

Influence chimique et minéralogique des sédiments de dragage portuaire dans le cadre de leur valorisation dans la fabrication des briques

Djamila Benyerou^{1,*}, Nasr-eddine Boudjenane¹, Mansour Belhadri¹

(1) Laboratoire de Rhéologie, Transport et Traitement des Fluides Complexes (LRTTFC), Faculté d'Architecture et de Génie civil, Département d'Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO-MB) B.P. 1505 Oran-EL-M'naouer 31000, Algérie.

* Auteur correspondant : Djamila.benyerou@univ-usto.dz

RÉSUMÉ

Ce travail entre dans le cadre du développement de solutions alternatives pour une meilleure gestion des sédiments de dragage ou de curage. Les travaux menés dans le cadre de ce travail portent principalement sur la valorisation des sédiments marins du port de Bethioua. On a étudié les propriétés minéralogiques de la barbotine de brique d'une briqueterie et la barbotine de brique à base de sédiments marins du port de Bethioua, Oran (Algérie). Les briques confectionnées à base de sédiment du port Bethioua à l'échelle du laboratoire présentent des performances mécaniques analogues aux briques de référence avec un taux de substitution de 5 % mais avec une faible température de cuisson (600°C au lieu de 900°C). L'étude minéralogique des échantillons a été comparée avant et après cuisson pour une température de 600°C et 900°C et pour une durée de cuisson de 24 heures. Après un traitement thermique, le quartz et la calcite ont été légèrement diminués et restent comme principaux composants cristallins. Une absence de kaolinite et de dolomite a été observée pour les échantillons étudiés à une température de 600°C. A la température de 900°C il y a eu apparition de la dolomite pour la barbotine de brique. Les résultats de ce travail montrent qu'on peut valoriser les sédiments marins du port de Bethioua dans la fabrication des briques et avoir une résistance plus élevée avec une température de 600°C que celle de la brique de référence à 900°C.

MOTS-CLÉS : sédiments marins, valorisation, barbotine de brique, port, minéralogie

ABSTRACT

This work is part of the development of alternative solutions for better management of dredging sediments or cleaning. The work carried out as part of this work focuses on the valorization of marine sediments from Bethioua port. The mineralogical properties of a brick slip from a brickyard and the brick slip made of marine sediments from the Bethioua port, Oran (Algeria) were studied. The bricks made from the Bethioua port sediment at the laboratory scale have mechanical performances similar to the reference bricks with a substitution rate of 5 % but with a low temperature (600°C instead of 900°C). The mineralogical study of the samples was compared before and after heat treatment for a temperature of 600°C and 900°C and for a cooking time of 24 hours. After heat treatment, quartz and calcite have been slightly diminished and remain as main crystalline components. An absence of kaolinite and dolomite was observed for the samples studied at a temperature of 600°C. At the temperature of 900°C there was appearance of dolomite for brick slip. The results of this work show that we can valorize the marine sediments of the Bethioua port in the manufacture of bricks and have a higher resistance with a temperature of 600°C than that of the brick of reference to 900°C.

KEYWORDS: marine sediments, valorization, brick slip, port, mineralogical

Influence chimique et minéralogique des sédiments de dragage portuaire dans le cadre de leur valorisation dans la fabrication des briques

Djamila Benyerou, Nasr-eddine Boudjenane, Mansour Belhadri

Introduction

Des opérations de dragage ont toujours été indispensables afin d'entretenir, approfondir ou aménager les sites et assurer le bon fonctionnement du commerce par voies maritime (Benyerou, 2017). Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires (Benamar *et al.*, 2012), (Levachie *et al.*, 2011). De nouveaux et meilleurs matériaux de construction à base de sédiments ont été développés. Néanmoins, différentes régions du monde ont utilisé des briques d'argile traditionnelle qui ont fait des ressources locales disponible dans le monde (Manoharan *et al.*, 2011). Au cours de ces dernières décennies les études sur la fabrication des briques à l'aide des sédiments marins et fluviaux ont augmenté à travers le monde (Lafhadj *et al.*, 2008), (Samara *et al.*, 2009), (Yang *et al.* 2014), (Romero *et al.*, 2008), (Pouv *et al.*, 2012). Environ de 3,5 millions de m³ de matériaux sont dragués chaque année. Avec ce flux de matériaux et cette richesse industrielle, il représente un cas d'étude intéressant. La valorisation a pour but d'examiner deux axes de recherche appliquée, pour réduire le tonnage des matériaux dragués et pour les valoriser dans la fabrication des briques. L'étude minéralogique s'intéresse principalement sur l'effet de l'ajout des sédiments marins et de l'augmentation de la température sur la résistance. Pendant la cuisson, une transformation se produit dans l'argile telle qu'il va y avoir un changement des proportions. Les proportions de quartz, de feldspath de calcite et d'hématite déterminent les propriétés finales de la céramique (Jordan *et al.*, 2001).

I. Matériel et méthodes

I.1 Matériaux utilisés

Les sédiments étudiés ont été prélevés à l'aide d'une drague mécanique. Cette drague est fondamentalement une pelle mécanique montée sur un ponton au niveau du port de Bethioua. Ce port est consacré aujourd'hui exclusivement aux activités pétrolières. Le matériau dragué a été conservé dans des sachets étanches propres et transféré le jour même du dragage vers les laboratoires. Les matières premières utilisées pour la fabrication des briques sont constituées d'argile de Hassi ben okba et de sable. L'étude comporte un ensemble de propriétés physiques (paramètres d'état et de nature, distribution granulaire), de

propriétés chimiques (pH, conductivité, teneur en matière organique et en hydrocarbures), de propriétés minéralogiques (diffraction des rayons x), de propriétés thermiques (effet de la température) et de propriétés mécaniques (résistance à la compression).

I.2 Confection et conception des éprouvettes

Une méthode de confection et conception des éprouvettes a été effectuée, où plusieurs formulations avec différents taux de substitution d'argile par des sédiments ont été préparées. Ces formulations ont été comparées et évaluées à l'échelle industrielle (figure 1) (Boudjenane *et al.*, 2017). Les mélanges préparés et leurs compositions sont donnés dans le tableau 1 ainsi que leurs codes d'identification. Le mélange des barbotines à base des sédiments marins a été réalisé au moyen d'un malaxeur électrique, où les trois matériaux (argile+sable+sédiments marins) ont été mélangés à sec pour une quantité de 100 g de mélange pendant 15 minutes. Une quantité suffisante d'eau a été ajoutée de l'ordre de 14 % pour toutes les formulations. Cette teneur est ajoutée pour amener le mélange au même état plastique que la pâte de la brique de Hassi ben okba. Les éprouvettes de briques ont été préparées au moyen de triaxiale. Ce dernier a été utilisé pour avoir des éprouvettes de briques compactées avec une force de pression bien déterminée. Le matériau humide est introduit dans un moule cylindrique creux de dimension 2 cm de diamètre et 4 cm de hauteur. Ensuite on fait le compactage en appliquant une force de pression de 100 bars. Le matériau est compacté verticalement en partie haute et en partie basse au moyen de deux pistons cylindriques. Après confection, toutes les éprouvettes sont placées dans une enceinte de séchage (40°C). Les éprouvettes de briques ont été cuites à des températures comprises entre 600 et 900°C avec un pas de 100°C dans un four électrique à moufle avec une durée de cuisson de 24 heures.

Le programme de cuisson été de l'ordre où la température augmente pour atteindre une température de 900°C pendant 4 heures, un maintien de 24 heures avec cette température puis une descente de température jusqu'à la température ambiante avec une durée de 3 à 4 fois la montée (figure 2). Ensuite ces éprouvettes de briques produites ont été conservées et soumises à des essais de résistance à la compression au moyen d'une presse mécanique.

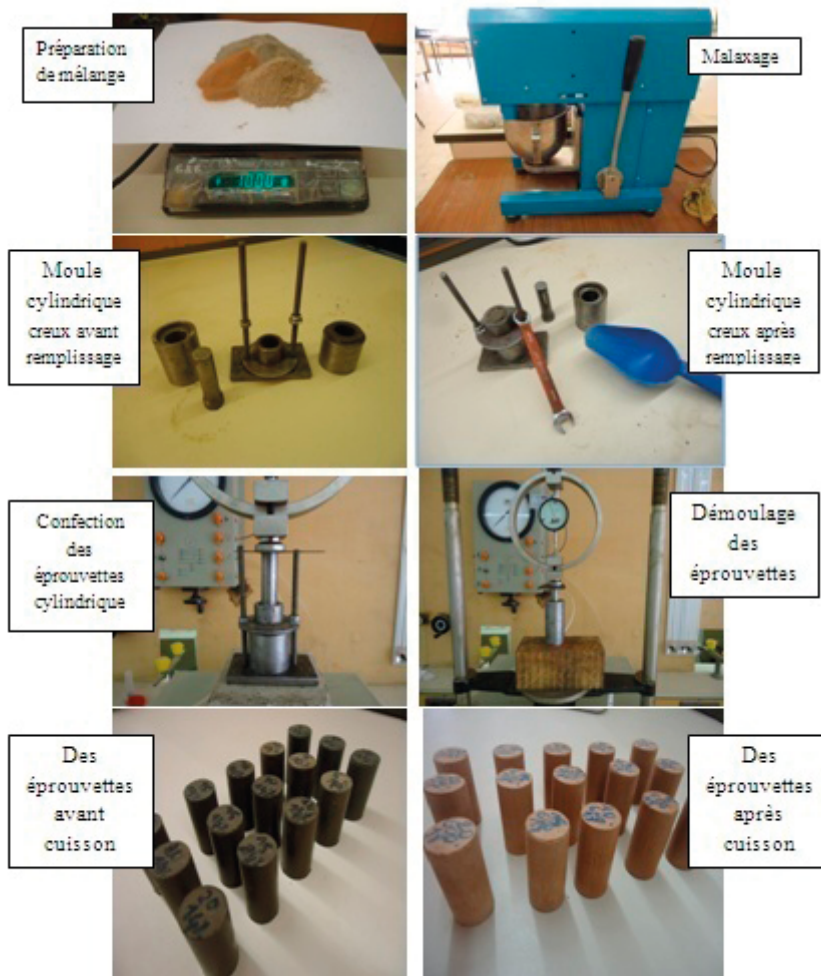


Figure 1. Préparation en laboratoire des éprouvettes de brique

Tableau 1. Formulations avec ajout de sédiments marins de 0 à 20 %

| | Sédiments marins % | Argile de brique % |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| Barbotine | 0 | 75 |
| Formulation 1 (F1) | 5 | 70 |
| Formulation 2 (F2) | 10 | 65 |
| Formulation 3 (F3) | 15 | 60 |
| Formulation 4 (F4) | 20 | 55 |

2. Résultats et discussion

2.1 Propriétés physiques

La masse volumique des grains solides (poids spécifique) a été déterminée selon la norme NF P94-054. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. L'analyse granulométrique a été effectuée par granulométrie laser (figure 3). Les courbes granulométriques des sédiments marins et de la barbotine de brique sont presque confondues. Ces courbes montrent la présence d'une fraction argileuse entre 18 et 36 %, une fraction silteuse entre 30 et 40 % et une fraction sableuse entre 27 et 50 %. Les diamètres des particules d_{10} et d_{95} sont respectivement 3 μm et 270 μm pour les sédiments marins et la

barbotine de brique. Les limites d'Atterberg ont été effectuées selon la norme NF P94-051, les résultats donnent une limite de liquidité $W_L = 30,2 \%$ et une limite de plasticité $W_p = 19,6 \%$ pour les sédiments marins. En revanche, pour l'argile de Hassi ben okba utilisée dans la fabrication des briques, ces limites sont respectivement de 50,1 % et 25,2 %. La classification sur l'abaque de Casagrande montre que les sédiments marins sont des limons peu plastiques et l'argile est considérée comme une argile peu plastique. L'indice de plasticité I_p de sédiments marins est 10,6 %, de l'argile est 24,9 % et de la barbotine de brique est 18,1 %. D'après ces résultats on remarque que ces sédiments peuvent être valorisés à condition de les mélanger avec l'argile pour garder la plasticité et par la suite une résistance comparable à la barbotine de brique.

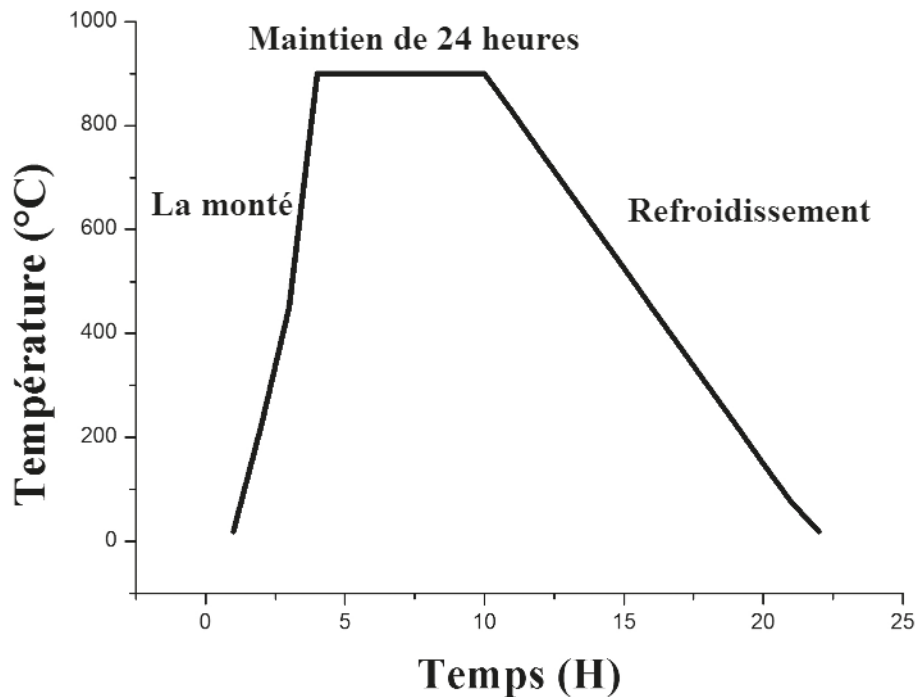


Figure 2. Courbe de cuisson, variation de la température en fonction du temps

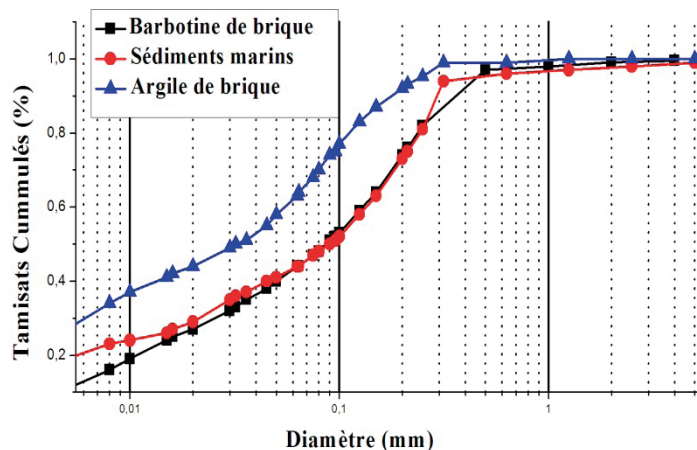


Figure 3. Courbes granulométriques des sédiments marins, de l'argile de brique de Hassi ben okba et de la barbotine de brique.

2.2 Propriétés chimiques

Le tableau 2 rassemble les propriétés chimiques telles que le pH, la conductivité et la matière organique. Le pH a été déterminé selon la norme NF X31-103, ces valeurs montrent que le pH des sédiments marins et de l'argile de brique est basique. La conductivité électrique a été mesurée avec une cellule conductimétrique étalonnée selon la norme NF ISO 11625, La mesure de la matière organique a été effectuée en utilisant la norme XP P94-047. La teneur en matière organique de l'argile de brique est assez élevée comparée à celle de la teneur en matière organique des sédiments du port de Bethioua. Cela a un effet bénéfique sur la valorisation car la matière organique a une influence notable sur les propriétés du produit fini. En effet, la forte teneur en

matière organique peut engendrer des microfissures au sein de la brique ce qui affaiblit ses propriétés mécaniques. Les éléments traces (métaux lourds et hydrocarbures) ont été déterminés par spectrométrie d'absorption atomique. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le (tableau 3) et montrent bien qu'il y a une présence infime des hydrocarbures et des métaux lourds dans les sédiments marins. Ces résultats permettent de conclure que les teneurs en métaux lourds des sédiments étudiés ne sont pas pollués et peuvent être valorisés dans la formulation de nouveaux matériaux en génie civil. Dans le cas où les résultats trouvés sont entre les niveaux de recommandation 1 et 2, une investigation complémentaire est nécessaire en fonction du projet considéré. Pour cela des tests sont pratiqués pour évaluer la toxicité globale des sédiments.

Pour avoir une idée plus précise sur la composition chimique des matériaux étudiés, on a fait des essais de fluorescence des rayons X. Les résultats sont regroupés dans le tableau 4. Cette analyse détaillée des résultats est basée sur la comparaison des teneurs pour différents oxydes. Les sédiments marins sont en majeure partie constitués de Calcium (Ca) et de Silice (Si). La prédominance du Calcium confirme la présence d'une fraction importante de carbonate de calcium. L'argile et la barbotine de brique sont en majeure partie constituées de Silice (Si) avec une teneur moyenne en Alumine (Al_2O_3). On remarque que les teneurs en Alumine sont plus élevées dans

l'argile que dans les sédiments marins. La teneur en cet oxyde peut être associée à la structure de la kaolinite présente dans le matériau (Mezencevova *et al.*, 2012). L'alumine permet d'améliorer la plasticité des mélanges. Pour conserver la plasticité il est nécessaire de mélanger ces sédiments marins avec l'argile. L'oxyde de fer (Fe_2O_3) est le principal colorant dans les argiles, il est responsable de la couleur rouge après cuisson. Les oxydes de chaux et de magnésie, provenant des carbonates de chaux et de magnésie, sont également considérés comme des éléments fluxants et tendent à se combiner aux silicates au cours de la cuisson (Taha, 2017).

Tableau 2. Paramètres physico-chimiques des matériaux étudiés

| Paramètres | Sédiments marins | Argile de brique |
|------------------------------|------------------|------------------|
| Masse volumique (g/cm^3) | 2,2 | 2,6 |
| Fraction < 63 μm (%) | 46 | 72 |
| Fraction > 63 μm (%) | 54 | 28 |
| W_p (%) | 19,6 | 25,2 |
| W_L (%) | 30,2 | 50,1 |
| VBS (%) | 1,56 | 5,3 |
| MO (%) | 1,88 | 3,66 |
| pH | 8,7 | 8,1 |
| Conductivité (ms) | 361 | 0,169 |

Tableau 3. Niveaux relatifs aux éléments traces (en mg/kg de matériaux étudiés sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm), GEODE (Metl et Mate, 2000)

| Métaux | Unités | Sédiments marins | Argile de brique | Niveau 1 | Niveau 2 |
|----------------------|--------|------------------|------------------|----------|----------|
| Plomb (Pb) | mg/kg | < 0,01 | <0,01 | 100 | 200 |
| Mercure (Hg) | mg/kg | < 0,01 | <0,01 | 0,4 | 0,8 |
| Chrome (Cr) | mg/kg | <0,005 | <0,005 | 90 | 180 |
| Cadmium (Cd) | mg/kg | < 0,01 | < 0,01 | 1,2 | 2,4 |
| Arsenic (As) | mg/kg | < 0,05 | < 0,05 | 25 | 50 |
| Etain | mg/kg | < 0,01 | < 0,01 | / | / |
| Nitrite | mg/kg | 0,00 | 0,00 | 37 | 74 |
| Phénol | mg/kg | 0,017 | 0,017 | / | / |
| Hydrocarbures totaux | mg/kg | 1,010 | 0,441 | / | / |

Tableau 4. Composition chimique en éléments majeurs dans les matériaux utilisés

| Eléments | Sédiments marins (% en masse) | Argile de brique (% en masse) | Barbotine de brique (% en masse) |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| La silice (SiO_2) | 27,9 | 48,4 | 61,0 |
| L'alumine (Al_2O_3) | 6,1 | 12,2 | 12,1 |
| L'oxyde de fer (Fe_2O_3) | 4,01 | 7,72 | 5,48 |
| La chaux (CaO) | 29,40 | 10,70 | 9,09 |
| La magnésite (MgO) | 2,71 | 2,50 | 1,76 |
| Le sulfate (SO_3) | 0,85 | 0,70 | 0,04 |
| Potassium (K_2O) | 0,70 | 2,03 | 1,13 |
| L'oxyde de sodium (Na_2O) | 0,34 | 0,55 | 0,46 |
| Le chlorure (Cl) | 0,02 | 0,05 | 0,13 |
| Le phosphore (P_2O_5) | 0,11 | 0,21 | 0,11 |
| L'oxyde de Titane (TiO_2^+) | 0,18 | 0,56 | 0,72 |
| Perte au feu (PAF) | 28,9 | 16,1 | 7,80 |

2.3 Propriétés minéralogiques

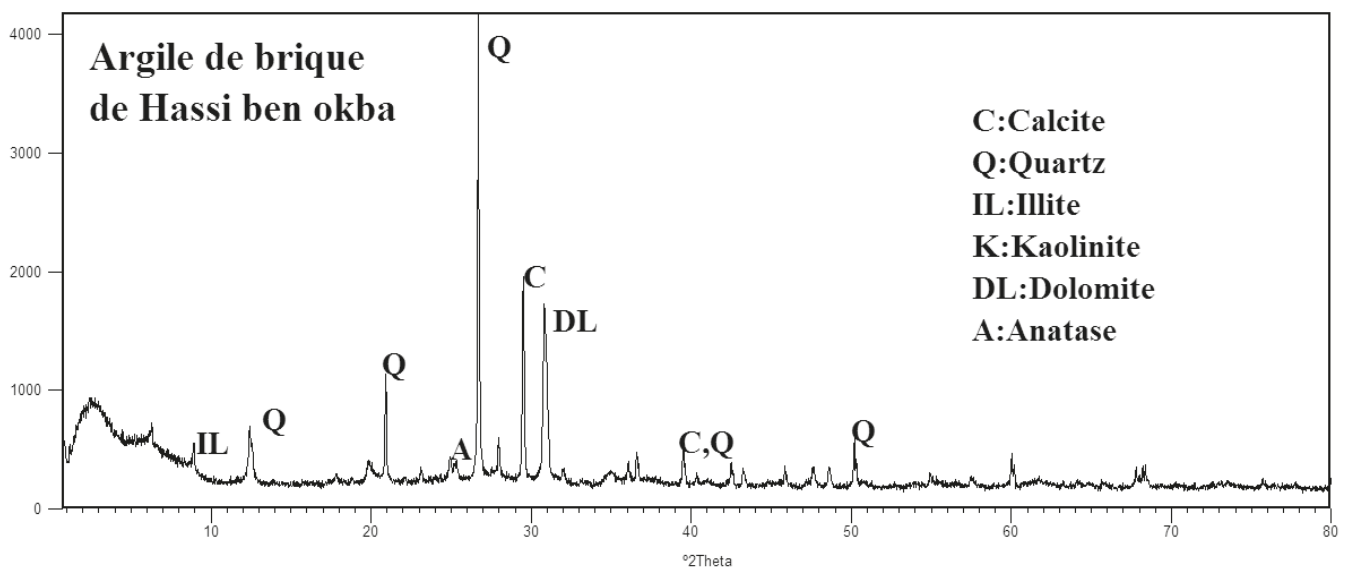
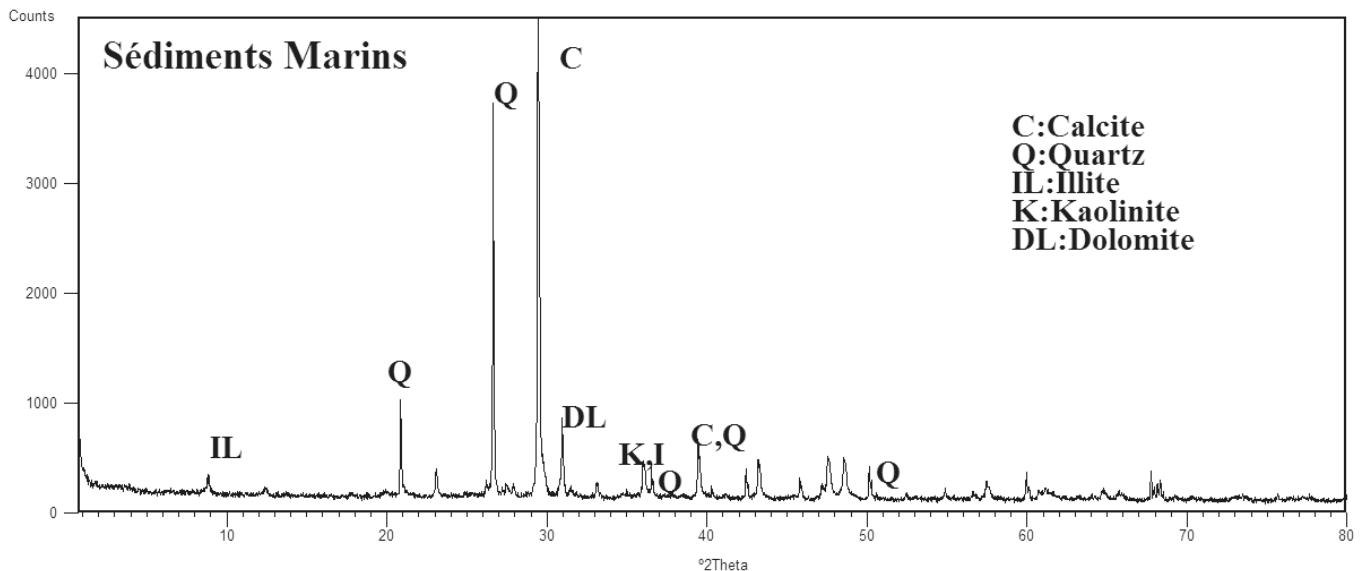
2.3.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La figure 4 présente l'identification minéralogique effectuée à partir de l'analyse qualitative par DRX à l'aide du diffractomètre Bruker D8. Ces essais ont été effectués sur une fraction broyée de l'ordre de 80 μm pour les sédiments marins, l'argile et la barbotine de brique de Hassi ben okba. Les résultats obtenus montrent une présence de quartz, de calcite et de dolomite comme principaux minéraux.

2.3.2 Analyse par spectroscopie infrarouge

La figure 5 présente l'identification minéralogique effectuée à partir de spectre infrarouge à l'aide d'un spectromètre IRTF BRUKER ALPHA avec module ATR Diamond. Cette

analyse a été effectuée pour les sédiments marins et l'argile de brique de Hassi ben okba. Le spectre IR des sédiments marins montre que le pic $1020,48\text{ cm}^{-1}$ est associé à une liaison Al-O qui se traduit par la présence des Alumines et le pic 1420 cm^{-1} est associé à une liaison C-O. $600,700$ et 800 cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation typiques des liaisons Al-O qui se traduit principalement par la faible présence de kaolinite. Le spectre IR de l'argile de brique montre que le pic $1000,79\text{ cm}^{-1}$ est associé à une liaison Al-O qui se traduit par la présence des Alumines et le pic $1428,60\text{ cm}^{-1}$ est associé à une liaison C-O. Entre 3088 et 3620 cm^{-1} vibration d'élongation des liaisons O-H est observé et l'apparition d'un pic à 3694 qui correspond à une bande des O-H libres. $600,700$ et 800 cm^{-1} c'est les vibrations d'élongation typiques des liaisons Al-O.



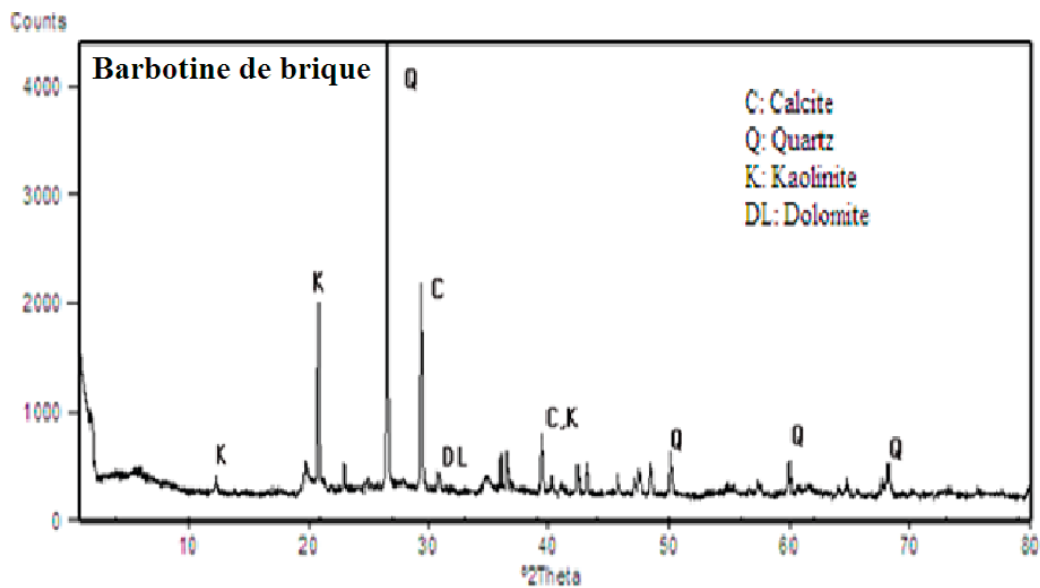


Figure 4. Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X des sédiments marins, de l’argile de brique de Hassi ben okba et de la barbotine de brique

Tableau 5. Résistance en compression en fonction de la température pour les barbotines sans et avec les sédiments marins pour une durée de cuisson de 24h

| Temps (h) | T (°C) | Résistance en compression (MPA) | | | | |
|-----------|--------|---------------------------------|------|------|------|------|
| | | Barbotine | F1 | F2 | F3 | F4 |
| 24 | 600 | 19,5 | 28,7 | 25,8 | 20 | 18 |
| | 700 | 24 | 26,2 | 22 | 18,4 | 15,9 |
| | 800 | 26,1 | 20,4 | 18,9 | 15,6 | 14,3 |
| | 900 | 28 | 16,9 | 15,4 | 12,4 | 11,8 |

2.4 Etude thermique et mécanique

Les éprouvettes de brique ont été cuites à des températures comprises entre 600 et 900°C avec un pas de 100°C. Ces éprouvettes ont été cuites dans un four avec une durée de cuisson de 24 heures. La résistance mécanique des briques de référence est augmentée avec l’augmentation de la température à 900°C en revanche la résistance mécanique des briques à base de sédiments marins est augmentée avec une plus faible température à 600°C (figure 6).

La substitution des sédiments marins à des concentrations de 5 % et 10 % augmente la résistance à la compression avec une faible température (600°C au lieu de 900°C) par rapport à la barbotine de brique (tableau 5). La charge maximale atteinte est de 28,7 MPA. Afin de donner des explications à l’augmentation de résistance pour un ajout de 5 % en sédiments, une étude supplémentaire a été effectuée. La composition chimique en éléments majeurs présente un pourcentage important en alumine et en sulfate pour un ajout de 5 % en sédiments marins. Les concentrations massiques en alumines et en sulfates suivent la même variation que la résistance à la compression, il est probable que ces paramètres ont un effet direct sur la résistance en compression. (Benyerou *et al.*, 2016).

2.5 Etude chimique des formulations

La caractérisation chimique a été déterminée par fluorescence des rayons x pour les quatre différentes formulations de brique à base de sédiments marins et pour la barbotine de référence afin de donner des explications à ce phénomène. Le tableau 6 présente la composition chimique en éléments majeurs. Les résultats expérimentaux montrent que pour la première formulation (F1) y a une saturation maximale de la monocouche. Cette saturation peut être due à une distribution des sites actifs d’adsorption sur la surface du matériau solide en se basant sur la composition chimique en éléments majeurs dans les mélanges de barbotine. La capacité d’adsorption représente la saturation maximale de la monocouche d’argile de brique en éléments majeurs dans les mélanges. Cette capacité d’adsorption est plus importante pour un ajout de 5 % de sédiments marins que pour les autres formulations. On remarque que la formulation I présente une teneur importante en éléments promoteurs de fusions (Na₂O, K₂O) qui présentent l’avantage d’améliorer les mécanismes de vitrification. Une présence d’alumine et de silice a été détectée aussi pour la barbotine de référence et celle avec des ajouts. Les sédiments marins sont en majeure partie constitués du Calcium (Ca) ce qui favorise l’augmentation de

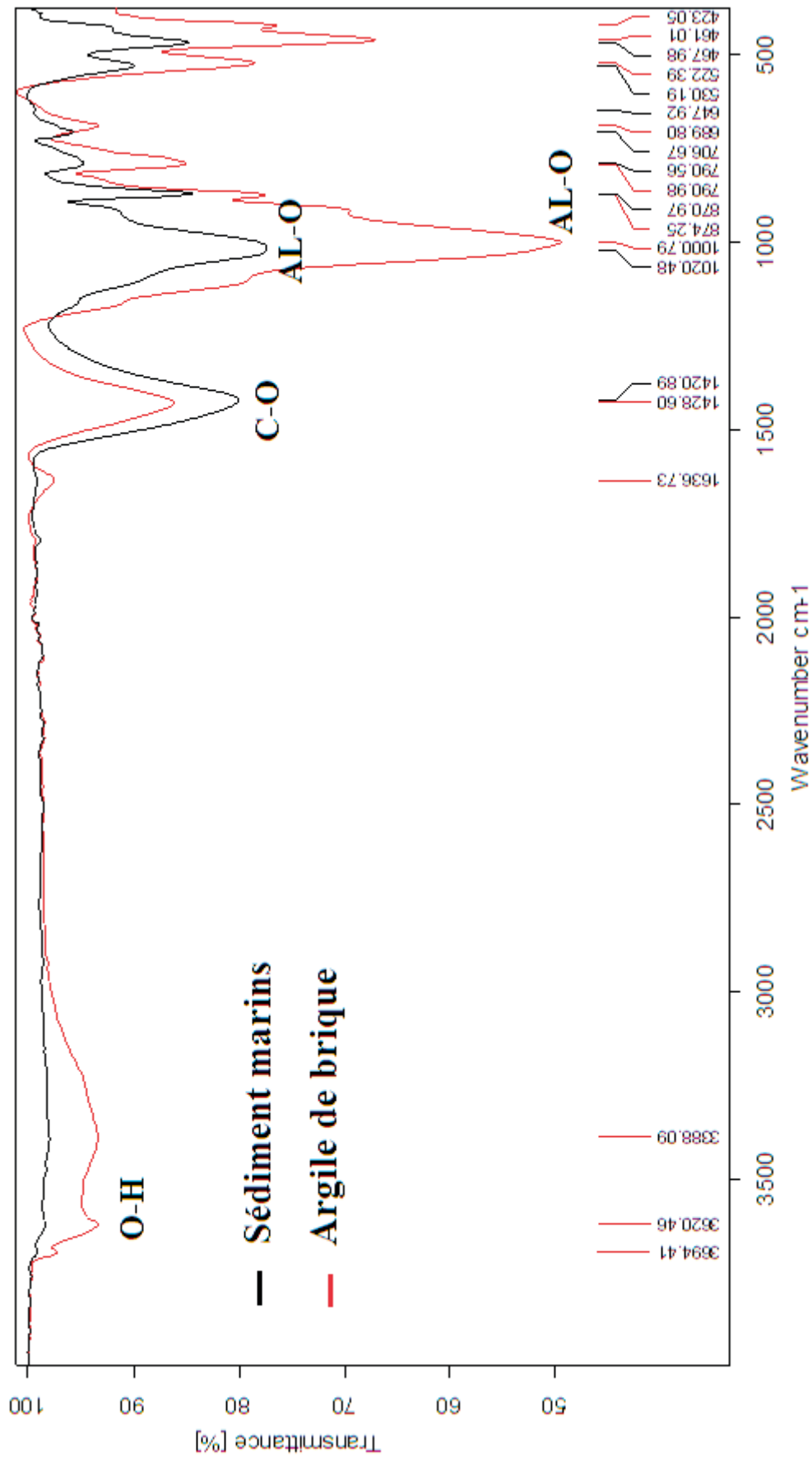


Figure 5. Spectres IR de sédiments marins et de l'argile de brique de Hassi ben okba

calcium en fonction de l'ajout en sédiment pour les quatre formulations. Les figures 7 et 8 présentent les pourcentages en alumine et en potassium en fonction des concentrations massiques des ajouts en sédiments marins. On remarque que les allures des alumines et des potassiums suivent presque la même variation que l'allure de résistance mécanique des briques à base des sédiments marins, il est probable que ces paramètres ont un effet direct sur la résistance. Les oxydes alcalins (Na_2O et K_2O) peuvent jouer également le rôle de fluxants et contribuent (résistance mécanique, porosité, etc.). Ils permettent aussi de baisser les températures de cuisson et d'améliorer la formation de la phase liquide qui contribue à l'amélioration des mécanismes de frittage et de densification des produits cuits. (Taha.Y., 2017).

2.6 Etude minéralogique des formulations

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur les propriétés du produit final comme la minéralogie de la matière première, la granulométrie, le façonnage, le séchage, la température et les conditions de cuisson. Une étude minéralogique des mélanges a été effectuée et comparée avant et après cuisson pour un traitement thermique de 600 et 900°C et pour une durée de cuisson de 24 heures. Les mélanges traités dans cette partie sont, la barbotine de brique (référence) ainsi que la formulation I (à 5 % de sédiment). Ces mélanges ont été analysés avant et après traitement thermique à 600 et 900°C. Les résultats sont présentés dans les figures (4, 9,

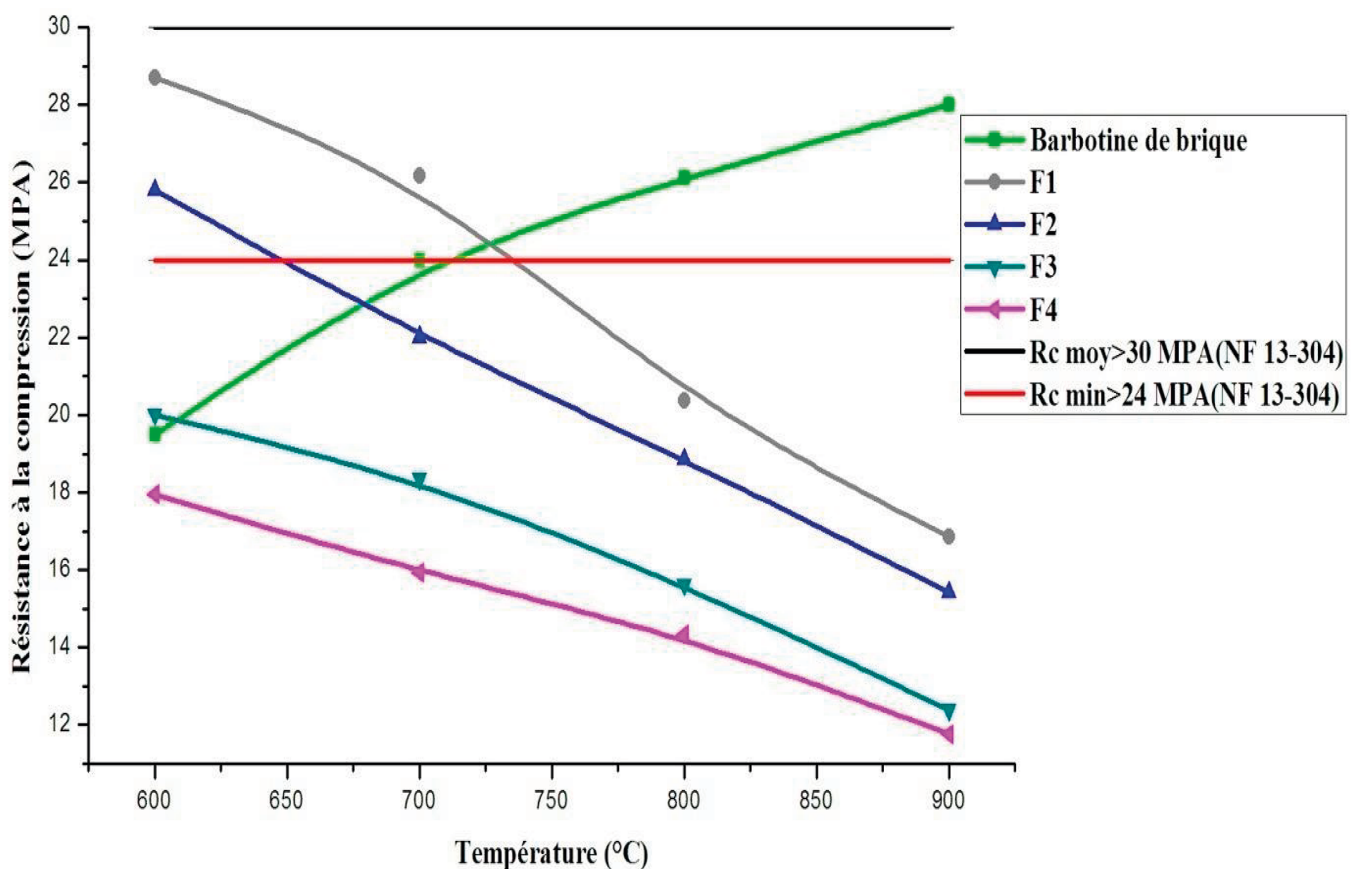


Figure 6. Résistance à la compression en fonction de la température pour les briques de référence et les briques à base des sédiments marins avec une durée de cuisson de 24

Tableau 6. Composition chimique en éléments majeurs dans les mélanges de barbotine

| Paramètres en % | Barbotine | F1 | F2 | F3 | F4 |
|-------------------------|-----------|------|------|------|------|
| SO_2 | 54,8 | 50,5 | 50,9 | 50,6 | 49,9 |
| Al_2O_3 | 12,7 | 12,9 | 12,2 | 11,7 | 10,9 |
| Fe_2O_3 | 5,41 | 5,36 | 5,12 | 5,17 | 5,03 |
| CaO | 9,86 | 11,8 | 12,9 | 13,2 | 14,4 |
| MgO | 2,45 | 2,46 | 2,41 | 2,37 | 2,29 |
| SO_3 | 0,57 | 0,77 | 0,59 | 0,62 | 0,60 |
| K_2O | 2,04 | 2,08 | 1,94 | 1,97 | 1,89 |
| Na_2O | 0,55 | 0,56 | 0,58 | 0,58 | 0,58 |

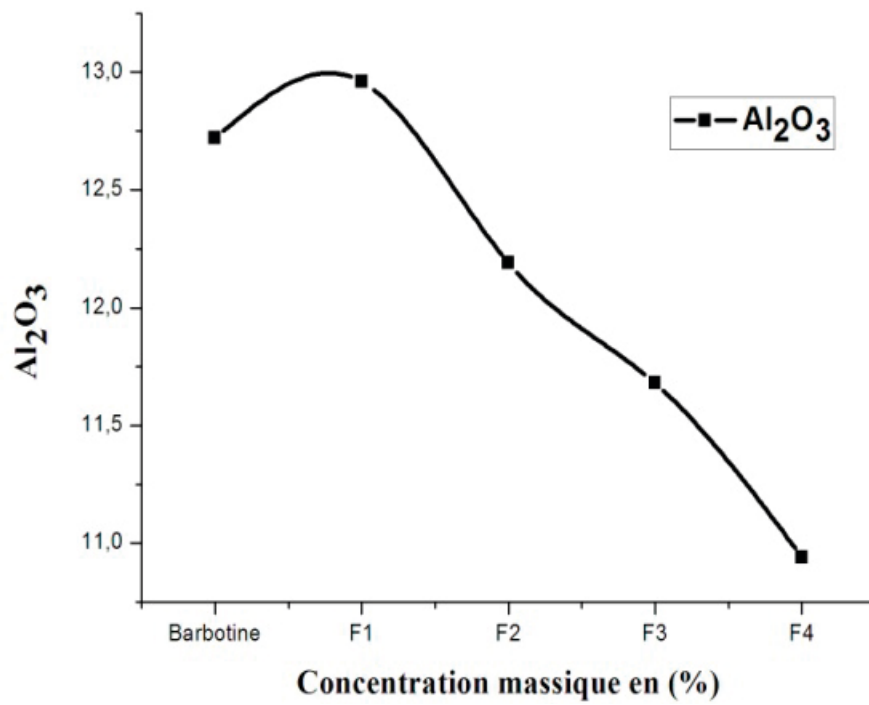


Figure 7. Evolution de d' Al_2O_3 en fonction de la concentration massique

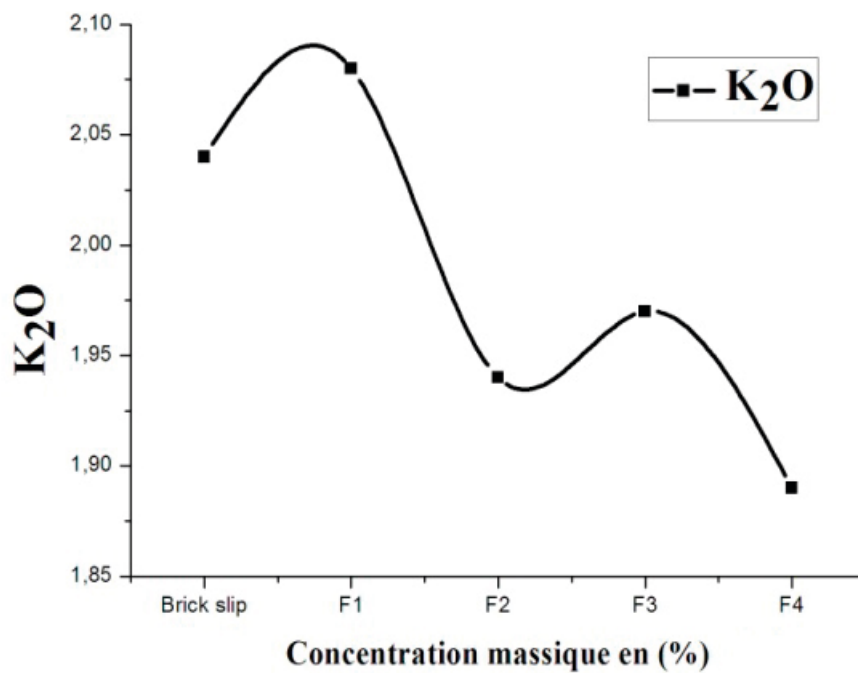


Figure 8. Evolution de K_2O en fonction de la concentration massique

10, 11, 12, 13). Le matériau a été écrasé puis tamisé sur un tamis de 80 μm d'ouverture. La nature des phases minérales se formant après la cuisson dépend essentiellement de la composition chimique, la minéralogie, la température de cuisson, la durée de cuisson et l'atmosphère de cuisson. Les analyses par diffraction des rayons X des différents mélanges après un traitement thermique montrent que le quartz (SiO_2) et les carbonates calcite CaCO_3 ont été légèrement diminués et restent comme principaux composants cristallins pour la formule de référence et la formulation I. Une absence de kaolinite et de dolomite a été observée pour les échantillons étudiés pour un traitement thermique de 600°C, puis à une température de 900°C la dolomite a été observée pour la barbotine de brique et la barbotine de brique à base de 5 % de sédiments marins. D'après (Manoharan *et al.*, 2011), la calcite et la dolomie limitent le développement et la densification ultérieure à haute température. Grâce à la position des pics de l'analyse minéralogique comparée entre la barbotine de brique pour un traitement thermique de 900°C et la barbotine de brique à base de 5 % de sédiments marins pour un traitement thermique de 600°C, une apparition presque identique des teneurs de quartz et de calcite a été observé. Ces deux diffractogrammes ont des valeurs d'intensité presque dans le même intervalle où ces pics sont influencés par l'ajout de 5 % de sédiment pour un traitement thermique de 600°C au lieu de 900°C. La présence de quartz empêche la fissuration, le rétrécissement et donne une forme uniforme aux briques.

Le traitement thermique de la barbotine de référence a induit normalement la déshydroxylation des minéraux argileux, la décomposition des minéraux carbonatés et la formation de phase fondue. Au cours du refroidissement, la phase fondue

formé au cours de la cuisson se durcit et forme la phase vitreuse. Cette dernière se comporte comme un liant où elle permet le remplissage des pores et donne une résistance mécanique importante à la brique.

Le traitement thermique de la formulation I à une température de 600°C, induit la formation d'une structure cristalline en raison de la forte teneur en calcite CaCO_3 et en dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. La cristallisation s'effectue en phase solide où elle forme une pellicule de micro cristaux qui apporte une grande résistance. D'après (Dunham, 1992), la température exacte de décomposition des carbonates n'est pas fixe. Elle change en fonction de plusieurs facteurs (la taille des grains du minéral, la vitesse de cuisson et le degré de facilité de dégagements de gaz). La présence importante des éléments alcalins (Na_2O et K_2O) pour la formulation I favorise aussi la formation de la phase vitreuse qui est responsable des propriétés finales de produits cuits. Le degré de vitrification dépend essentiellement de la température de cuisson finale et influence amplement les propriétés physiques et mécaniques de la brique d'argile.

Les phases communes trouvées dans cette formulation expliquent le phénomène de résistance en compression entre la formule de référence et la formulation I. Cette étude a été effectuée afin de caractériser les réactions produites et avoir des informations sur l'influence chimico-minéralogique entre les sédiments marins et la barbotine de brique. Il a été également observé que d'après la caractérisation minéralogique des mélanges, le phénomène de résistance en compression est justifié pour la formulation I qui donne une valeur de résistance en compression plus élevée par rapport à la barbotine de référence à une température de 600°C au lieu de 900°C.

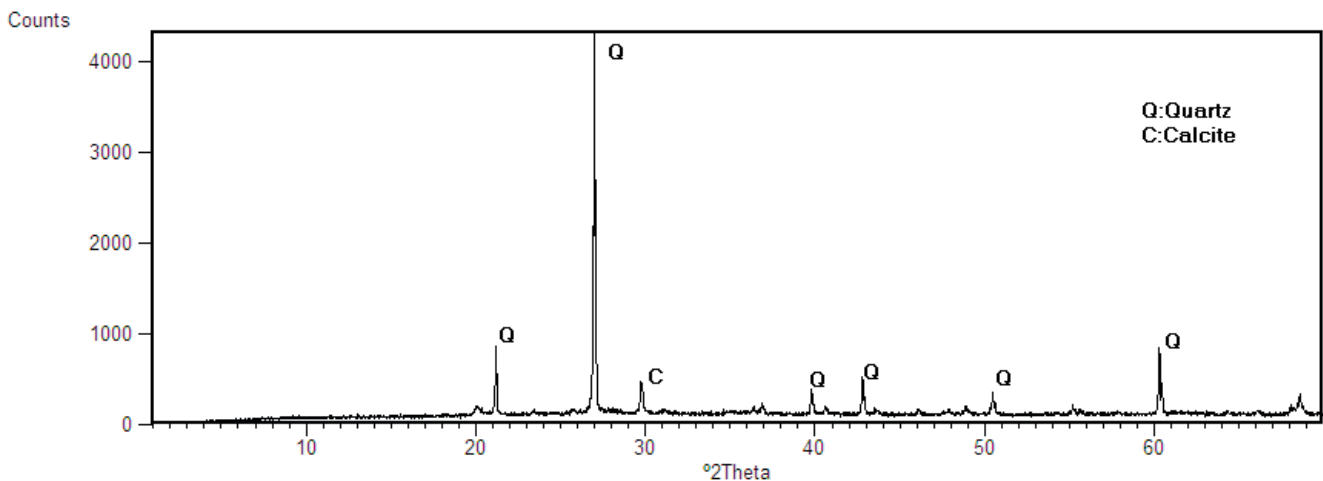


Figure 9. DRX de la Barbotine de brique à une température de 600°C avec une durée de cuisson de 24h

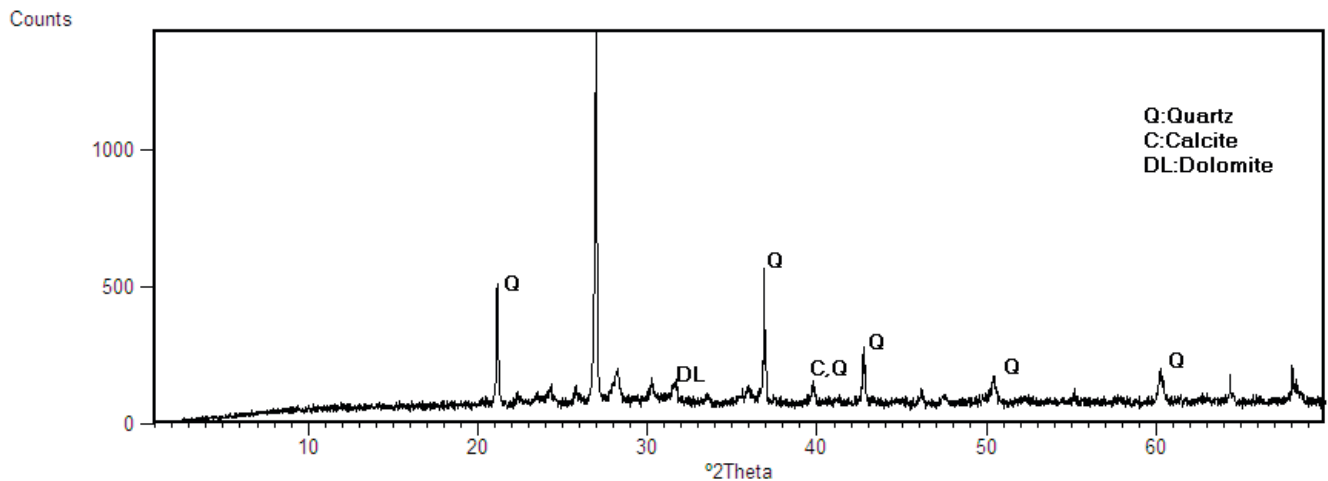


Figure 10. DRX de la Barbotine de brique à une température de 900°C avec une durée de cuisson de 24h

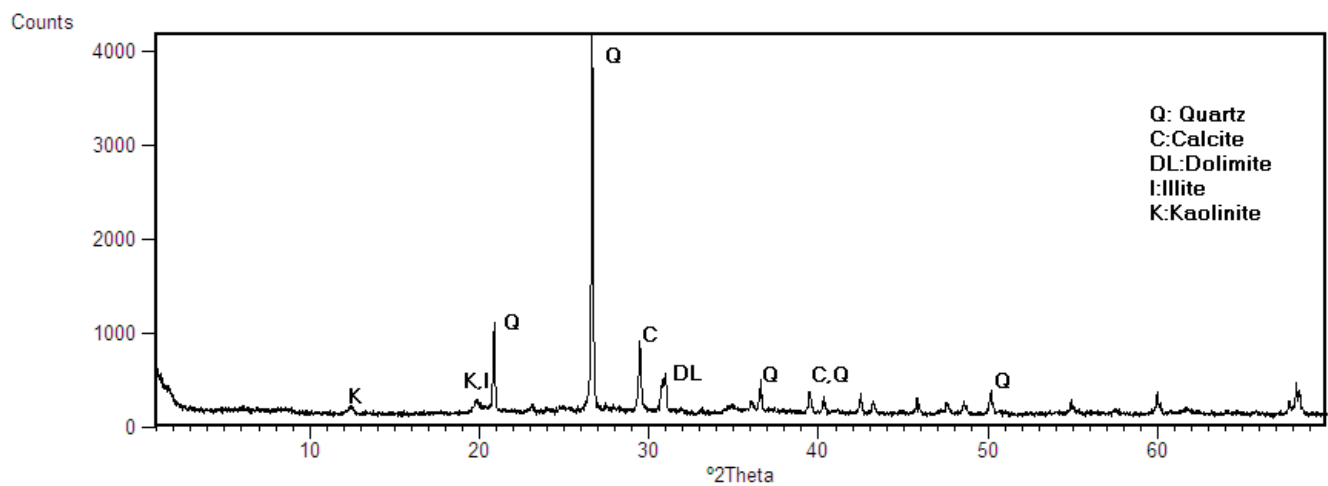


Figure 11. DRX de la Barbotine de brique à base de 5 % de sédiments marins avant cuisson

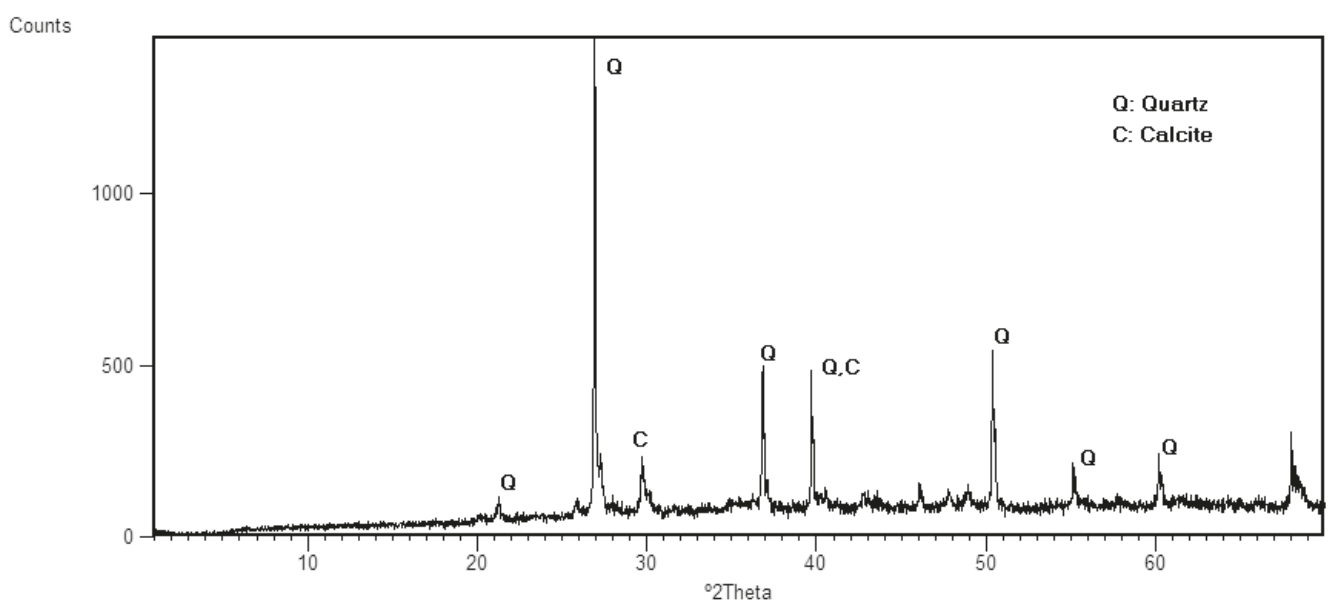


Figure 12. DRX de la Barbotine de brique à base de 5 % de sédiments marins à une température de 600°C avec une durée de cuisson de 24h

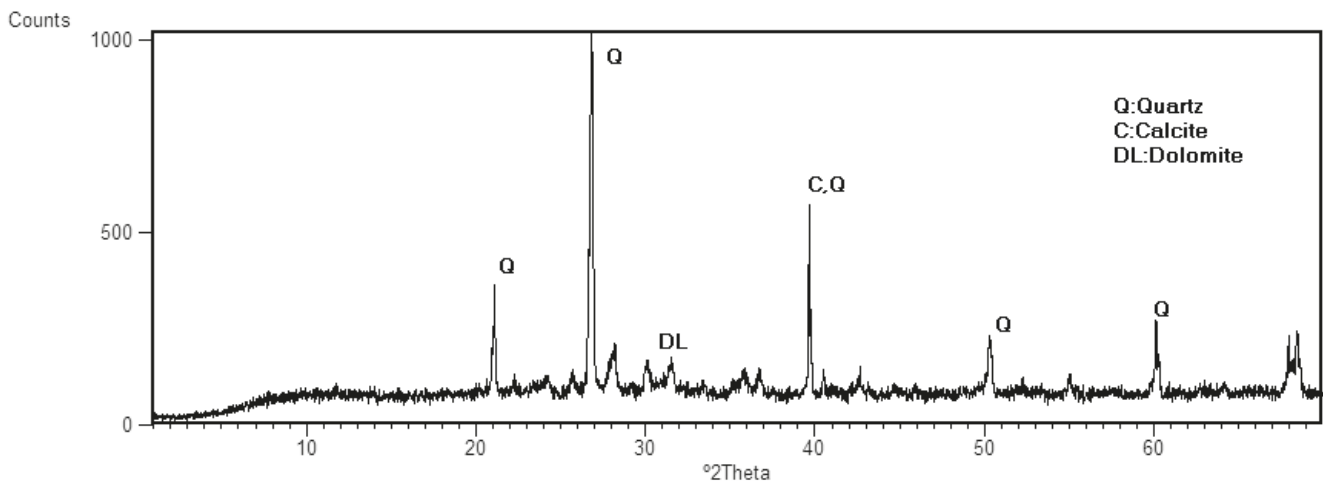


Figure 13. DRX de la Barbotine de brique à base de 5 % de sédiments marins à une température de 900°C avec une durée de cuisson de 24h

Conclusion

La caractérisation physique montre que les courbes granulométriques des sédiments marins du port de Bethioua et de la barbotine de brique sont presque identiques. L'étude chimique a permis de montrer que ces sédiments peuvent être valorisés dans ce domaine à condition de les mélanger avec l'argile de briques pour garder la plasticité. Une présence infime d'hydrocarbures et de métaux lourds a été constatée, ce qui ne présente aucun risque de pollution. La minéralogie montre une présence majoritaire de quartz et de calcite dans les sédiments marins, dans l'argile et dans la barbotine de brique de Hassi ben okba.

Les briques confectionnées à base de sédiment du port Bethioua à l'échelle du laboratoire présentent des performances mécaniques analogues aux briques de référence avec un taux de substitution de 5 % mais avec une faible température (600°C au lieu de 900°C), ceci a été confirmé de point de vue mécanique et minéralogique.

L'étude minéralogique effectuée sur les différentes formulations montre que le quartz et la calcite ont été légèrement diminués et restent comme principaux composants cristallins pour la barbotine de référence pour un traitement thermique de 900°C et la formulation I pour un traitement thermique de 600°C. La présence de quartz empêche la fissuration, le rétrécissement et donne une forme uniforme aux briques. La cristallisation s'effectue en phase solide pour la formulation I et favorise la formation d'une pellicule de micro cristaux qui apporte une grande résistance. La présence importante des éléments alcalins (Na_2O et K_2O) pour la formulation I favorise la formation de la phase vitreuse qui est responsable des propriétés finales de produits cuits. Les phases communes trouvées dans cette formulation expliquent le phénomène de résistance en compression

entre la formule de référence et la formulation I. Finalement, cette étude a été effectuée afin de caractériser les réactions produites et avoir des informations sur l'influence de la nature chimique et minéralogique des sédiments marins dans le cadre de leur valorisation dans la fabrication des briques. On peut conclure que les résultats obtenus de cette étude sont très encourageants et montrent qu'on peut valoriser les sédiments marins du port de Bethioua dans la fabrication des briques à l'échelle industrielle et avoir une résistance plus élevée avec une température de 600°C que celle de la brique de référence à 900°C (gain d'énergie en plus de la résistance).

Références bibliographiques

- Benamar A., Brasselet S., Pantet A. (2012). Caractérisation rhéologique des sédiments de dragage. XIIe journées nationales Génie côtier - Génie civil, Cherbourg, Ed. D. Levacher, M. Sanchez et S. Guillou, pp.985-992. https://www.paralia.fr/jngcgc/12_108_benamar.pdf
- Benyerou D. (2017). Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques. Thèse De Doctorat, Université des sciences et de technologie d'Oran, Algérie.
- Benyerou D., Boudjenane N., Blhadri M. (2016). Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques. *Journal of Material and Environmental Science*, 7(4), pp. 1317-1327. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N4/146-JMES-1760-Benyerou.pdf
- Boudjenane N., Benyerou D., Blhadri M. (2017). Design of the bricks based on the marine sediments of Bethioua port. In: Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khelifi N. (eds) *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*. EMCEI 2017. *Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_391

Dunham A.C. (1992). Developments in industrial mineralogy: I. The mineralogy of bricks making. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 49, pp. 95-104. <https://doi.org/10.1144/pygs.49.2.95>

Jordan M.M., Sanfeliu T., de la Fuente C. (2001). Firing transformations of tertiary clays used in the manufacturing of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 20 (1-2), pp. 87-95. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(00\)00044-2](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(00)00044-2)

Lafhaj Z., Samara M., Agostini F., Boucard L., Skoczylas F., Depelsenaire G. (2008). Polluted river sediments from the North region of France :Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks. *Construction and building materials*, 22(5), pp. 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.023>

Levacher D., Sanchez M., Duan Z., Liang Y. (2011). Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : étude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité. *Revue paralia*, 4, pp. 4.1-4.20. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2011.004>

Manoharan C., Sutharsan P., Dhanapandian S., Venkatachalapathy R., Mohamed Asanulla R., (2011). Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. *Applied Clay Science*, 54 (1), pp. 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.002>

Mezencevova, A., Yeboah, N.N., Burns, S.E., Kahn, L.F., & Kurtis, K.E. (2012). Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. *Journal of Environmental Management*, 113, pp. 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.030>

Pouv K.S., Besq A., Guillou S. (2012). Etude rhéométrique pour la mise au point de sédiments cohésifs modèles transparents pour une approche locale du comportement en érosion. *Revue Paralia*, 5, pp. 1.1-1.14. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.062-P>

Romero M., Andrés A., Alonso R., Viguri J., Rincón J.Ma. (2008). Sintering behaviour of ceramic bodies from contaminated marine sediments. *Ceramic international*, 34(8), pp. 1917-1924. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.07.002>

Samara M., Lafhaj Z., Chapiseau C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: factory scale experiment. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), pp. 701-710. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.153>

Taha Y. (2017). Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites : évaluations technique et environnementale Thèse De Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Yang X., Changhong Y., Baotian X., Xiaohong R., Zhi W. (2014). The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick. *Ceramics international*, 40(6), pp. 8833-8840. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.105>