a été attribuée aux groupes alimino-silicate de l'argile étudiée [16, 18 – 25].



(a)



(b)



(c)

**Figure 6 :** (a) Spectre I. R de l'argile à 25 – 600 °C. (b) Spectre I. R de l'argile à 700°C. (c) Spectre I. R de l'argile à 800 – 1000 °C

Afin de suivre le processus de cuisson des argiles, nous avons chauffé des échantillons d'argiles à différente température allant de 100°C à 1000°C. Nous avons suivi l'évolution des spectres infrarouges de ces argiles cuites à différente températures. Ces spectres infrarouges sont présentés à la **Figure 3**. A 500 – 600°C, l'argile perd son eau de constitution. En effet, les fréquences de vibrations des molécules d'eau disparaissent des spectres FTIR des échantillons cuites à des températures supérieure à 600°C.

D'autre part, il ressort de cette étude que les bandes de vibrations caractéristiques de la calcite disparaissent à 800°C (**Figure 3c**). La spectroscopie infrarouge montre ici clairement que la calcination de la calcite s'opère à des températures supérieures à 800°C selon la réaction suivante :



Dans les spectres FTIR des échantillons d'argiles cuites à des températures allant de 800 à 1000°C ne sont présentes que les bandes de vibrations caractéristiques des groupes alumino – silicates. Il est intéressant de noter que les alumino – silicates ne se décomposent qu'à partir de 1700°C.

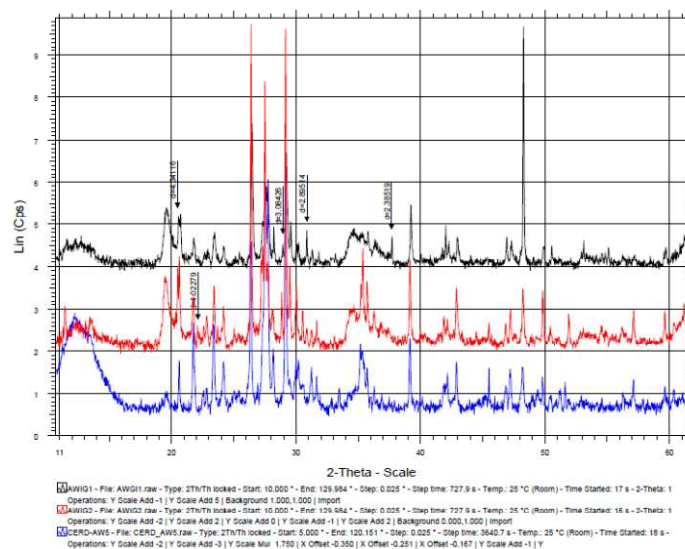
### ***Diffraction de rayon X sur poudre***

La diffraction des rayons X sur poudre a été utilisée pour identifier les phases cristallisées contenues dans les argiles.

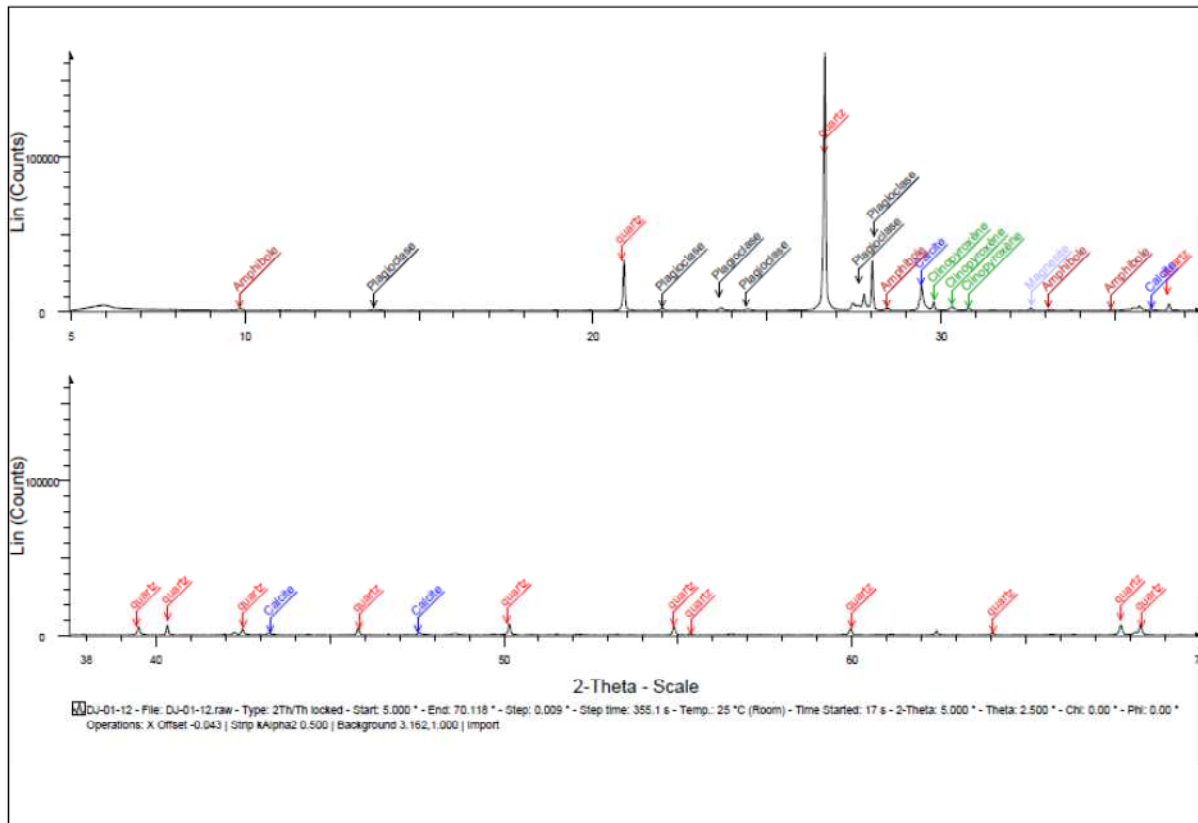
Les diffractogrammes de poudre des argiles tamisées à  $\Phi \leq 1.35$  mm et  $\Phi \leq 0.212$  mm sont présentés à la **Figure 4**. D'autre part, nous avons enregistré le diagramme de diffraction de rayons X d'une rhyolite altérée collectée dans une zone très proche du gisement d'argile utilisé dans la présente étude (**Figure 4**).

Le diffractogramme de rhyolite altérée se superpose aux diffractogrammes de l'argile (**Figure 4**). Ceci montre très clairement que l'argile étudiée dans le cadre de la présente étude contient des éléments de rhyolite. Au vu des résultats de la diffraction des rayons X, ces argiles pourraient provenir de l'altération d'une roche acide.

L'analyse de l'échantillon par diffraction aux Rayons X montre la présence de quartz, de calcite, de plagioclase, magnésite et de clinopyroxène (**Figure 5**). Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par fluorescence X où l'on a une fraction importante de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO}$ . Le plagioclase, le clinopyroxène et l'amphibole sont des minéraux diagnostiques qui rentrent dans la constitution des roches magmatiques.



**Figure 4** : Diagrammes des rayons X. Diagramme noire : argile  $\Phi < 1.35$  mm. Diagramme rouge : argile  $\Phi < 0.212$  mm. Diagramme bleu : Basalte altéré de la région de Dikhil.



**Figure 5 :** Résultats de l’analyse par diffraction des rayons X de la fraction argileuse d’un échantillon représentatif de l’argile de la zone du lac Abhé.

L’échantillon analysé provient du bassin sédimentaire de Gob Aad. Ce bassin est constitué d’une fraction importante de carbonates, de diatomites et de quelques argiles (montmorillonite, illite). Les minéraux identifiés dans la présente étude proviennent de roches acides provenant probablement des reliefs voisins. Le clinopyroxène pourrait provenir du substratum qui est le basalte. La magnésite est une roche sédimentaire qui provient de l’altération de roches silicatée contenant du magnésium sous l’action d’eau carbonatée.

### Tests géotechniques

La limite d’Atterberg et la relation Densité – humidité de l’argile de la présente étude sont rapportées dans les **Tableaux 4 et 5**.

L’essai de plasticité ou limites d’Atterberg est réalisé sur la fraction inférieure à 400  $\mu\text{m}$  et consiste à faire varier la teneur en eau du matériau afin d’évaluer sa consistance [26]. L’essai a été effectuée en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un échantillon de sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposés se ferme lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à des chocs répétés.
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau d'échantillon de sol confectionné manuellement et de dimension fixée se fissure.

Les limites d'Atterberg correspondent aux seuils de passage de l'état solide à l'état plastique (Limite de plasticité : LP) et de l'état plastique à l'état liquide (Limite de liquidité : LL). L'intervalle entre ces deux limites définit l'étendue du domaine de la plasticité (Indice de plasticité : IP).

Le **tableau 4** présente les différents résultats obtenus pour la limite de liquidité, la limite de plasticité, et l'indice de plasticité de l'argile de la présente étude. D'après l'abaque de Plasticité de Gasagrande (**Figure 6**) qui met en valeur la limite de liquidité en fonction de l'indice de plasticité, il apparaît que l'argile de la zone du lac Abhé se situe dans le domaine AP – AT des argiles moyennement plastiques.

D'autre part, nous avons présenté dans le **tableau 5** une classification basée sur les limites d'Atterberg [28]. En d'autres termes, le tableau suivant donne très schématiquement les dénominations de sable, limon et argile en fonction de la limite de liquidité et d'indice de plasticité. Les résultats de la limite de liquidité ( $LL > 30$ ) et de l'indice de plasticité ( $IP > 15$ ) montrent une texture à prédominance argileuse, ce qui confirme les résultats de la distribution granulométrique de l'argile de la présente étude.

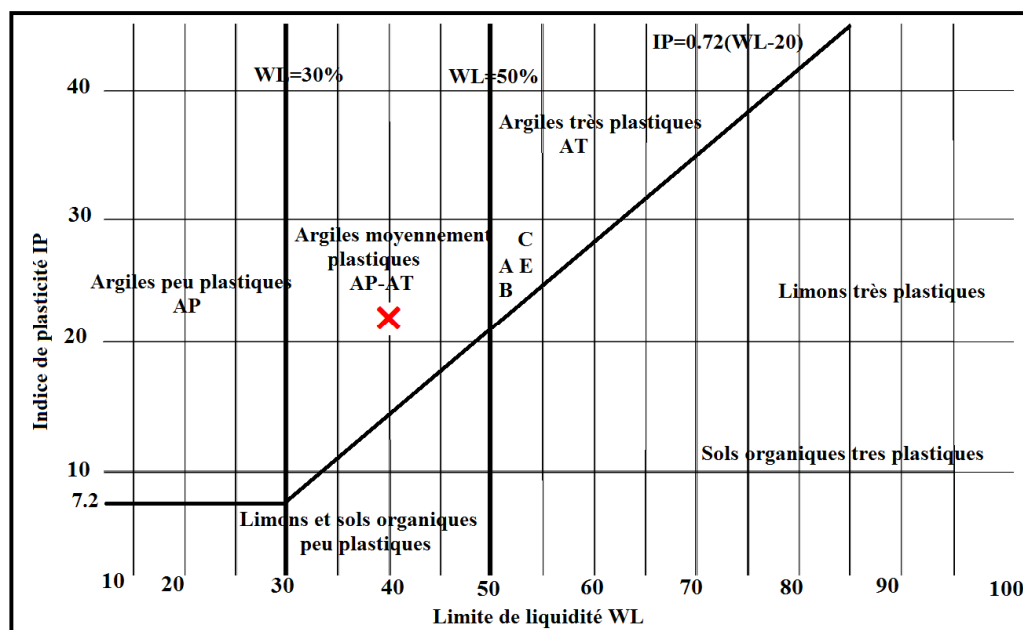
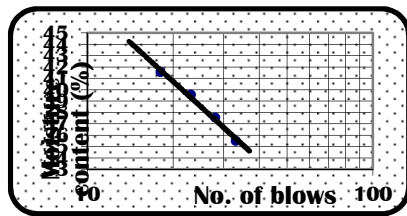


Figure 6 : Position de l'argile étudiée dans l'abaque de plasticité de Casagrande [27].

**Tableau 4 :** Limite d’Atterberg de l’argile de la présente étude

Can no.	Limite de Liquidité				Limite de Plasticité	
	60	55	75	20	48	19
No. of blows	33	28	23	18		
Wt. of wet soil + Can (gm)	50.61	50.54	50.64	50.40	27.67	27.69
Wt. of dry soil + Can (gm)	43.33	43.01	42.72	42.29	26.05	26.06
Wt. of Water (gm)	7.28	7.53	7.92	8.11	1.62	1.63
Wt. of Can (gm)	22.83	22.96	22.71	22.78	18.95	18.90
Wt. of dry soil (gm)	20.50	20.05	20.01	19.51	7.10	7.16
Moisture Content( %)	35.51	37.56	39.58	41.57	22.82	22.77
Average PL(%)=					22.79	



Limite de liquidité (%)	39
Limite de Plasticité (%)	23
Indice de Plasticité (%)	16

**Tableau 5:** Classification basée sur les limites d'Atterberg

Caractère dominant	Limite de liquidité en %	Indice de plasticité en %
Sableux	LL < 35	IP < 15
Limoneux	20 < LL < 60	5 < IP < 25
Argileux	LL > 30	IP > 15

## 5. Conclusions

Les argiles de la zone du Lac Abhé (Djibouti) ont été étudiées pour leur potentialité d’emploi en céramique. Les analyses physico–chimiques ont relevé une faible teneur en alumine, probablement responsable de leur faible tenue en température ( $T_{max} = 1200^{\circ}C$ ).

Le taux de calcite légèrement supérieur, 6.4%, de l’argile de la zone d’étude pourrait expliquer les fissures des pièces produites avec une cuisson continue. Afin de solutionner cette problématique, différents programmes de chauffe ont été testés. L’étude du comportement thermique de cette argile a permis de définir les programmes de chauffe les plus adaptés pour la production de céramique de qualité à partir de cette argile grésante (non réfractaire).

L’argile étudiée présente un coefficient de retrait à la cuisson peu élevé qui pourrait être corrigé par l’ajout d’un dégraissant. La diffraction des rayons X montre clairement que ces argiles proviennent principalement de la détérioration de roches acides (rhyolites). Quant aux

tests géotechniques, ils montrent que l'argile de la présente étude est moyennement plastique. La production d'une pièce céramique de taille moyenne de 20 – 30 cm nécessiterait 3 Kwh pour sa cuisson. Enfin, le processus de cuisson a été suivi par spectroscopie infrarouge.

### Référence

- [1] Tessier, D., Pédro, G. (1976). *Science Sol* 2, 85–99.
- [2] Pédro, G. (1976) *Science Sol* 2, 69–83.
- [3] Awaleh, M.O., Farah, I.G., Adawe L.F. (2012). *Rapport Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti, CERD.*
- [4a] CERD, 2002. *La synthèse du projet matériaux des constructions en République de Djibouti. Rapport CERD, Ministère des Affaires Présidentielles (2002).*
- [4b] Fournier, M., Gasse, F., Lepine, J.C., Richard, O., Ruegg J.C. (1983). *Carte géologique de la République de Djibouti feuille de Djibouti.*
- [5] Manighetti, I. (1993). *Dynamique des systèmes extensifs en Afar. Thèse, Université de Paris VI.*
- [6] Barberi, F., Ferrara, G., Santacroce, R., Varet J. (1975). *Structural evolution of the Afar triple junction. In ; Pilger A. & Rösler A., (Eds). Depression of Ethiopia, Schweizerbart, Stuttgart 1, 38-54.*
- [7] Vellutini, P., Pigué, P. (1994). *Djibouti - Itinéraires géologiques. Mission Française de Coopération et d'Action Culturelle à Djibouti, 289p.*
- [8] Fontes, J.C., Pouchan, R. (1975). *C.R. Acad. Sci. Paris* 280 383-386.
- [9] Varet, J., Gasse, F. (1978). *Geology of central and southern Afar (Ethiopia and Djibouti Republic): Paris, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, report, 124p. Map, scale 1:500,000.*
- [10] Gasse, F. (1975). *Thèses d'état, Université Paris-Sud, L'évolution des lacs de l'Afar central (Ethiopie et TFAI) du Plio-Pléistocène à l'actuel.*
- [11] Vellutini, P., Pigué, P. (1994). *Carte géologique de Djibouti BCIMR et P.FA Ed, p 289*
- [12] Yakoubi, N.E., Aberkan, M.H., Oudia, M. (2006). *Compte Rendue Geoscience* 338, 693 – 702.
- [13] Traore, K., Blanchart, P., Jernot, J.P., Gomina, M. (2007). *Comptes Rendues Chimie* 10 511 – 517.
- [14] Boke, H., Akkurt, S., Ozdemir, S., Gokturk, E.H., Sltik. E.N.C. (2004). *Materials Letters* 58, 723 – 726.

- [15] Marinović, S., Vuković, Z., Nastasović, A., Milutinović-Nikolić, A., Jovanović, D. (2011). *Materials Chemistry and Physics* 128, 291-297.
- [16] Trezza, M.A., Lavat, A.E. (2001). *Cement and Concret Research* 31, 869 – 872.
- [17] Legodi, M.A., de Waal, D.J. Potgieter, H., Potgieter, S.S. (2001). *Minerals Engineering* 14, 1107 – 1111.
- [18] Madejová, J. (2003). *Vibrational Spectroscopy* 31 ,1 – 10.
- [19] Paluszkiwicz, C., Holtzer, M., Bobrowski, A. (2008). *Journal of Molecular Structure* 880, 109 – 114.
- [20] Handke, M., Mozgawa, W. (1993). *Vibrational Spectroscopy* 5, 75 – 84.
- [21] Aguiar, A., Serra, J., González, P., León, B. (2009). *Journal of Non-Crystalline Solids* 355, 475 – 480.
- [22] Mostafa, N. Y., Kishar, E. A., Abo-El-Enain, S. A. (2009). *Journal of Alloys and Compounds* 473, 538 – 542.
- [23] El-Egili, K. (2003), *Physica B*325, 340 – 348.
- [24] Piscicella, P., Pelino, M. (2005). *Journal of the European Ceramic Society* 25, 1855 – 1861.
- [25] Wu, H. F., Lin, C.C., Shen P. (1997). *Journal of Non-Crystalline Solids* 209, 76 – 86.
- [26] Guerraoui, F., Zamama, M., Ibnoussina, M. (2008). *African Journal of Science and Technology (AJST)* 9, 1-11.
- [27] Philliponnat, E. (1979). *Fondations et ouvrages en terre*, Editions Eyrolles, Paris, 393p.
- [28] Reboza, A. (2011). *Rapport de stage de master recherche, Mécanique des sols, des roches et des ouvrages dans leur environnement Paris.*
- [29] CE 240 Soil Mechanics and Foundations, Soil Compaction, Das <http://www.engr.uconn.edu/~lanbo/CE240LectW033Compaction>.
- [30] Thomas, G.W. Haszler, G.R. Blevins, R.L. (1996). *Soil Science* 161, 502–508.
- [31] AZZOUZ, F.Z. (2006). *Mémoire de Magister, contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques Argiles gonflantes de la région de TLEMCEN Algérie.*
- [32] Hainard, H.P. (2002). *Matériaux pour le levé géobotanique du suisse*, Editions Académie Suisse des Sciences Naturelles, Fascicule 76 158-159.