

Matériaux de construction écologiques synthétisés à partir de la boue de filtration des eaux usées à savoir les cendres volantes et les mâchefers

Par **I. Dachraoui, A. Laamyem, M. Monkade**

Laboratoire de physique de la matière condensée. Équipe de physique de l'environnement, département de physique, Faculté des Sciences, UCD, El Jadida, Maroc



Abstract

ECOLOGICAL BUILDING MATERIALS SYNTHESIZED FROM SEWAGE FILTRATION SLUDGE NAMELY FLY ASH AND BOTTOM ASH

Aggregate blocks, also referred to as rubble blocks or breeze blocks, are concrete blocks that might be filled or empty and are made of gravel and water. Aggregate blocks are moulded concrete blocks, usually in the form of a sunken parallelepiped, and are the best construction material as far as value for money is concerned. They comprise 85% granulates (stones, gravel, sand) from local quarries, 9% cement (limestone and clay), and 6% water. Our work has involved making ecological aggregate through the insertion of a given percentage of filtration sludge made primarily of the solid waste of heat units, namely fly ash and bottom ash, that purifies the waste water through percolation filtration. Large-scale trials have taken place to check resistance to compression, demonstrating an impressive resistance – the compression rose from 3MPa for a normal aggregate unit to around 5MPa for a sludge-based one.

Agglos également nommés moellons ou parpaing : ce sont des blocs de béton, vides ou pleins, composés de gravier et d'eau. L'aggloméré est un bloc de béton moulé fréquemment en forme de parallélépipède creux. C'est le meilleur matériau de construction au niveau rapport qualité/prix. Il est composé de 85 % de granulats (pierres, graviers, sable) issus de carrières locales, de 9 % de ciment (calcaire et argile) et de 6 % d'eau. Dans notre travail nous avons réalisé des agglos écologiques par insertion d'un certain pourcentage de la boue de filtration constituée principalement des déchets solides des centrales thermiques à savoir les cendres volantes et les mâchefers servant à purifier les eaux usées par filtration percolation. Des expériences à grande échelle de la résistance à la compression ont été faites et ont montré que cette dernière est spectaculaire puisque la compression est passée de 3 MPa pour une agglomération normale à environ 5 MPa pour celle à base de boue.

INTRODUCTION

Les fabricants et les chercheurs continuent de développer des briques de bétons [1-5], durables fabriquées à partir de différents déchets pour économiser des ressources naturelles non renouvelables. La crise environnementale déterminée par une mauvaise élimination des déchets solides, et le manque d'argile sont les facteurs qui motivent plus d'études. Ces aspects poussent les acteurs à étudier de nouveaux matériaux et à établir des méthodes avancées pour une valorisation efficace des déchets solides. Les cendres constituent un sous-produit pulvérulent présentant un certain nombre de caractéristiques qui les rendent valorisables [6-12]. Une

voie possible de valorisation est leur utilisation en tant que matières premières secondaires dans le domaine de la construction et des travaux publics, domaine par ailleurs très grand consommateur de matériaux. Dans cette étude, deux sous-produits différents sous forme de boue de filtration des eaux usées, ont été utilisés pour obtenir des briques de bétons appelés agglos ou moellons à savoir les cendres volantes et les cendres de foyers qui sont des résidus de charbons issus des centrales thermiques, répondant aux exigences de propriétés des matériaux selon les normes internationales.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'organigramme utilisé dans le présent



AQUA TRAITEMENTS

30 ans!
1992-2022

Intervenir rapidement en milieu difficile

Depuis 30 ans, AQUA-TRAITEMENTS est le spécialiste dans la dépollution des eaux résiduaires, la déshydratation des boues aqueuses et le traitement de déchets par voie humide.



Traitement des eaux

Eaux industrielles et urbaines polluées.



Déshydratation des boues

Boues industrielles et urbaines.



Traitement de déchets

Traitement par voie humide.



Location de matériels de traitement des eaux

Spécialisée depuis 1992 dans **la Dépollution des eaux résiduaires, la Déshydratation des boues aqueuses et le Traitements de déchets par voie humide.**

travail est le suivant (figure 1) : les cendres volantes et les mâchefers qui sont des déchets solides récupérés de la combustion du charbon des centrales thermiques [13-17] ont été valorisés dans un premier temps dans la purification des eaux usées urbaines, industrielles et lixiviats des décharges publiques non contrôlées par la technique de filtration percolation. Une seconde revalorisation de ces cendres est leurs utilisations en tant que matières premières secondaires dans le domaine de la construction et des travaux publics, domaine par ailleurs très grand consommateur de matériaux. Dans notre étude la boue de filtration a été valorisée dans la fabrication des agglos ou parpaings

Caractéristique des cendres

Les cendres volantes et les mâchefers sont les plus courants parmi les déchets de charbon qui sont utilisés comme adsorbants, et dans cette étude, les deux cendres ont été extraites de la centrale thermique de Jorf lasfar « JLEC », située à 17 km de la ville d'El Jadida. Les cendres volantes (figure 2) sont produites par les précipitâtes dans les cheminées de la centrale électrique au charbon. Il apparaît dans une couleur grise avec des particules sphériques typiques. Les cendres volantes sont bien connues pour leurs propriétés pouzzolaniques et leur surface chargée négativement [19]. Cependant, les mâchefers (figure 2b) sont produits en étant retirés du lit du four, évacués vers le réservoir d'eau et pompés dans des lagunes étalées en attendant de se dessécher. Visiblement, il apparaît dans une couleur sombre, leurs particules sont assez poreuses et ressemblent à la lave volcanique. Pour améliorer la compréhension

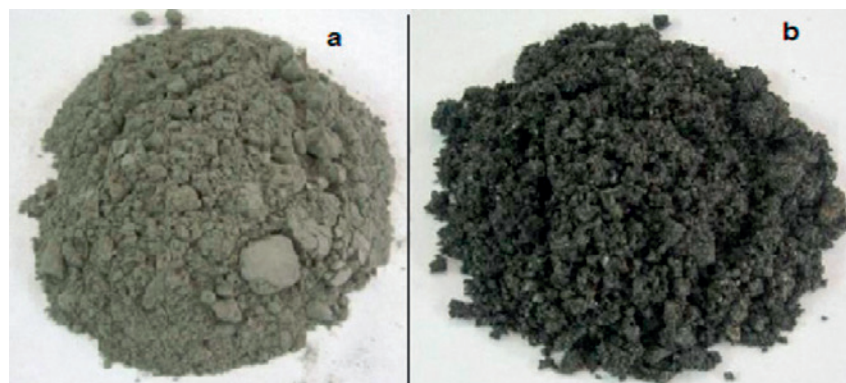


Figure 2: Aspect visuel des cendres volantes (a) et des mâchefers (b).

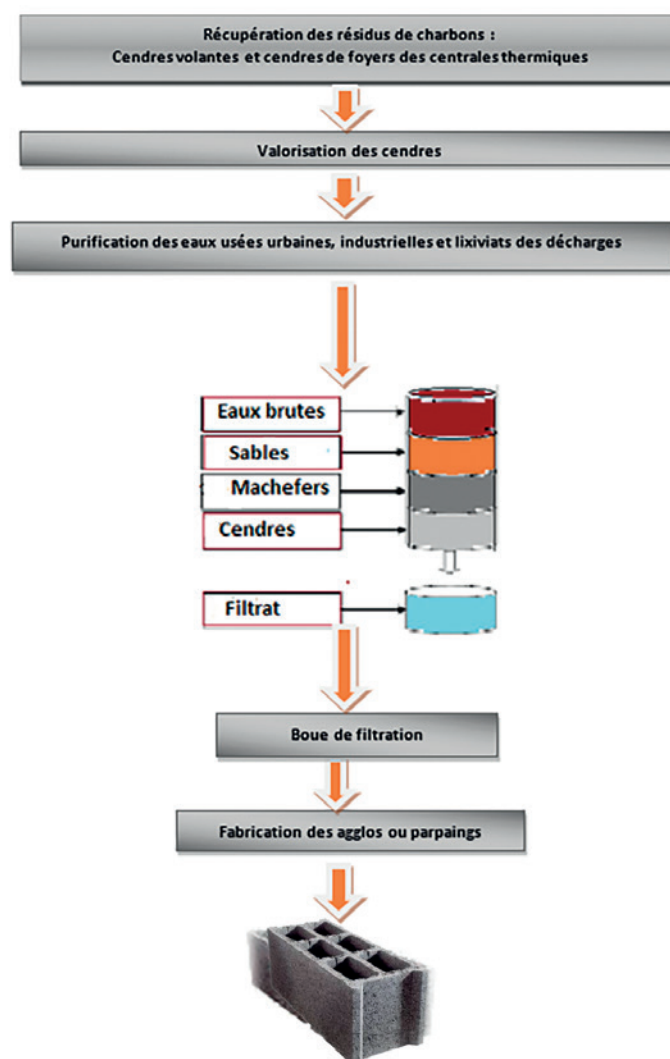


Figure 1: Valorisation de la boue de filtration.

du processus de filtration, les échantillons des deux cendres ont été soumis à la fluorescence X pour indiquer leur composition chimique, puis au tamisage granulométrique qui évalue la distribution granulométrique.

La composition chimique des cendres

volantes et des mâchefers analysés par fluorescence X est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1: Composition chimique des cendres volantes et des mâchefers

Pourcentage d'éléments chimiques	Cendres volantes	Mâchefers
SiO ₂	57,00	52,07
Al ₂ O ₃	34,00	8,86
Fe ₂ O ₃	3,40	8,86
CaO	10,00	1,92
MgO	0,02	1,09
K ₂ O	1,20	1,9
MnO	0,07	0,09
TiO ₂	1,24	0,98
P ₂ O ₅	1,27	0,98

DÉSHYDRATATION DE BOUES

Location d'unités mobiles

Depuis
1970

Réduisez les boues jusqu'à la sixième part et limitez le coût du transport et du traitement

- Unités mobiles complètes reposant sur des centrifugeuses décanteuses, débit hydraulique de 3 à 90 m³/h
- Transport et mise en service rapide
- Vidange de digesteurs et de lagunes
- Missions courtes ou longues durées
- Réparation de centrifugeuses



CENTRIBOET

DECANTER RENTAL SERVICE



www.centriboet.com

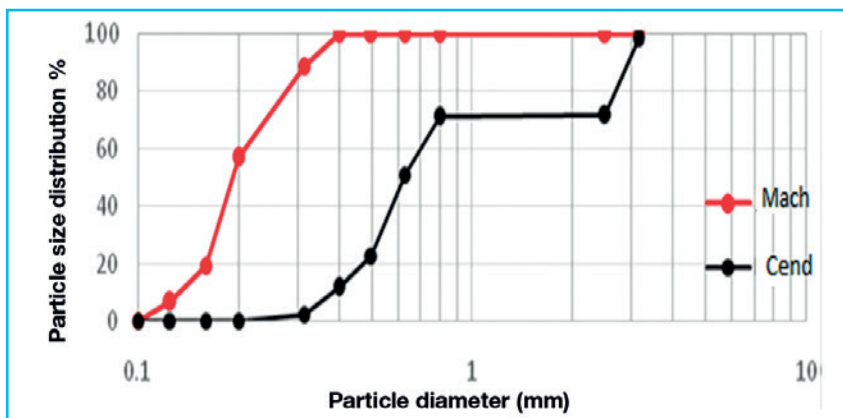
Ps. Sant Gervasi, 33

08022 Barcelone

Tél: +34 932 112 233

Fax: +34 934 186 342

contact: abb@andreuboet.com





ENVIRONMENT BY TECHNOLOGY

Solutions globales pour le traitement des effluents et des boues

- eaux usées
- boues d'eau potable
- effluents industriels



Aération de surface



Prétraitement



Curage



Traitement des boues



Traitement des effluents
industriels



Convoyage



Conditionnement



Expertise labo des boues
et des effluents



Unité de traitement des eaux usées urbaines et industrielles
FILTRE TERTIAIRE



Unité de traitement d'effluents industriels
FLOTTATEUR A AIR DISSOUS



Unité de déshydratation de boues en abri modulaire
PRESSE A VIS

la sollicitation disparaît, il subsiste une déformation résiduelle), et enfin rupture (la sollicitation dépasse la résistance intrinsèque du matériau).

Le principe consiste à centrer l'éprouvette sur le plateau de la presse, puis appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à la rupture de produits. Enregistrer la charge maximale obtenue en (KN).

La résistance à la compression est le paramètre le plus important lors de la caractérisation des produits en bétons. Selon la norme marocaine NM.10.1.009, les agglos sont caractérisées par une forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 3 MPa à 28 jours.

Les résultats de la résistance à la compression très détaillée de 7 jours, 14 jours et 28 jours pour les Formules (A0, A2, A4, A6) sont les suivants où :

- A0: Agglo avec 0 % de boue filtrante (Tableau 3a),
- A2: Agglo avec 2 % de boue filtrante (Tableau 3b),
- A4: Agglo avec 4 % de boue filtrante (Tableau 3c),
- A6: Agglo avec 6 % de boue filtrante (Tableau 3d).

Nous constatons que les résultats des essais sont conformes aux exigences de la norme NM 10.1.009. Pour mieux comprendre les figures 3, l'histogramme ci-dessous (figure 4), montre clairement les évolutions de la résistance à la compression des différents types d'agglos.



Figure 5 : Résistances à la compression des agglos pendant 7,14 et 28 jours.

Nous remarquons que les agglos avec dosage de 2 % et 4 % présentent une meilleure résistance à la compression que les agglos de références normales A0, néanmoins celui de 4 % reste le meilleur.

Tableau 3a: Résistance à la compression pour les agglos A0 (0% de boue filtrante)

Eprouvette N°	1	2	3	4	5	6
Résistance en MPa (à 7 jrs)	3,2	3.3	3.1	3,4	3.2	3,5
Résistance en MPa (à 14 jrs)	4,4	4,5	4,6	4,3	4,1	4,5
Résistance en MPa (à 28 jrs)	5,2	5.3	5.1	5,4	5.2	5,5

Tableau 3b: Résistance à la compression pour les agglos A2 (2 % de boue filtrante)

Eprouvette N°	1	2	3	4	5	6
Résistance en MPa (à 7 jrs)	3,8	3.6	3.4	3,5	3.6	3,4
Résistance en MPa (à 14 jrs)	5	4,9	4,6	4,7	4,6	4,5
Résistance en MPa (à 28 jrs)	4,9	5.2	5.5	5,6	5.5	5,3

Tableau 3c: Résistance à la compression pour les agglos A4 (4% de boue filtrante)

Eprouvette N°	1	2	3	4	5	6
Résistance en MPa (à 7 jrs)	3,9	3.8	3.7	3,4	3.6	3,7
Résistance en MPa (à 14 jrs)	4,9	4,8	4,7	4,6	4,8	4,9
Résistance en MPa (à 28 jrs)	5,8	5.7	5.7	5,8	5.8	5,7

Tableau 3d: Résistance à la compression pour les agglos A6 (6% de boue filtrante)

Eprouvette N°	1	2	3	4	5	6
Résistance en MPa (à 7 jrs)	3,1	3.5	3.2	3,5	3.3	3,3
Résistance en MPa (à 14 jrs)	4,5	4,5	4,4	4,3	4,5	4,3
Résistance en MPa (à 28 jrs)	5,2	5.6	5.5	5,2	5.4	5,5

Étude de la résistance thermique

La résistance thermique mesure la capacité d'isolation d'une couche de matériau : plus la couche sera isolante, plus la résistance thermique sera élevée. Pour les agglos le calcul de la résistance thermique est plus compliqué, puisque les agglos subissent trois modes de transfert thermique à savoir la conduction, le rayonnement et la convection. Le logiciel que nous avons utilisé donne, en plus du calcul de la résistance thermique, la valeur de sa déperdition thermique appelée aussi coefficient de transmission thermique. Plus celui-ci est faible, plus la paroi est isolante. La résistance thermique est le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique du matériau lambda et donnée par la formule :

$$R = e / \lambda$$

Nous considérons le cas simple d'un mur constitué de couches successives et homogènes (les couches dont l'épaisseur est inférieure à 1 mm ne sont pas prises en compte).

La résistance thermique est alors est égale à la somme des résistances thermiques des différentes couches de matériaux ou d'espace d'air non ventilé

et des résistances de surface.

Le calculateur prend en compte les résistances de surface des parois intérieures et extérieures. Les valeurs de la résistance thermique d'échange d'une surface intérieure et d'une surface extérieure sont en général estimées à 0,13 m²K/W pour l'intérieure et 0,04 m²K/W pour l'extérieure et cela pour une paroi verticale. Ce sont les valeurs choisies pour le calculateur.

Le Calcul de la résistance des parois des agglos composées de 5 couches maximum est donné par :

- Couche1 d'épaisseur $e_1 = 2$ cm, en parpaing de ciment avec $\lambda = 0.952$
- Couche 2 d'épaisseur $e_2 = 7$ cm en air ventilé avec $\lambda = 0.500$
- Couche 3 d'épaisseur $e_3 = 2$ cm, en parpaing de ciment avec $\lambda = 0.952$
- Couche 2 d'épaisseur $e_2 = 7$ cm, en air ventilé avec $\lambda = 0.500$
- Couche 5 d'épaisseur $e_5 = 2$ cm, en parpaing de ciment avec $\lambda = 0.952$

La résistance thermique totale R est égale à : 0,51 m².KW⁻¹.

La déperdition thermique U est égale à : 1.9608 W.m⁻²K⁻¹.

En négligeant les ponts thermiques, la

Tableau 4 : valeurs moyennes des taux de présences des métaux lourds

Métaux lourds (mg/l)	Agglos A2	Agglos A4	Agglos A6	Eau potable
Cd	0,007	0,005	0,008	0,006
Cr	0.02	0.03	0.02	0.010
Cu	0.006	0.007	0.007	0.008
Fe	0.020	0.010	0.020	0.015
Pb	0.037	0,05	0.040	0,049
Zn	0.07	0,05	0.05	0.09

déperdition de la paroi est de 1.9608 W par m² et par degré de différence entre l'extérieure et l'intérieure. Le calcul prend en compte les couches d'air qui se forment des 2 côtés de la paroi. La conductivité thermique sera d'autant plus faible que le matériau est un bon isolant. Pour l'isolation, il faut donc choisir des matériaux dont les conductivités thermiques sont très faibles. Un matériau est considéré comme isolant (RT 2012) lorsque sa conductivité thermique est inférieure à : 0,065 W.m⁻¹.K⁻¹. Finalement, nous avons étudié la lixiviation de nos agglos, afin de s'assurer que les métaux lourds dans la boue de filtration sont restés confinés dans nos agglos écologiques. La méthode consiste à mettre notre agglomérat dans un bain d'eau (figure 5), pendant 1 à 2 mois et effectuer des prélèvements réguliers. Les résultats

des analyses obtenus par ICP sont donnés dans le tableau 4.

Lixiviation des agglos.

Nous avons constaté que les éléments toxiques sont restés totalement piégés dans les agglos. Un brevet international en collaboration avec l'université internationale de rabat a été déposé.

CONCLUSION

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs :

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts.
- Réduire la chaleur d'hydratation.
- Améliorer la maniabilité du béton.
- Améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme.

- Améliorer la durabilité.

En raison de leur sphéricité et de leur très petite dimension, les cendres volantes influent sur la rhéologie des pâtes de ciment. L'ajout de cendres réduit le besoin en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité équivalente pour un ciment sans cendres volantes : les cendres peuvent donc jouer un rôle de plastifiant. Les cendres volantes retardent la prise du ciment, ce qui peut être un avantage par temps chaud. Leur ajout peut donc nécessiter l'emploi d'un accélérateur.

L'hydratation de la pâte de ciment s'accompagne d'une élévation de la température. Retardant et ralentissant l'hydratation du ciment, les cendres volantes ont une influence bénéfique sur l'évolution de la chaleur d'hydratation permettant ainsi d'éviter la fissuration par retrait thermique des ouvrages massifs. Du fait de leur activité pouzzolanique consommant la portlandite, les cendres augmentent les résistances mécaniques à long terme des bétons, améliorant de fait leurs résistances aux attaques chimiques et donc leur durabilité ce qui est largement justifié par les résultats obtenus dans cette étude. ●



Bibliographie

- [1] L. LITU, G. CIOBANU, SM CÎMPEANU, O. KOTOVÁ, R. CIOCINTA, D. BUCUR, M. HARJA. Etude comparative entre les procédés de floculation-coagulation dans le traitement des eaux brutes/eaux usées, *Agro Life Sci. J.*, 8 (1) (2019), p. 139-145.
- [2] C. BARRERA-DÍAZ, G. MARTÍNEZ-BARRERA, O. GENCEL, LA BERNAL-MARTÍNEZ, W. BROSTOW. Boues d'épuration traitées pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons. *J. Hazard Mater*, 192 (1) (2011), p. 108-115.
- [3] LGG DE GODOY, AB ROHDEN, MR GARCEZ, S. DA DALT, LB GOMES. Production de matériau cimentaire complémentaire comme stratégie de gestion durable des déchets de boues de traitement des eaux.
- [4] AM HIDALGO, MD MURCIE, M. GOMEZ, E. GOMEZ, C. GARCIA-IZQUIERDO, C. SOLANO. Utilisations possibles des boues des stations d'épuration d'eau potable. *J. Environ. Ing.*, 143 (2017).
- [5] Y. LIU, Y. ZHUGE, CW CHOW, A. KEEGAN, D. LI, PN PHAM, R. SIDDIQUE. Utilisation des boues de traitement d'eau potable dans les pavés en béton : analyse microstructurale, durabilité et propriétés de lixiviation. *J. Environ. Gérer.*, 262 (2020).
- [6] A. GHERGHEL, C. TEODOSIU, S. DE GISI. Un point sur la valorisation des boues d'épuration et ses enjeux dans le cadre de l'économie circulaire. *J. Propre. Prod.*, 228 (2019), p. 244-263.
- [7] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/>

WATER_STATISTICS#WASTEWATER_TREATMENT_AND_DISPOSAL

- [8] G. BUEMA, G. LISA, O. KOTOVA, G. CIOBANU, L. IVANICIUC, L. FAVIER, M. HARJA. Conditions optimales établies sur la base de l'analyse thermique pour les matériaux zéolithiques obtenus à partir de cendres volantes. *Env. Ing. Gérer. J.*, 20 (3) (2021), p. 317-328.
- [9] I. CRETESCU, M. HARJA, C. TEODOSIU, DN ISOPESCU, MF CHOK, BM SLUSER, MAM SALLEH. Synthèse et caractérisation d'un liant de remplacement du ciment basé sur l'activation alcaline des déchets de cendres volantes. *Processus Saf. Environ.* 119 (2018), p 23-35.
- [10] M. HARJA, G. CIOBANU. Nano-adsorbants écologiques pour l'élimination des polluants des eaux usées. O. Kharisova, L. Martínez, B. Kharisov (Eds.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, Springer, Cham (2020), pp. 1-22.
- [11] AHN ORUZMAN, N. PALIL, R. AHMAD, KS BAHARUDIN. Application des boues de traitement des déchets provenant du traitement de l'eau dans la production de briques. *Int. J. Technol. Innov. Humanité.*, 1 (2020), p. 33-40.
- [12] G. PRZYDATEK, AK WOTA. Analyse de la gestion globale des boues d'épuration en Pologne. *J. Mater. Cycles de gestion des déchets.*, 22 (2020), p. 80-88.
- [13] A. AL-FAKIH, BS MOHAMMED, MS LIEW, E. NIKBAKHT. Incorporation des déchets dans la fabrication des briques de maçonnerie : un bilan actualisé. *J. Construire. Ing.*, 21 (2019), pp. 37-54.

[14] LV CREMADES, JA CUSIDÓ,

F. ARTEAGA. Recyclage des boues issues du traitement de l'eau potable en tant que matériau céramique pour la fabrication de carreaux. *J. Propre. Prod.*, 201 (2018), pp. 1071-1080.

[15] Y. DING, X. ZHANG, B. WU, B. LIU, S. ZHANG. Production de céramiques hautement poreuses à l'aide de scories provenant de la fusion de catalyseurs automobiles usés. *Resour. Conserv. Recycler.*, 166 (2021).

[16] MS MANSOUR, HI ABDEL-SHAFFY, WI EL AZAB. Réutilisation innovante des boues d'eau potable pour le traitement de l'eau produite par le pétrole afin d'améliorer la récupération du pétrole, Égypte. *J. Essence.*, 29 (2020), p. 163-169.

[17] W. DUAN, Y. ZHUGE, PN PHAM, C. WK CHOW, A. KEEGAN, Y. LIU. Utilisation des boues de traitement de l'eau potable en remplacement du ciment pour atténuer la réaction alcali-silice dans les composites de ciment. *J. Informatique. Sci.*, 4 (4) (2020), p. 171.

[18] Y. LIU, Y. ZHUGE, CW CHOW, A. KEEGAN, PN PHAM, D. LI, L. WANG. Recyclage des boues de traitement d'eau potable en blocs d'éco-béton avec cure au CO₂ : durabilité et lixiviation. *Sci. Environ.*, 746 (2020).

[19] R. MOURATIB, B. ACHIOU, M. EL KRATI, SA YOUNSSI, S. TAHIRI. Membrane céramique à faible coût fabriquée à partir de boues de traitement d'eau riches en alumine et en silice et son application à la filtration des eaux usées. *J. Eur. Céram. Soc.*, 40 (2020), pp. 5942-5950.