

Prix de la deuxième meilleure présentation de l'atelier « Eau » au Colloque International « Eau Déchet Développement Durable » 2016, Lomé, Togo

Application de l'impression 3D à l'élaboration de filtres en céramique pouvant servir au traitement de l'eau au point d'utilisation

Akuemaho Virgile Onésime Akowanou^{1,2,3}, Martin Pépin Aïna¹, Leo Groendijk², Kouassi Benjamin Yao³

(1) Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau (LSTE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Benin.

(2) Department of Environmental and Water Technology, Van Hall Larenstein, Part of Wageningen University and Research, Post Box 1528, 8901 BV Leeuwarden, The Netherlands.

(3) Laboratoire de Procédés Industriels, de Synthèse, de l'Environnement et des Energies Nouvelles, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

Auteur correspondant : virgile.akowanou@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'eau est une ressource indispensable à la survie de tout être vivant, essentiel pour la santé, et constitue un droit fondamental pour tout homme. Ainsi, afin de fournir de l'eau de qualité en quantité suffisante aux populations quels que soient les contextes, les recherches scientifiques s'orientent actuellement vers le développement de procédés novateurs, d'exploitation facile et peu coûteux. L'objectif étant de permettre l'accès à de l'eau de qualité en quantité suffisante au point d'utilisation. À cet effet, une des techniques novatrices qui aujourd'hui retrouve son application dans divers domaines de la science est l'impression tridimensionnelle (3D). Ainsi au cours de cette étude une imprimante 3D, l'«Ultimaker 1» destinée initialement à l'impression à base de matière plastique a été adaptée afin de servir à la fabrication de filtres en céramiques. Ces filtres pourront retrouver des applications en traitement de l'eau destinée à la consommation au point d'utilisation. Il ressort de cette expérience que ce concept novateur, pourrait devenir dans un avenir proche, une alternative viable à la fourniture d'eau potable en quantité et qualité suffisante dans les Pays en Développement.

MOTS-CLÉS : filtre en céramique, impression 3D, traitement des eaux

ABSTRACT

Water is an indispensable resource for the survival of every human being; it's essential for the health and a fundamental human right. So, in order to provide enough quality water to populations whatever the context, researchers are now further focusing on innovative procedures of easy and cheap exploitation allowing access to enough quality water at the user end. Therefore, one of the innovative techniques used in various area in science is three-dimensional (3D) printing. Thus for this study, a 3D printer, "Ultimaker 1", initially designed for plastic printing has been tailored for the confection of ceramic filters. These filters can treat the water to be consumed at the user end. From this experience we can notice that this innovative concept, could very soon become a reliable alternative in the provision of enough and quality water in developing countries.

KEYWORDS : ceramic filter, 3D printing, water treatment

Application de l'impression 3D à l'élaboration de filtres en céramique pouvant servir au traitement de l'eau au point d'utilisation

Akuemaho Virgile Onésime Akowanou, Martin Pépin Aïna, Leo Groendijk, Kouassi Benjamin Yao

INTRODUCTION

L'eau est une ressource indispensable à la survie de tout être vivant, essentielle pour la santé et constitue un droit fondamental pour tout homme. Avec la croissance démographique galopante, et l'augmentation constante des cas de maladies hydriques dans le monde, le besoin en eau de qualité en quantité suffisante est effectif et se fait urgemment ressentir, surtout dans les Pays en Développement (PED). Souvent dans les PED, les systèmes centralisés de gestion de la fourniture d'eau potable n'arrivent à couvrir qu'une petite partie de la population (Sorenson *et al.*, 2011). En milieu urbain, la forte croissance démographique accompagnée d'un développement spatial anarchique échappant au contrôle des pouvoirs publics constitue un frein à la fourniture d'eau potable. Les zones rurales quant à elles ne sont pas souvent desservies. Les populations doivent fréquemment parcourir de longues distances avant d'avoir accès à l'eau (Sorenson *et al.* 2011). La ressource en eau n'est pas forcément de bonne qualité, de plus il faudra tenir compte des risques de contamination durant le trajet entre la source de prélèvement, et le ménage où l'eau sera utilisée (Onabolu *et al.*, 2011). Dans ce contexte, l'utilisation de méthodes de traitement de l'eau au point d'utilisation est une alternative.

Il existe plusieurs méthodes de traitement de l'eau au point d'utilisation dont les principales sont : la chloration, la filtration sur sable, l'utilisation des filtres en céramiques, la désinfection solaire. Parmi ces méthodes, l'utilisation des filtres en céramiques occupe une place prépondérante à cause des performances obtenues (Kallman *et al.*, 2011; Muzerengi *et al.*, 2013). Elles sont souvent fabriquées à l'échelle locale mais parfois aussi commercialisées par des industries spécialisées. Il se pose souvent deux principaux problèmes en ce qui concerne la fabrication et l'exploitation des filtres en céramiques (surtout ceux produits à l'échelle locale par les populations elles-mêmes) qui sont les suivants (TCMWG 2011; Johnson *et al.*, 2015) :

- la quantité d'eau obtenue en filtration du fait de la surface de contact de l'eau avec le filtre, ou encore de l'épaisseur du filtre est souvent faible (environ 2 l par heure) ;
- sur les unités de fabrication on s'aperçoit qu'il arrive souvent que deux filtres fabriqués dans les mêmes conditions ne présentent pas les mêmes performances, à cause de défaut de fabrication.

Au vu de ces deux difficultés, il a été conclu qu'il est indispensable de penser à la mise en œuvre d'une méthode de fabrication permettant d'une part d'avoir des filtres d'épaisseurs réduites et présentant une grande surface de filtration et d'autre part d'être constant quant à la qualité des filtres produits. À cet effet, il est intéressant de penser à l'impression tridimensionnelle (3D), qui est un procédé innovant ayant trouvé son application dans divers domaines (tel que l'industrie, la médecine...). L'impression 3D permet de reproduire des formes complexes d'objets tout en économisant un temps et des ressources énormes (Lee *et al.*, 2016). Les applications sont d'ordres divers, depuis la médecine (réalisation de prothèse dentaires, prothèses osseuses et autres), jusqu'à la revalorisation de déchets (sachets) plastiques en passant par l'industrie (automobile, aéronautique pour la fabrication de pièces...). De façon générale, cette technologie revient aujourd'hui au premier plan, après une cinquantaine d'années d'existence. L'impression 3D s'effectue en utilisant principalement comme matériau d'impression des métaux ou alliages, des plastiques, purs ou en mélange. L'utilisation de l'argile comme matériau d'impression est assez récente, et des imprimantes sont à cet effet fabriquées ou en cours de fabrication. Dans le domaine du traitement des eaux, certaines recherches présentent leur potentiel dans la réalisation de pièces destinées aux modules de filtrations grâce aux membranes céramiques (Hammel *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016). Cependant, aucune recherche n'a été effectuée dans le sens de son exploitation à des fins de réalisations de filtres pour la potabilisation de l'eau au point d'utilisation.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un travail visant à réaliser grâce à l'impression 3D, des filtres en céramiques pour le traitement des eaux de consommation au point d'utilisation. Les objectifs définis sont les suivants : tout d'abord, modifier une imprimante utilisant de matériaux plastiques comme matière d'impression afin de l'exploiter pour l'impression de matière argileuse, ensuite, définir le paramétrage approprié au niveau de l'imprimante pour effectuer l'impression, puis enfin, trouver la formulation idéale des pâtes céramiques à base des argiles étudiées.

I. Matériels et méthodes

I.1. Impression tridimensionnelle

I.1.1. Démarche globale

Le processus allant de l'idée à la réalisation d'un objet grâce à l'impression 3D est assez complexe. De nombreuses parties sont impliquées et doivent interagir ensemble. Il peut néanmoins être résumé en six (6) étapes :

- (1) création d'un modèle 3D de l'objet à reproduire. Il s'agit de réaliser un prototype de l'objet à réaliser. Pour cette étude, le logiciel « 123D Design » a été utilisé à cet effet.
- (2) génération d'un fichier de l'objet dessiné dans le format approprié (STL habituellement). Ce fichier contient les informations du prototype à reproduire. C'est une étape importante car elle détermine la qualité du produit obtenu ;
- (3) conversion du modèle réalisé de l'objet en une liste de commandes que l'imprimante 3D peut comprendre et exécuter (généralement g-code, qui est le langage de programmation compris par l'imprimante) ;
- (4) envoi de la liste d'instruction à l'imprimante (soit par une connexion USB à un PC ou une carte mémoire selon la configuration de l'imprimante
- (5) préparation de l'imprimante et impression
- (6) retrait de l'objet imprimé et finition (selon la forme de l'objet à imprimer, il arrive souvent que l'on réalise une base devant servir de support ; cette base est ensuite retirée.

I.1.2. Imprimante 3D

L'imprimante utilisée dans le cas de cette étude est l'« Ultimaker I » (figure 2). L'« Ultimaker I » est une imprimante tridimensionnelle « open source » créée par la société Néerlandaise « Ultimaker ». Le logiciel « Cura », permet grâce à cette imprimante, de réaliser des impressions d'objets préalablement dessinés avec un logiciel de DAO tel qu'Autocad. Initialement conçu pour l'impression d'objets plastiques, le procédé d'impression consistait en un premier temps à faire fondre un filament plastique à une température bien définie. Ensuite, l'impression de l'objet désiré se faisait par une superposition de lignes de filament de plastique fondus grâce à une buse, depuis la base de l'objet, jusqu'à l'obtention du produit final.

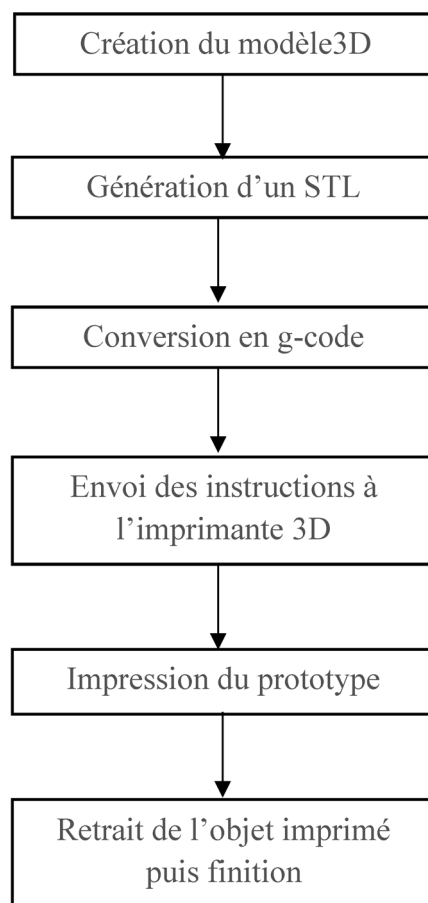


Figure 1. Démarche globale de réalisation des filtres en céramiques

Afin de pouvoir réaliser l'impression d'ouvrage en argile, un certain nombre de réajustements ont été effectués. Premièrement, une seringue a été adaptée à la tête de l'imprimante. Cette seringue avait pour but de contenir l'argile à utiliser lors de l'impression (figure 2). De l'air sous pression est utilisée (4 bars) afin d'effectuer l'extrusion de l'argile par la sortie de la seringue.



Figure 2. Ultimaker I

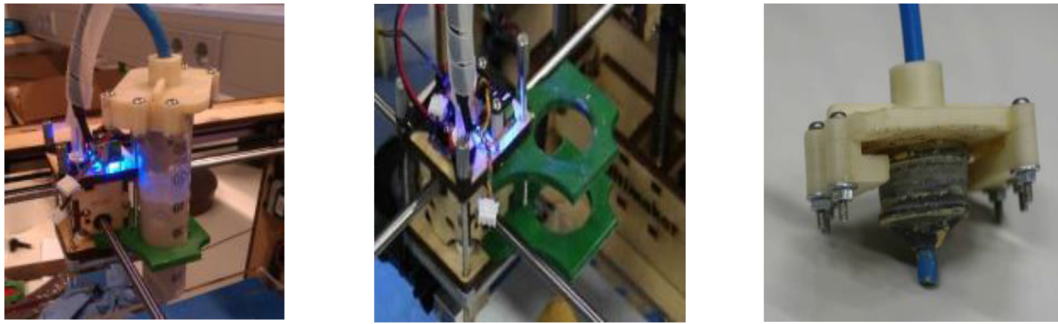


Figure 3. Réajustement de l'Ultimaker I pour l'extrusion de l'argile

1.2. Matières premières

Les filtres en céramiques ont été élaborés à base d'argile, de coques de riz et d'eau. Deux types d'argiles ont été utilisés, une argile commerciale et une argile prélevée localement, au Bénin. L'argile commerciale est produite par « keramische massen » (RB 03833). L'argile locale a été recueillie à une profondeur d'environ 1,5 m au niveau d'un gisement situé dans le village de « Sè », département du Mono, Bénin. Les coordonnées GPS du site de prélèvement sont les suivants : 06°29'35.64" N et 01°47'37,38" E. Ce choix a été effectué car le village est reconnu comme la « capitale de la poterie au Bénin ». La population locale est déjà très expérimentée en ce qui concerne l'utilisation de l'argile pour de la poterie. L'argile brute recueillie est débarrassée manuellement des impuretés grossières (pierres et autres objets de grandes tailles), séchée, broyée puis tamisée à 200 μm .

Des coques de riz sont utilisées comme matière porogène, générant ultérieurement des pores dans le filtre final après frittage à haute température. Elles ont été recueillies auprès de riziculteurs, dans la localité de « Zinvé », située à 34 km environ de Cotonou. Les coques de riz ont été choisies afin de tirer avantage de sous-produits de l'agriculture locale. Les coques de riz sont aussi utilisées au Bénin dans l'élevage d'animaux (porc, volailles...). Ce choix a été fait dans un souci d'utilisation de matériaux locaux, accessibles à moindre coût. Un autre matériau tel que la sciure de bois pourrait être aussi utilisé.

1.3. Élaboration des filtres en céramiques

La réalisation des filtres est déterminée par trois paramètres : la composition de la pâte céramique, les paramètres de configuration de l'imprimante et le traitement thermique (frittage) utilisé.

1.3.1. Composition des pâtes céramiques

Différentes compositions de pâte céramique (proportion argile – coque de riz) ont été utilisées (tableau 1). Dans un premier temps, l'objectif était de définir les volumes d'eau (solvant) à utiliser afin de pouvoir effectuer l'extrusion de la pâte de façon efficace. Les différentes granulométries de coques de riz ont été définies en se basant sur les travaux de différents auteurs dans la littérature (Bielefeldt *et al.*, 2010; Kallman *et al.*, 2011; Ren and Smith 2013; Mittelman *et al.*, 2015).

1.3.2. Configuration de l'imprimante

Il est important de se rappeler le principe d'impression 3D qui consiste en un dépôt successif de couches de matériaux qui se chevauchent afin de ne pas créer de vide entre elles et suivant le modèle défini par le concepteur.

L'« Ultimaker I » permet la configuration et l'ajustement des paramètres suivants :

- (1) épaisseur de la couche (épaisseur de chaque couche déposée),
- (2) épaisseur de la coque (largeur de chaque couche déposée),

Tableau 1. Composition des pâtes céramiques utilisées pour la fabrication des filtres

Argile (tamisée à 200 μm)	Coques de riz
Argile commerciale et argile locale	D < 45 μm
	45 μm < D < 200 μm
	200 μm < D < 500 μm

- (3) taux de remplissage (définit le chevauchement de deux couches quand l'épaisseur de la coque est inférieure à l'épaisseur de l'objet à réaliser),
- (4) vitesse d'impression,
- (5) diamètre de la buse (diamètre de l'extrudeuse),
- (6) température d'impression.

Ces paramètres s'appliquent à la « tête d'impression » de l'imprimante, et permettent de définir la configuration idéale applicable au dispositif de seringue sous pression installé pour l'utilisation de l'argile. L'épaisseur de la couche est très importante car elle définit la résolution de l'objet. L'ajustement de la vitesse d'impression permet aussi d'obtenir un rendu de qualité.

1.4. Frittage

Le frittage consiste à transformer les filtres imprimés en céramique (dense ou poreuse) présentant une certaine tenue mécanique. Il s'agit d'une consolidation qui s'effectue sans fusion totale. La consolidation est due au développement de ponts (ou de cous) entre les grains, et est souvent accompagnée d'une densification (élimination des pores) et d'un grossissement des grains (diminution du nombre de grains). Le frittage induit des modifications physico-chimiques irréversibles du matériau de départ. La densification se manifeste par un retrait de frittage et correspond à une réduction de la porosité. C'est une étape très importante car une élévation trop rapide des températures conduit souvent à des fissurations et une cuisson incomplète du filtre. Le traitement thermique suivi dans ce cas consiste en un séchage à température ambiante pendant une semaine puis un frittage à 900 °C pendant 2 h suivant une augmentation de température d'environ 1,6 °C par minute. La faible montée de température permet d'éviter les fissurations dues au retrait rapide de l'eau, et 900 °C est une température adaptée lorsque l'on veut fritter de l'argile.

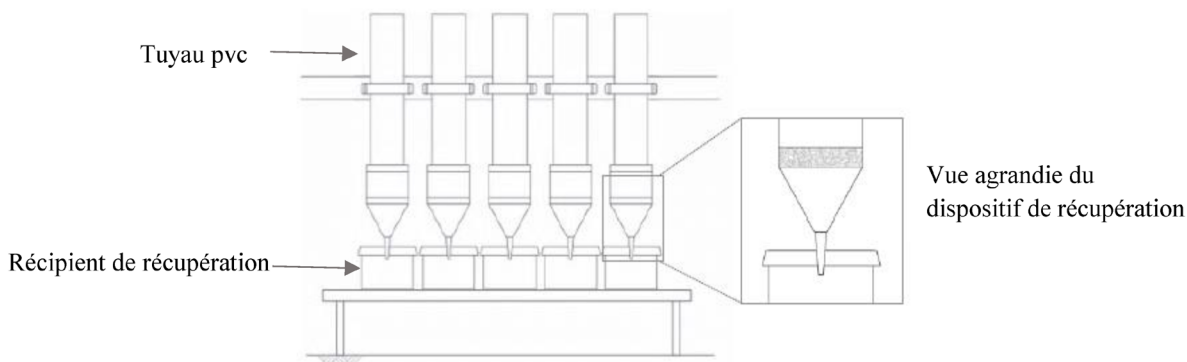


Figure 4. Représentation schématique du dispositif expérimental

1.5. Tests

Les tests effectués sur les filtres ont consisté à évaluer la porosité et le débit de filtration. Le dispositif expérimental est constitué de pvc (Wildkamp, The Netherlands) transparent de 1 m de hauteur et de 50 mm de diamètre. Les pvc sont interconnectés entre eux et alimentés par une pompe (Masterflex, Model 77200-60, USA) afin de maintenir un même niveau d'eau (et donc la pression constante) au niveau des différents pvc. Avant utilisation, les filtres sont vérifiés en les plongeant dans un récipient contenant de l'eau afin de s'assurer qu'il n'y a pas de fissuration (dans ce cas la sortie de l'air entraîne une formation de bulles).

2. Résultats et discussions

2.1. Forme des filtres

L'avantage de l'utilisation de l'impression 3D pour la réalisation de filtres en céramiques réside dans le fait qu'il est possible de réaliser des formes complexes et donc d'augmenter énormément la surface de contact des filtres produits avec l'eau. Bien que plusieurs possibilités de formes puissent être expérimentées, la conception de base s'est fondée sur le modèle de filtre proposé par « The Berkenfeld ceramic », qui sont des filtres en céramiques sous forme de bougies. Cependant, le principal problème était de pouvoir fermer le haut du filtre, lors de l'impression 3D. Après donc une série d'essais-erreurs conduisant à l'effondrement lors de la réalisation des filtres, le modèle adopté est représenté par une base cylindrique soutenant un cône (figure 5). Les dimensions sont les suivantes :

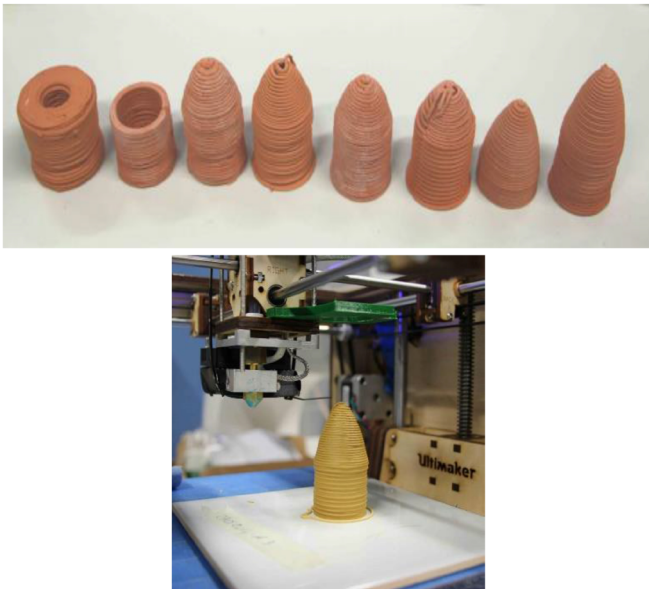
- Cylindre de base : épaisseur 3 mm, diamètre (épaisseur compris) 30 mm, hauteur 5 cm
- Cône : épaisseur 3 mm, hauteur : 35 mm

Après séchage-frittage on observe un retrait au niveau de la pâte céramique qui varie selon l'argile utilisée. Le tableau 2 présente les dimensions des filtres après frittage.

Tableau 2. Dimensions des filtres avant et après frittage

	Dimensions initiales	Dimensions après frittage	
		AL1, AL2 et AL3	AC1 et AC2
Epaisseur (mm)	3	2,5	2,8
Diamètre (mm)	30	20	20
Hauteur cylindre de base (mm)	50	40	47
Hauteur cône (mm)	35	20	30

AL1 : Argile locale $D < 45 \mu\text{m}$
 AL2 : Argile locale $45 \mu\text{m} < D < 200 \mu\text{m}$
 AL3 : Argile locale $200 \mu\text{m} < D < 500 \mu\text{m}$
 AC1 : Argile commerciale $D < 45 \mu\text{m}$
 AC2 : Argile commerciale $45 \mu\text{m} < D < 200 \mu\text{m}$

**Figure 5. Processus de calage de la forme**

2.2. Configuration optimale de l'imprimante 3D

Les différents paramètres optimisés en ce qui concerne l'imprimante sont les suivants : l'épaisseur de la couche, épaisseur

de la coque, taux de remplissage, vitesse d'impression, diamètre de la buse, température d'impression (Tableau 3). Ces paramètres sont étroitement liés à la composition des pâtes céramique.

2.3. Effet de la composition de la pâte céramique

2.3.1. Proportion de matière porogène

L'incorporation de matière porogène garantit la porosité des filtres obtenus car la matière porogène est éliminée après frittage et crée un milieu poreux. Au vu des essais effectués, il a été constaté que pour des proportions supérieures à 20 % par rapport à la masse d'argile + matière porogène utilisée, quelle que soit la granulométrie des coques de riz, les filtres obtenus n'étaient plus assez solides et s'effritaient facilement. Ce qui rejoint la remarque effectuée dans la littérature (Oyanedel-Craver et Smith, 2008). Il a été donc retenu une proportion de 20 % pour les coques de riz.

2.3.2. Taille des coques de riz

La taille des coques de riz a influencé la demande en eau pour la confection des pâtes céramiques et la surface des filtres obtenues (figure 6). Aussi, du fait de la taille du bout des seringues (3 mm), il était impossible de réaliser des filtres avec des granulométries de coque de riz comprise entre 200 et 500 μm avec l'argile commerciale.

Tableau 3. Paramètres optimisés de l'imprimante

Epaisseur de la couche (mm)	Epaisseur de la coque (mm)	Taux de remplissage (%)	Vitesse d'impression (mm/s)	Diamètre de la buse (mm)	Température d'impression (Celsius)
1,2	1,5	0	7	1,2	0

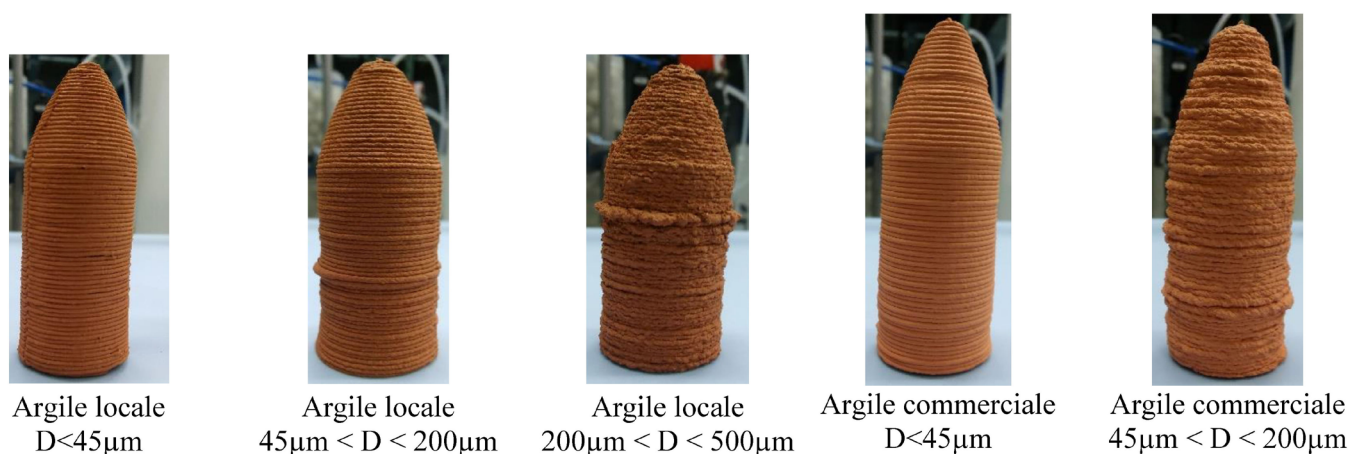


Figure 6. Différents types de filtres obtenus

2.3.3. Composition de la pâte céramique

Les proportions d'eau utilisées varient avec la granulométrie des coques de riz (diamètre D). Les différents filtres obtenus sont présentés à la figure 6. Les plus petits diamètres de coque de

riz présentent des filtres facilement réalisables avec une meilleure finition. Les filtres les plus faciles à réaliser, et présentant une meilleure finition, sont obtenus avec des coques de riz de diamètres plus petits (voir figure 6). Quant aux volumes d'eau utilisée, ils évoluent avec la taille des coques de riz utilisée (Tableau 4).

Tableau 4. Composition des pâtes céramiques

Mélange Argile	Masse d'argile (g)	Masse de coques de riz (g)	Masse d'eau (g)
AL1	240	60	135
AL2	240	60	168
AL3	240	60	195
AC1	240	60	125
AC2	240	60	155

Tableau 5. Débits obtenus lors des premiers essais de filtration

Composition du filtre	Débit d'écoulement (ml/h)	Porosité (eau) %
AL1	35	23,5
AL2	55	26,7
AL3	75	29
AC1	208	43,5
AC2	214	45,8

AL1 : Argile locale D < 45 μm
 AL2 : Argile locale 45 μm < D < 200 μm
 AL3 : Argile locale 200 μm < D < 500 μm
 AC1 : Argile commerciale D < 45 μm
 AC2 : Argile commerciale 45 μm < D < 200 μm

2.4. Application en filtration

Les résultats obtenus permettent de conclure que les filtres présentent un bon débit d'écoulement (tableau 5). De façon générale, les valeurs de porosité évoluent avec la granulométrie des coques de riz et le débit d'écoulement.

CONCLUSION

Un concept novateur, la technologie de l'impression 3D, a été mis en application pour développer un procédé de fabrication de filtre en céramique destiné au traitement des eaux. Et s'il est possible de réaliser des filtres en céramique par ce procédé, il demeure néanmoins des améliorations à effectuer. Elles devront être axées sur les points suivants :

- Évaluer les performances physico-chimiques et microbiologiques des filtres afin de voir leur efficacité en traitement de même que l'influence de la composition de l'eau traitée sur ces performances ;
- Étudier aussi les compositions optimales des filtres afin de les adapter selon qu'il s'agit d'éliminer une pollution physique, chimique ou microbiologique ;
- Comparer les performances obtenues à celles des méthodes de traitement de l'eau au point d'utilisation déjà existantes afin d'évaluer la viabilité de l'utilisation de ce procédé.

Références bibliographiques

- Bielefeldt A.R., Kowalski K., Schilling C., Schreier S., Kohler A. et Summers R.S., 2010. Removal of virus to protozoan sized particles in point-of-use ceramic water filters. *Water Res* 44:1482–1488. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2009.10.043>
- Hammel E.C., Ighodaro O.R. et Okoli O.I., 2014. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review. *Ceram Int* 1–20. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095>
- Johnson R.C., Boni G., Degbey C., Togbe K., Amoukpo H. et Boko M., (2015) Assessment of the Potential contribution of the ceramic filter "Songhai" in the treatment of drinking water in Benin (West Africa). *Journal of Water Resource and Protection*, n° 7, pp: 702-706.
- Kallman E.N., Oyanedel-Craver V.A. et Smith J.A., 2011. Ceramic Filters Impregnated with Silver Nanoparticles for Point-of-Use Water Treatment in Rural Guatemala. *J. Environ. Eng.* 137:407–415.
- Lee J., See W., An J., Chua C.K., Tang C.Y., Fane A.G. et Chong T.H., 2016. The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology. *J Memb Sci* 499:480–490. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008>
- Mittelman A.M., Lantagne D.S., Rayner J et Pennell K.D., 2015. Silver Dissolution and Release from Ceramic Water Filters. *Environ Sci Technol* 49:8515–8522. DOI : <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b01428>
- Muzerengi C., Mhlongo S.E. et Mukwevho G.F., 2013. Characterization of clays for making ceramic pots and water filters at Mukondeneni village, Limpopo province, South Africa. 8:927–932.
- Onabolu B., Jimoh O.D., Igboro S.B., Sridhar M.K.C., Onyilo G., Gege A. et Ilya R., 2011. Source to point of use drinking water changes and knowledge, attitude and practices in Katsina State, Northern Nigeria. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 36:1189–1196. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.038>
- Oyanedel-Craver V.A. et Smith J.A., 2008. Sustainable colloidal-silver-impregnated ceramic filter for point-of-use water treatment. *Environ Sci Technol* 42:927–933. DOI : <http://dx.doi.org/10.1021/es071268u>
- Ren D. et Smith J.A., 2013. Retention and Transport of Silver Nanoparticles in a Ceramic Porous Medium Used for Point-of-Use Water Treatment.
- Sorenson S.B., et Morssink C. et Campos P.A., 2011. Safe access to safe water in low income countries: water fetching in current times. *Soc Sci Med* 72:1522–6. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2011.03.010>
- TCMWG. The Ceramics Manufacturing Working Group, 2011, Best practice recommendations for local manufacturing of ceramic pot filters for household water treatment. Ed. I. Atlanta, GA, USA: CDC, 187p.