

Résistance mécanique et présence du radon dans les briques à base de boue de filtration des lixiviats des déchets ménagers et industriels

Younes Aznag, Zouhair El Jouad, Khaled Mnaouer

Laboratoire de physique de la matière condensée.

Équipe de physique de l'environnement, département de physique

Faculté des Sciences, UCD, El Jadida, Maroc

Abstract

MECHANICAL RESISTANCE AND PRESENCE OF RADON IN BRICKS BASED ON SLUDGE FILTRATION OF HOUSEHOLD AND INDUSTRIAL WASTE

Sludge, originating from the filtration of leachates from household and industrial waste, by filtration-percolation through sand, clay soil and fly ash can contain toxic elements. In a previous work, we studied the valorization of this filtration sludge in the field of civil engineering by making bricks by substituting part of the conventional constituents necessary in the manufacture of bricks, with sewage sludge. Several bricks were manufactured by incorporating various rates of sludge in dry weight, as well as a reference brick which includes only conventional raw materials. To evaluate their suitability as engineering construction materials, the bricks were

La boue provenant de la filtration des lixiviats des déchets ménagers et industriels, par filtration-percolation à travers le sable, le sol argileux et les cendres volantes peut contenir des éléments toxiques. Dans un précédent travail, nous avons étudié la valorisation de ces boues de filtration dans le domaine de génie civil en réalisant des briques en substituant une partie des constituants conventionnels nécessaires dans la fabrication des briques par la boue d'épuration. Plusieurs briques ont été fabriquées en incorporant des taux variés de boue en poids sec, ainsi qu'une brique de référence, qui comprend uniquement les matières premières conventionnelles. Afin d'évaluer leur aptitude en tant que matériaux de construction d'ingénierie, les briques ont été soumises à une série d'essais comme la résistance mécanique et les propriétés radiologiques. Les résistances mécaniques se sont avérées très intéressantes. L'évaluation radiologique des briques de boue permet de garantir leur sécurité puisqu'elles sont largement inférieures aux limites requises (moins de 10 mSv/an).

Les cendres volantes sont un produit de combustion du charbon. Elles font partie d'un ensemble de produits qui constituent les déchets les plus abondants dans le monde. S'ils ne sont pas récupérés, ces déchets sont évacués avec les gaz de combustion d'une centrale électrique alimentée au charbon. Les cendres volantes existent après la combustion parce que les cendres adhèrent au charbon, représentant entre 1 à 15% de son poids. Environ 90% des cendres sont des cendres volantes, tandis que 10% sont des cendres résiduelles. Les cendres volantes sont composées de minuscules particules en suspension dans

l'air et sont donc considérées comme un type de matière particulaire ou de pollution particulaire. Les cendres volantes peuvent avoir une composition chimique différente selon l'endroit où le charbon a été exploité. De manière générale, les cendres volantes sont des polluants qui peuvent contenir des matières acides, toxiques et/ou radioactives (plomb, arsenic, mercure, cadmium et uranium). Une exposition importante aux cendres volantes et aux autres composants des cendres de charbon augmente le risque de développer un cancer et d'autres maladies respiratoires. Les bassins de cendres humides peuvent polluer les eaux souterraines et,

SANS USURE, SANS ÉNERGIE, SANS ENTRETIEN

Speed--clar



**POUR CLARIFICATEURS
CIRCULAIRES À BOUES ACTIVÉES**



Par



**LE SPÉCIALISTE DE LA
DECANTATION DYNAMIQUE**

www.densiline.com
06 65 65 25 24

TROPHEE COLLECTIVITES
CGLE 2025

Double les
débits
admissibles

Supprime le
voile de
boues

Économise
l'énergie et
les
adjuvants

subjected to a series of test experiments such as mechanical resistance and radiological properties. The mechanical resistances proved to be very interesting. The radiological evaluation of mud bricks allows to guarantee their safety since they are well below the required limits (less than 10 mSv/y).

en cas d'ingestion, l'eau contaminée par l'arsenic augmente le risque de développer un cancer. Les inhalations ou les ingestions de toxines contenues dans les cendres volantes peuvent avoir des effets sur le système nerveux, entraînant des défauts cognitifs et des problèmes comportementaux, tout en augmentant le risque de développer des maladies pulmonaires, rénales et gastro-intestinales.

L'utilisation des cendres volantes dans le domaine de filtration des effluents liquides a donné des résultats très satisfaisantes, mais un nouveau déchet solide apparaît, à savoir la boue de filtration. Pour choisir la méthode la plus appropriée d'élimination de ces boues, de nombreux paramètres doivent être pris en compte : la structure de la boue, sa composition chimique, la sécurité environnementale et le coût de la valorisation des boues. Nous avons déjà valorisé ces boues dans le domaine de génie civil en réalisant des briques écologiques, car les tests de lixiviations ont montré que les métaux lourds, logiquement présents dans les cendres volantes, ont été totalement piégés. L'objet de cette section est d'évaluer le risque radiologique des briques contenant les boues. La mesure de la concentration en radionucléides a été évaluée en estimant la concentration de l'activité du radon 222



Figure 2: Machine électrique vibrante à tamis.

(²²²Rn), qui est considéré comme la principale source d'exposition humaine aux rayonnements. L'activité du radon est un indice clé pour contrôler l'exhalaison radiologique des briques de boues. Cette étude a également pour but de vérifier et mesurer la dose de radon absorbée [1-5].

MATÉRIAUX ET MÉTHODES

La boue étudiée a été récupérée après épuraison des lixiviats des déchets ménagers et industriels par la technique de filtration-percolation, à travers une matrice



Figure 1: Aspects du sable, des cendres volantes et du sol argileux formant la boue de filtration.

Tableau 1: Distribution granulométrique des matières premières

Taille des particules (µm)	Boues d'épuration (%)
< 75	-
75-100	-
100-125	7,8
125-160	8,3
160-200	7,3
200-315	5,3



Le traitement des hydrocarbures dans les eaux industrielles est un enjeu stratégique pour les sites de production soumis à des normes de rejet toujours plus strictes. Face aux limites des séparateurs gravitaires traditionnels et aux risques de non-conformité, les industriels ont besoin de solutions fiables, performantes et adaptées à leurs installations.

NEWMATEC (SCAI ENVIRONNEMENT®) accompagne les acteurs industriels avec des technologies éprouvées pour résoudre leurs problématiques liées à la présence d'huile entière (ou corps gras) au sein de leur process et de sécuriser les rejets. Le déshuileur à bande DBC400 élimine efficacement les huiles flottantes tout en réduisant les coûts d'exploitation. Dans le domaine de l'usinage par exemple, le déshuileur à coalescence DCM150I assure une séparation fine des hydrocarbures, prolonge la durée de vie des lubrifiants solubles et améliore la performance globale des procédés.

Conformité réglementaire, réduction des arrêts de production, maîtrise des coûts et limitation de l'empreinte environnementale : des solutions concrètes, pensées pour les contraintes du terrain.

Des solutions techniques pour un traitement des hydrocarbures maîtrisé.

 www.scai-environnement.com

DCM150I
Déshuileur à coalescence – Pompe pneumatique



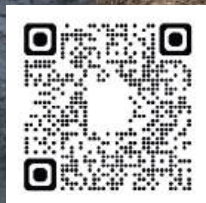
DBC400
déshuileur à bande – 400mm – Poulie folle



UNE PROBLÉMATIQUE DE BOUES ?



Nous avons LA SOLUTION !



www.aprotek.fr

APROTEK
DU SOLIDE POUR VOS LIQUIDES

☎ + 33 (0)4 27 26 01 94
✉ info@aprotek.fr

PRISMA
Instruments

Le débitmètre radar pour canal ouvert
DCOR-M03

Fiabilisez le suivi des débits de vos réseaux hydrauliques



Irrigation, assainissement, cours d'eau :
une mesure continue, sans contact et sans encrassement.
Contactez-nous pour en savoir plus.

Tel. +33(0)4 42 70 74 04
contact@prismainstruments.com
www.prismainstruments.com

Tableau 2: Composition en oxydes des matières premières de briques

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	NaO ₂
Quantité (%)	54,16	23,19	6,04	8,33	1,75	1,045	0,43	1,23	0,08	0,6

Tableau 3: Concentration de métaux lourds (mg/L)

Échantillon	Cu	Zn	Pb	As	Cr	Ni	Hg	Cd
Boue	0,15	0,39	0,051	0,01	0,024	0,13	0,005	0,007
Limite inerte	2	4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,01	0,04
Limite non dangereuse	50	50	10	2	10	10	0,2	1
Limite dangereuse	100	200	50	25	70	40	2	5

purifiante constituée des adsorbants naturels, à savoir : le sable de taille granulométrique 160 µm, le sol argileux et les cendres volantes (voir Figure 1). Ces dernières proviennent de la centrale thermique de Taqa Maroc, le sable a été prélevé de la plage de Moulay Abdellah, à El Jadida (Maroc). Les échantillons de boue ont été séchés à l'air ambiant pour réduire l'odeur intense, puis dans un four pendant 2 h, afin de diminuer la quantité de matières organiques.

L'analyse de la teneur en oxydes des matières premières a été réalisée par la technique de spectrométrie par fluorescence des rayons X (XRF). La préparation des échantillons consiste à faire fondre 0,5 g du matériau avec 5 g de fondants

de borates de lithium profonds, avec huit gouttes d'iodure de lithium. Le lot supportant les échantillons est resté dans un four à +965 °C pendant 10 min, avant d'être retiré. Chaque échantillon a finalement été soumis à la spectrométrie XRF (série OY1241 de Malvern PANalytical). La spectroscopie d'émission atomique à couplage inductif (ICP-AES) a été effectuée afin d'avoir une idée très précise de la concentration des métaux lourds (éléments traces). Le test de lixiviation a été réalisé en utilisant la norme néerlandaise NEN 7345 (Netherlands Standardisation Institute [NSI] en 1993). Chaque échantillon a été immergé dans un récipient fermé rempli d'eau acidifiée; le rapport liquide était de cinq fois le volume des échantillons [6-7].

Distribution de la taille des particules.

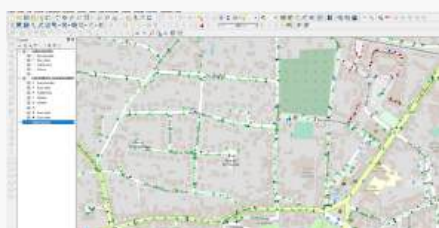
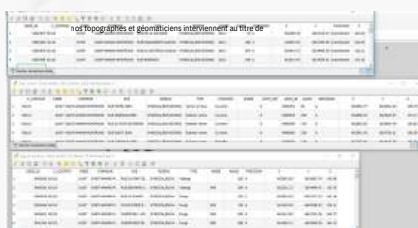
La distribution granulométrique des matières premières a été déterminée en utilisant une machine électrique vibrante à tamis (voir Figure 2). Un volume de 100 g de l'échantillon a été introduit dans la machine. La taille des tamis s'échelonnait comme suit (µm): 75, 100, 125, 160 et 200. Après 30 min, la masse restante sur chaque plateau de tamisage a été pesée. Le tableau 1 résume les résultats de l'analyse par tamisage. La boue d'épuration entre dans la catégorie des sables fins. Sa fraction particulaire dépend principalement du processus de traitement des eaux usées, et la taille prédominante se situe entre 100 et 160 µm. Le tableau 2 résume les résultats obtenus par fluorescence X. La boue d'épuration contient une quantité importante de silice (54,16 %) et d'alumine (25 %). La quantité d'oxyde de calcium (CaO) dans la boue d'épuration est relativement élevée, ce qui est susceptible d'améliorer les propriétés pouzzolaniques et de liaison. De plus, selon Aydin, ce degré de CaO peut augmenter la porosité des échantillons des briques en raison de la formation de gaz pendant le processus de cuisson. La présence majeure de silice dans notre échantillon empêche les briques de se fissurer pendant le processus de cuisson et permet la mise en forme des briques. Le taux d'oxyde de fer dans la boue se situant entre 8 et 10 % est considéré comme optimal pour augmenter la durabilité des briques. L'oxyde d'aluminium est considéré comme optimal pour augmenter la durabilité des briques. Le sable présent dans la boue est constitué d'un pourcentage important de silice (45 %). Il est appelé matériau réfractaire; il pourrait donc être utilisé

Tableau 4: Rapports de mélange de boue dans les briques

Briques	Pourcentage de boue dans le mélange conventionnel
Brique 0 (traditionnelle)	0 %
Brique 1	2 %
Brique 2	4 %
Brique 3	6 %
Brique 4	8 %
Brique 5	10 %
Brique 6	12 %
Brique 7	14 %
Brique 8	16 %
Brique 9	18 %
Brique 10	20 %

Premier bureau d'études en France à délivrer des données cartographiques conformes au nouveau standard STAR Eau, initié par un groupe de travail de l'ASTEE et validé par le CNIG

CORRELANE Technologies, certifiée en détection et géoréférencement des réseaux enterrés, est depuis 20 ans, l'entreprise pionnière experte dans les inventaires patrimoniaux et géoréférencement grande échelle des réseaux AEP, Assainissement, Éclairage Public, avec tables attributaires complexes, nos topographes et géomaticiens interviennent au titre de vos:



Investigations Complémentaires et OL (DT-DICT, Loi anti-endommagement), Marquage Piquetage



Détection et géoréférencement de réseaux grande échelle:



Prestation par drone aérien (UAV)



Contactez-nous





Figure 3: Machine d'essai de compression.

correctement comme matériau résistant à la chaleur [8-10]. Le tableau 3 donne les résultats obtenus par la spectroscopie ICP-AES, exprimés en (mg/L). La concentration des métaux lourds est un indicateur essentiel dans l'évaluation de la qualité environnementale des matériaux. Le zinc (Zn) et le chrome (Cr) sont les constituants prédominants dans la boue d'épuration. Nous constatons que toutes les valeurs sont inférieures aux limites dangereuses (voir Tableau 3).

Préparation des échantillons de briques. Le tableau 4 résume les rapports de mélange des matières premières. Dix types de briques ont été réalisés, dont la brique de référence B0 qui ne contient que les matières premières conventionnelles. La quantité de boue d'épuration a été ajustée pour chaque échantillon. Pour chaque mélange, l'eau a été systématiquement ajoutée de 20 à 30 % pour obtenir la plasticité adéquate et transformer le mélange en pâte. Les mélanges de pâte ont été soumis à une pression de moulage dans des moules prismatiques de $6 \times 6 \times 10$ cm. La taille typique du moule a été choisie en tenant compte de la taille du dispositif requise par la norme de la brique solide standard. Les briques ont été séchées à l'air ambiant [11-15].

Résistances mécaniques. Dans cette section, les essais ont été réalisés selon la norme européenne adoptée au Maroc. Considéré comme la donnée la plus importante dans cette étude, l'indicateur de test de résistance met en évidence la capacité des briques à résister à la déformation sous les processus mécaniques. L'essai de résistance à la compression a été réalisé en

plaçant la brique entre les plaques de la machine d'essai. En tenant compte de la résistance prévue des éprouvettes, une contrainte axiale a été appliquée systématiquement, avec une vitesse de $0,05 \text{ N/mm}^2/\text{s}$, jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir Figure 3). Il est à noter que la résistance élastique et la résistance à la rupture sont deux propriétés mécaniques importantes qui caractérisent le comportement d'un matériau sous chargement. La résistance élastique est la capacité d'un matériau à résister à un chargement sans subir de déformation permanente. Lorsqu'un matériau est soumis à un chargement élastique, il se déforme mais il retrouve sa forme initiale lorsqu'il est déchargé. Cependant la résistance à la rupture est la capacité d'un matériau à résister à un chargement jusqu'à la rupture. Lorsqu'un matériau est soumis à un chargement qui dépasse sa résistance à la rupture, il se rompt et perd sa capacité à supporter le chargement. Les valeurs des

résistances obtenues des différentes briques à base de boue de filtration sont illustrées dans la figure 4 [16-23]. Les valeurs des résistances mécaniques obtenus sont très positives car elles dépassent largement celles de la brique de référence.

Évaluation du radon. La boue d'épuration, comme mentionné précédemment, contient des résidus résultant du processus d'infiltration-percolation, à savoir des déchets de charbon (cendres volantes). Le charbon est naturellement radioactif; par conséquent, une évaluation du risque radiologique de tous les échantillons est nécessaire. L'exposition radioactive se divise en expositions interne et externe. Le rayonnement externe est souvent dû au rayonnement gamma exhalé provenant de différents radionucléides de désintégrations radioactives des chaînes – uranium 238 (^{238}U), uranium 235 (^{235}U), thorium 232 (^{232}Th) et potassium 40 (^{40}K) –, alors que l'exposition interne est due à l'inhalation de ^{222}Rn [24-28].

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans le but d'évaluer les risques radiologiques, cette section de notre étude vise à mesurer l'activité moyenne du radon ^{222}Rn dans les matières premières et dans les échantillons de briques, car les boues d'épuration valorisées dans ce travail contiennent une grande partie des déchets de charbon qui pourront être radioactif. Par conséquent, une évaluation de l'activité du radon dans tous les matériaux est recommandée. On a eu recours à la technique nucléaire de

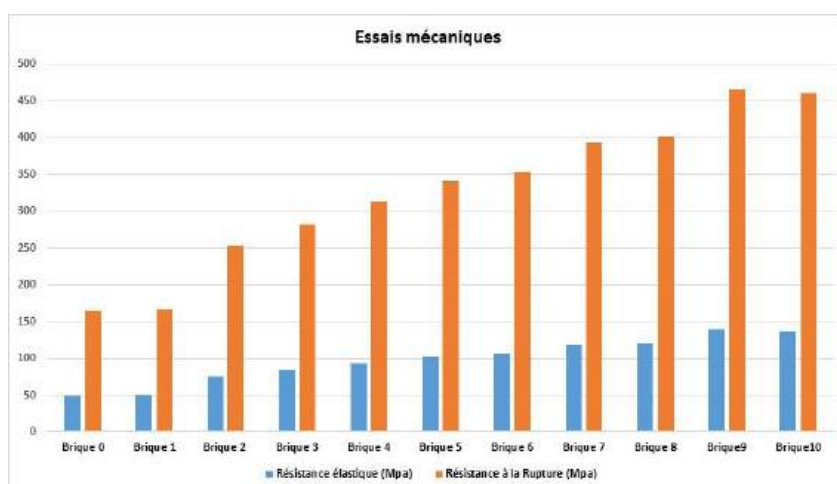


Figure 4: Résistances à la compression et rupture des briques.



LIMEC

Laboratoire d'Imagerie Macroscopique
par Effet Couronne

CONNECTER L'EAU ET L'IA

Ouvre de nouvelles possibilités



Découvrir de nouvelles dimensions de la science de l'eau



Surveillance continue et abordable des procédés industriels



Construire ensemble un Modèle Mondial de l'Eau par IA



LIMEC transforme les motifs lumineux produits par des gouttelettes d'eau électriquement excitées en empreintes numériques que l'intelligence artificielle peut analyser.

Un nouveau pont entre la science de l'eau, l'innovation industrielle et l'IA.

SARL DÉVELOPPEMENT DURABLE
16 Rue Sirven · 31100 Toulouse
Tél. 05 61 32 15 12
contact@sarl-developpementdurable.fr
www.limec.fr

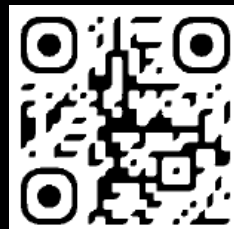


Tableau 5 : Les propriétés radioactives dans les déchets de l'étude

Matériau	AV (mBq/m ³)	ES (mBq.m ⁻² .h ⁻¹)	EM (mBq.kg ⁻¹ .h ⁻¹)
Cendres volantes	286	145	8,2
Boue de filtration	368,34	291,88	16,49

dosimétrie alpha basée sur l'utilisation du détecteur solide de traces nucléaires (DSTN) LR115 type II. Le principe de cette technique consiste à l'enregistrement des traces des particules alpha (α) émises par le radon et ses descendants sur le détecteur LR115. Ce dernier est un film en couche mince de marque Kodak. Il est constitué d'une couche de nitrocellulose ($C_6H_8N_2O_9$) de 12 μm d'épaisseur moyenne, teintée en rouge et d'un support inerte de 100 μm en polyester.

Le nitrate de cellulose est parmi les DSTN les plus sensibles aux particules α . Il peut enregistrer des particules α d'énergie comprise entre 1,4 et 4,7 MeV avec un angle d'incidence allant jusqu'à 50°. L'insensibilité du LR115 aux rayonnements électromagnétiques et aux électrons présente un grand intérêt pour son utilisation en champs mixte de rayonnements. Après traitement chimique, chaque impact de particule α laisse un micro-trou de 1 à 15 μm de diamètre dans la couche rouge. Dans le but de réaliser des dosimètres simples et peu coûteux, on a décidé d'utiliser des flacons cylindriques polymériques de 5,5 cm de diamètre et d'une hauteur de l'ordre de 9,5 cm, et fermés par un bouchon en polyéthylène (voir Figure 5). Sur la face interne de celui-ci est fixé un échantillon de 2 x 2 cm² de DSTN (LR115), 50 g d'échantillon à mesurer est disposés au fond. Un joint à base de mastic silicone permet d'étanchéifier parfaitement le dispositif. Afin de mesurer uniquement l'émission α du radon, il est nécessaire d'éloigner suffisamment le DSTN de la surface supérieure de l'échantillon. Cependant, avant de réaliser les mesures, il faut éliminer l'humidité présente dans les échantillons de cendres de charbon collectés. Du coup, l'échantillon doit d'abord subir un séchage au four à une température contrôlée de +110 °C pendant 4 h, puis être tamisé à travers un tamis de 100 μm .

Après la préparation, les échantillons sont placés dans les dosimètres. Comptant 75 jours d'irradiation, les détecteurs ont été développés dans une solution de NaOH à 2,5 N à +60 °C

pendant 100 min. La procédure adoptée de la métrologie est similaire à celle utilisée par d'autres chercheurs [29-30].

Les paramètres relatifs au risque radiologique.

• **Activité du radon :** c'est un indicateur relatif au taux de désintégration du radon par seconde, une seule activité A correspond à 476 000 atomes de ²²²Rn :

$$A_{V,Rn} = \frac{D_{LR}}{\epsilon_{LR}(\theta, E\alpha)}$$

D_{LR} : la densité de trace en (Tr.cm⁻²);
 $\epsilon_{LR}(\theta, E\alpha)$: l'efficacité de la détection en fonction de l'angle critique d'enregistrement θ et de l'énergie de la particule α $E\alpha$. Cette efficacité est égale à 0,0258 (traces.cm⁻².j⁻¹)/(Bq/m³).

• **Exaltation surfacique et massique :** cette grandeur quantifie la diffusion du radon dans les pores du matériau; on distingue entre l'exhalation surfacique E_s et l'exhalation massique E_M :

$$E_s = \frac{A_v V \lambda_{Rn}}{S_e \left[t + \left(\frac{1}{\lambda_{Rn}} \right) (e^{-\lambda_{Rn} t} - 1) \right]}$$

$$E_M = \frac{A_v V \lambda_{Rn}}{M \left[t + \left(\frac{1}{\lambda_{Rn}} \right) (e^{-\lambda_{Rn} t} - 1) \right]}$$

A_v est l'activité du radon (Bq.m⁻³.h⁻¹);
 λ_{Rn} est la constante de désintégration du radon (h⁻¹);
 S_e est la surface de l'échantillon (m²);
 M est la masse (g) et t est le temps d'exposition (h).

• **La dose effective absorbée du radon :** il est indispensable d'estimer la dose efficace annuelle moyenne que les hommes peuvent absorber. L'impact radiologique de l'inhalation de ²²²Rn à partir de matériaux de construction, qui dépend fortement des descendants à courte durée de vie du radon ²²²Rn. Ainsi, selon l'UNSCEAR (Comité

scientifique des Nations unies sur les effets des rayonnements atomiques) [33-34], la dose efficace annuelle moyenne E , exprimée en (mSv/an), est calculée à l'aide du modèle suivant :

$$E = A_v^{Rn} \times H \times F \times D \times T$$

Les valeurs du modèle sont suggérées par le Comité scientifique des Nations unies pour étudier les effets du rayonnement atomique (UNSCEAR 2006):

H est le facteur d'occupation (0,8 à l'intérieur et 0,2 à l'extérieur);

F est le facteur d'équilibre entre le ²²²Rn et ses descendants (0,4 dans l'air intérieur et 0,6 à l'extérieur);

D est le facteur de conversion de la dose (9,0 nSv.h⁻¹ par Bq.m⁻³);

T est sur les heures pendant un an (8760 h/an).

Les différents essais d'identification ont été menés, que ça soit pour la valorisation des déchets à charbon dans le traitement des eaux usées ou pour l'utilisation de la boue d'épuration dans les matériaux de construction. En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet de bien comprendre leur comportement vis-à-vis du procédé visé. Les propriétés des matériaux de construction permettent de juger la performance d'incorporer la boue d'épuration dans les briques.

Les propriétés radioactives dans les déchets valorisés. Évidemment, après l'utilisation des cendres volantes dans le traitement des lixiviats des déchets ménagers et industriels, la boue d'épuration contiendrait des radionucléides. On peut en déduire que la concentration d'activité de radon est plus élevée dans les cendres de fond que dans

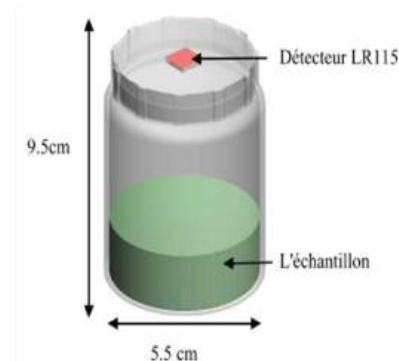


Figure 5: Flacon de mesure de concentration du radon.



Solutions de dosage haute précision pour l'eau et l'industrie

Leader mondial du dosage chimique, SEKO conçoit des équipements fiables, connectés et performants pour optimiser vos procédés industriels depuis plus de 50 ans.



ELEKTRA

Pompes électromécaniques
Pilotage impulsif, 4-20 mA, batch... sortie 4-20 mA, ModBus

Connectivité intégrée et accès aux données en temps réel pour un pilotage à distance et une maintenance optimisée.



KRONOS

Pompes péristaltiques moteurs pas à pas
Pilotage impulsif, 4-20 mA, batch... sortie 4-20 mA, ModBus

Dosage précis et fiable, idéales pour les produits chimiques agressifs ou les applications sensibles.



KONTROL 102

Instruments de contrôle à double paramètres, pH, ORP, Cd, mA, température, ModBus

Mesure simultanée de deux paramètres avec affichage graphique et connectivité avancée.



ENSEMBLE DE DOSAGE

Coffrets ou armoires de dosage adaptables à toutes vos configurations

Intégration de 1 à 3 pompes, sécurisation des fuites et protection des utilisateurs et de l'environnement.



Votre partenaire mondial dans le domaine des solutions de dosage.

SEKO SAS

42 Rue de Lamirault, 77090 Collégien, France
+33 1 60 05 90 60
contact.fr@seko.com

Tableau 6: Évaluation radioactive dans les échantillons de brique

Échantillon	AV (mBq/m ³)	ES (mBq.m ⁻² .h ⁻¹)	EM (mBq.kg ⁻¹ .h ⁻¹)
B0	107,01	84,8	4,79
B6	176,98	140,27	7,92
B7	206,92	163,97	9,26
B8	258,68	204,98	11,58
B9	305,94	242,44	13,7

les cendres volantes. Cette différence pourrait être liée à la texture fine des cendres volantes et aux petits trous qui empêchent la fuite de radon. En effet, le charbon est naturellement riche en radionucléides, mais ces coproduits, notamment les cendres volantes, ont une radioactivité naturelle technologiquement renforcée. On remarque, dans le tableau 5, que la boue d'épuration possède une activité radioactive élevée (368,34 Bq.m⁻³). Plusieurs explications peuvent être impliquées là-dessus. Premièrement, la boue est constituée d'un mélange de résidus du procédé filtration, de cendres volantes et des résiduels des lixiviats. D'autre part, le traitement des lixiviats génère en particulier des déchets (boue) qui peuvent être plus ou moins radioactifs, selon le type et les origines des effluents. Autre explication, la boue est conçue par porosité qui pourrait augmenter le taux d'émanation du rayonnement. L'activité du radon des déchets évalués dans la présente étude est en correspondance avec d'autres études similaires au Maroc, et ils sont d'autant moins radioactifs par rapport à d'autres déchets à charbon et à des boues d'épuration évaluées ailleurs. Le taux d'exhalation de surface dans les échantillons est insignifiant par rapport à la limite moyenne mondiale (57 600 mBq. m⁻².h⁻¹) [31-32]. Nous avons effectué des tests de radioactivité dans cinq briques qui présentent des taux élevés de mélanges des boues, à savoir les briques B0, B6, B7, B8 et B9. L'évaluation de la concentration d'activité dans les échantillons de briques modélisés dans le tableau 6 montre que l'augmentation de la quantité de boue implique une concentration d'activité plus élevée. L'échantillon B9 affiche une concentration d'activité plus

insignifiante que celle des autres échantillons. Les résultats de l'expiration de surface et de masse sont également donnés dans le tableau 6 : les briques produites présentent une expiration de surface et de masse inférieure par rapport à celle des boues d'épuration. Dans les spécimens de briques, l'expiration de surface se situe entre 84,80 et 242,44 mBq.m⁻².h⁻¹. Quant à l'expiration de masse, elle est comprise entre 4,79 et 13,70 mBq.Kg⁻¹.h⁻¹. Le taux d'expiration augmente simultanément avec l'augmentation des boues. Cela est principalement dû à la porosité du matériau et à la taille des grains des matières premières qui affectent considérablement l'émanation du radon. De plus, l'expiration de surface dans tous les échantillons était bien en deçà des besoins mondiaux (57 600 mBq.m⁻².h⁻¹) [31-33].

Estimation de la dose effective absorbée. La figure 6 illustre les résultats de doses efficaces de radon que les hommes peuvent absorber chaque année. Il est montré que les doses varient entre 2,7 et

9,29 mSv/an avec une valeur moyenne de 6,28 mSv/an. Cependant les résultats restent très satisfaisants et sûrs, puisque tous les échantillons sont au-dessus de la limite autorisée, qui est un accord universellement nucléaire à 10 mSv/an. En outre, on pourrait supposer que la dose absorbée sera, en réalité, inférieure aux résultats théoriques en raison de l'effet de l'aération qui réduira évidemment les doses estimées, comme indiqué précédemment [33-34].

CONCLUSION

Le Maroc a déployé des efforts potentiels pour soutenir son évolution économique et sociale, et faire face à l'accroissement démographique. Cependant cette poursuite nécessite une maîtrise de la mobilisation, compte tenu des ressources disponibles du pays, et de faire face aux enjeux environnementaux qui persistent en parallèle. En particulier, la gestion des déchets solides et liquides. Les déchets industriels solides, les eaux usées et les boues d'épuration deviennent de plus en plus accentués, d'autant plus dans les projets réalisés au Maroc, d'où la nécessité des interventions intégrales pour une préservation majeur environnemental. Les possibilités de valorisation ont été également développées à travers plusieurs études et selon l'état de recherche.

Le secteur de la construction contribue déjà à valoriser de nombreux sous-produits, dont l'exploitation de certains en tant que constituants est normalisée et commence à prendre une échelle industrielle élargie. Autant que l'industrie cimentière a adopté la valorisation de certains déchets solides, l'incorporation

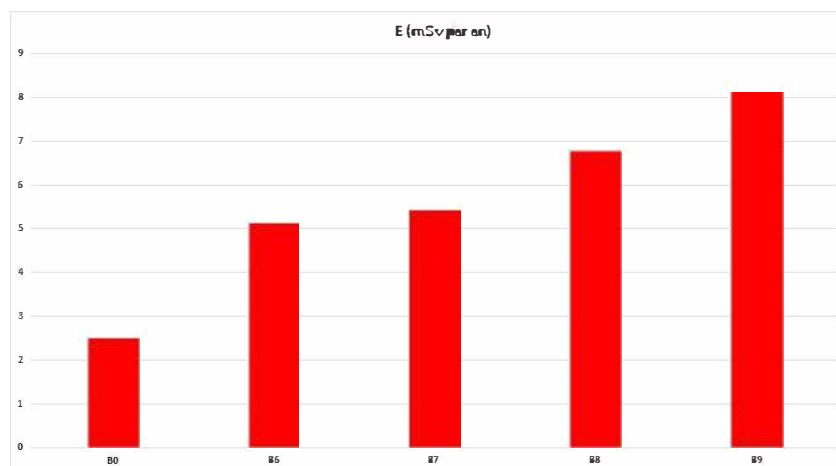


Figure 6: La dose efficace absorbée.

CYCL'EAU

PROVENCE-ALPES-MÉDITERRANÉE

Le rendez-vous régional de la filière Eau

25>26 NOVEMBRE 2026 | ARENA DU PAYS D'AIX



**VENEZ À LA RENCONTRE DES ACTEURS DE L'EAU
DU BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE-CORSE !**

+80 OFFREURS DE SOLUTIONS DE LA FILIÈRE EAU
DES CONFÉRENCES INSTITUTIONNELLES & ATELIERS
DES VILLAGES D'EXPERTS AUTOUR DE L'INGÉNIERIE,
UN FORUM RÉGIONAL DE L'EAU,
DES INNOVATIONS, ...

RETROUVEZ TOUTES LES INFOS SUR

WWW.CYCLEAU.FR



des déchets dans la construction est toujours restreinte, en particulier, les déchets issus de traitement des eaux usées (« la boue d'épuration »). La génération de ce sous-produit se multiplie de plus en plus avec l'adoption des systèmes de traitement des eaux usées. La documentation bibliographique de la gestion de ce déchet prouve que son utilisation en matériaux de construction est limitée. Cela est lié à plusieurs facteurs, à savoir la complexité et la toxicité de ce déchet, son impact environnemental et, surtout, son effet sur les propriétés physiques et mécaniques des constructions. El Jadida, qui est une ville industrielle par excellence, affronte deux problèmes majeurs : les eaux usées et les déchets industriels à charbon. Dans ce sens, nous avons développé, au laboratoire, un système de filtration-percolation en valorisant les cendres à charbon pour compléter le traitement des eaux. Le choix de cette technique repose, premièrement, sur son efficacité et son rendement en termes de purification, approuvés par plusieurs chercheurs, dont notre laboratoire est témoin, et, en deuxième lieu, sur son applicabilité à grande échelle. Néanmoins, comme

tous procédés, le côté indésirable est toujours omniprésent : il s'agit de la boue d'épuration, qui persiste dans le traitement des eaux usées et qui représente un autre type de déchets solide complexe.

Puisque la perspective globale est de réaliser un projet visant à purifier les eaux par le procédé d'infiltration-percolation, la quantité de boue générée sera non négligeable ; par conséquent, un mode de recyclage ou de valorisation s'impose. En se référant à la documentation bibliographique, les boues qui contiennent des propriétés pouzzolaniques pouvaient être incluses dans la construction. Il est possible d'incorporer la boue d'épuration, résidente du procédé d'infiltration-percolation cité auparavant, dans différents types de matériaux de construction. Le premier scénario concerne l'utilisation de la boue d'épuration comme additif du ciment Portland composé. Une substitution partielle des matières conventionnelles du ciment portland composé par la boue fut l'objet de fabrication.

Dans l'autre scénario, l'introduction de la boue de filtration dans la fabrication des briques en variant les ratios a donné

des résultats plus que satisfaisants. Les résistances mécaniques à la compression et aux ruptures sont très importantes, et l'évaluation radiologique est plus que satisfaisante donnant ainsi un produit très environnemental, fortement conseillé dans le domaine de construction et, particulièrement, dans la réalisation des routes et barrages. La faible dose de radon dans la boue de filtration des effluents liquides en général par le sable, le sol argileux et les cendres volantes peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la nature du radon, les propriétés des matériaux et le processus de traitement. Le radon est un gaz noble qui peut être éliminé facilement pendant le processus de traitement des eaux usées. Quant aux propriétés des matériaux, le sable, le sol argileux et les cendres volantes peuvent adsorber ou retenir les particules et les contaminants, mais pas nécessairement le radon. Enfin, le processus de traitement des effluents liquides peut éliminer les contaminants et les particules, y compris les radionucléides, ce qui peut réduire la concentration de radon dans la boue de filtration. ●



Références bibliographiques

[1] **AFNOR**, 2004, «Spécifications pour éléments de maçonnerie. Partie 1 : Briques de terre cuite». Norme française (NF EN 771-1), Paris

[2] **AFNOR**, 2008, «Spécifications pour éléments de maçonnerie, Complément national à la NF EN 771-1:2004 et son amendement A1:2005, Paris.

[3] **AYDIN T.**, 2018, «Développement de briques légères poreuses en terre cuite à l'aide d'une méthode de réplcation», J. Aust. Céram. Soc. 54 : 169–175.

[4] **BELVISO C.**, 2018, «Applications de pointe des cendres volantes de charbon et de biomasse : focus sur les processus et les problèmes de synthèse de zéolithes», Programme Combustion d'énergie Sci. 65 : 109–135.

[5] **BENLALLA A., M. ELMOUSSAOUITI, M. DAHHOU ET M. ASSAFI**, 2015, «Utilisation des boues de station d'épuration dans les briques céramiques structurelles», Appl. Argile Sci. 118 : 171–177.

[6] **BOUKHAIR A., L. BELAHBIB, K. AZKOUR, H. NEBDI, M. BENJELLOUN ET A. NOUREDDINE**, 2016, «Mesure de la radioactivité naturelle et du taux d'exhalation de radon dans des échantillons de cendres de charbon d'une centrale thermique», Monde J. Nucl. Sci. Technol. 6 (3) : 153-160.

[7] **CYR M., M. COUTAND ET P. CLASTRES**, 2007, «Technologique et comportement environnemental des cendres de boues d'épuration (SSA) dans les matériaux à base de ciment», Cem. Rés. 37 (8) : 1278-1289.

[8] **DEMIR I.**, 2008, «Effet de l'ajout de résidus organiques sur la propriété des briques d'argile», Gestion des déchets (Oxford) 28 (3) : 622–627.

[9] **ELICHE-QUESADA D. ET J. LEITE-COSTA**, 2016, «Utilisation des mâchefer de combustion de grignons d'olive dans la production de briques en terre cuite respectueuses de l'environnement», Gestion des déchets (Oxford) 48 : 323–333.

[10] **ESMERAY E. ET M. ATJES**, 2019, «Valorisation des boues d'épuration, laitier de four et les cendres volantes dans la production de briques d'argile». [11] Mater. 194 : 110–121, conbuildmat 2018.10.231.

[12] **ESTABRAGH A.R., M. KOUCHAKZADEH ET A.A. JAVADI**, 2020, «Impact d'eau et solution de glycérol sur le traitement des sédiments par le ciment», Int. J. Pavement Eng. 21 (3) : 322–335.

[13] «Recyclage des déchets de cendres de bagasse de canne à sucre dans la production de briques d'argile», J. Environ, Faire en sorte. 101 : 7–12.

[14] **GUIMARÃES A.S., V.P. DE FREITAS, J.M.P.Q. DELGADO ET T. REGO**, 2015, «L'effet d'interface dans l'absorption d'eau dans la brique en céramique», Processus d'énergie 78 : 1395–1400.

[15] **HUSEIEN G.F., A.R.M. SAM, K.W. SHAH, A.M.A. BUDIEA ET J. MIRZA**, 2019, «Utilisation des grenats usés comme remplacement du sable dans les mortiers activés par les alcalis contenant des cendres volantes et du GBFS».

[16] **IMANOR (INSTITUT MAROCAIN DE NORMALISATION)** Mater 225 : 132–145, IMANOR (Institut Marocain de Normalisation), 2014, «Spécifications pour éléments de maçonnerie : éléments de maçonnerie en béton de granulats (granulats courants et légers)», Projet de norme marocaine, NM 10.1.00, Rabat.

[17] **JUEL M.A.I., A. MIZAN ET T. AHMED**, 2017, «Utilisation durable de la tannerie boues dans la fabrication de briques au Bangladesh», Gestion des déchets (Oxford) 60 : 259–269.

[18] **KAZMI S.M.S., S. ABBAS, M.J. MUNIR ET A. KHITAB**, 2016, «Étude exploratoire sur l'effet des déchets de balle de riz et des cendres de bagasse de canne à sucre dans les briques d'argile cuite», J. Construire, Ing. 7 : 372–378.

[19] **LEIVA C., C. ARENAS, H. CIFUENTES, L.F. VILCHES ET J.D. RIOS**, 2017, «Propriétés radiologiques, de lixiviation et mécaniques des cendres volantes de combustion dans les ciments», J. Hazard, Radioactif toxique, Gaspillage 21 (4) : 2–7.

[20] **PECEÑO**, 2018, «Une évaluation mécanique, de lixiviation et radiologique des briques cuites à haute teneur en cendres volantes», Céram. Int. 44 (11) : 13313–13319.

[21] **INSTITUT NÉERLANDAIS DE NORMALISATION**, 1993, «Caractéristiques inorganiques des constituants inorganiques des matériaux de construction et des déchets stabilisés», NEN 7345, Delft.

[22] **RHOUGH I. ET A. LAAMYEM**, 2019, «Valorisation des déchets industriels bruts et des matériaux naturels dans l'adsorption des métaux lourds des eaux usées de la ville d'El Jadida pour être réutilisés dans l'irrigation», Dessalement, Traitement de l'eau 141 : 163–170.

[23] **RHOUGH I., A. LAAMYEM, A. ZRABDA, M. MONKADE ET M. FAQIE**, 2018, «Filtration des eaux usées de la station de prétraitement de la ville d'El Jadida par des matrices à base de matières naturelles et de déchets

industriels», L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances 413 : 97–102.

[24] **ROUF H.**, 2003, «Effets de l'utilisation des boues d'arsenic et de fer dans la fabrication de briques», ing. Dans Devenir de l'arsenic dans l'environnement, 193–208, Université d'ingénierie et de technologie du Bangladesh.

[25] **SANKARAN PILLAI G., P. SHAHUL HAMEED ET SM MAZHARNAZEEB KHAN**, 2016, «Radioactivité dans les matériaux de construction et évaluation du risque d'exposition humaine dans le district de Tiruchirapalli au Tamil Nadu, Inde».

[26] **J. HAZARD**, Radioactif toxique, Gaspillage 20 (3) : 04016004.

[27] **SMOL M., J. KULCZYCKA, A. HENCLIK, K. GORAZDA ET Z. WZOREK**, 2015, «L'utilisation possible des cendres de boues d'épuration (SSA) dans l'industrie de la construction comme voie vers une économie circulaire», J. Cleaner Prod. 95 : 45–54.

[28] **STOULOS S., M. MANOLOPOULOU ET C. PAPASTEFANOU**, 2003, «Évaluation de l'exposition aux rayonnements naturels et l'exhalation de radon des matériaux de construction en Grèce», J. Environ. Radioact. 69 (3) : 225–240.

[29] **SUTCU M., E. ERDOGMUS, O. GENCEL, A. GHOLAMPOUR, E. ATAN ET T. OZBAKKALOGU**, 2019, «Recyclage des déchets de mâchefer et de cendres volantes dans la production de briques d'argile respectueuse de l'environnement», J. Cleaner Prod. 233 : 753–764.

[30] **TAHA Y., M. BENZAAZOUA, R. HAKKOU ET M. MANSORI**, 2016, «Argile naturelle substitution par les déchets du traitement de la calamine pour fabriquer des briques cuites», J. Cleaner Prod. 135 : 847–858.

[31] **TAOIFIQ L., A. LAAMYEM, A. BOUKHAIR, E. ESSEDIQI, M. MONKADE ET A. ZRABDA**, 2018, «Évaluation radiologique des procédés de traitement des eaux usées basée sur l'utilisation de cendres de charbon comme filtres», J. Radiat. Rés. Appl. Sci. 11 (3) : 217–224.

[32] **UKWATTA A., A. MOHAJERANI, S. SETUNGE ET N. ESHTIAGHI**, 2015, «Possibilité d'utilisation de biosolides dans les briques en terre cuite», Constr. Construire, Mater. 91 : 86–93.

[33] **UNSCAR (COMITÉ SCIENTIFIQUE DES NATIONS UNIES SUR LES EFFETS DE LA RADIATION)**, 2000, Vol.16 (2) du Rapport 2000 du comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements atomiques, New-York.

[34] **UNSCAR (COMITÉ SCIENTIFIQUE DES NATIONS UNIES SUR LES EFFETS DE LA RADIATION)**, 2006, Vol. 1 de UNSCAR, New-York.