



Extrusion et visualisation des pâtes d'argile au travers des orifices- Application à la céramique (Extrusion and visualization of clay pulp through orifices-Application to the ceramic)

A. Sirat*¹, M. Belhadri¹, N. Boudjenane¹, T. Bennama²

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 « Mohamed Boudiaf », BP 1505 El-M'naouar 31036 Oran, Algérie.*

² *Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Environnement (LIPE), Département de Génie Chimique, Faculté de Chimie, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », BP 1505, El-M'naouar 31036 Oran, Algérie.*

Received 23 July 2015, Revised 2 Jan 2016, Accepted 5 Jan 2016

*Corresponding author: E-mail: sirat_abdelkader@yahoo.fr; Tel: (+213) 41 36 03 44; Fax: (+213) 41 62 71 27

Abstract

In this study, the results of the experiments obtained by the extrusion of three types of clay in the plastic state are presented. Two clays are in the rough and the third is a treated clay. A new original device which simulates the operation of a piston extruder has been developed. This device allows to study paste extrusion through orifices calibrated by applying pressure using a standard piston. Several phenomena and defects can occur. These are related to the influence of certain parameters such as the nature of the materials, the geometry of the die, the pressure exerted and the extrusion speed. The observation of the morphology of the extrusion has made it possible to see the water migration from the center to the walls. The rheological parameters were also determined for various concentrations near the plastic limit.

Keywords: Clay, Pasty state, Rheology, Extrusion, Ceramic, Defects.

Résumé

Dans cette étude, les résultats des essais expérimentaux obtenus par l'extrusion de trois types d'argiles à l'état pâteux sont présentés. Deux argiles sont à l'état brut et le troisième est une argile traitée. Un nouveau dispositif original qui simule le fonctionnement d'une machine d'extrusion à piston a été mis au point. Ce dispositif permet d'étudier l'extrusion des pâtes au travers des orifices calibrés en exerçant des pressions à l'aide d'un piston normalisé. Plusieurs phénomènes et défauts peuvent apparaître. Ces derniers sont liés à l'influence de certains paramètres tels que la nature des matériaux, la géométrie de la filière, la pression exercée et la vitesse d'extrusion. L'observation de la morphologie de l'extrusion a permis de voir la migration de l'eau du centre vers les parois. Les paramètres rhéologiques ont été aussi déterminés pour différentes concentrations proches de la limite de plasticité.

Mots-clés: Argiles, Etat pâteux, Rhéologie, Extrusion, Céramique, Défauts.

1. Introduction

Le procédé d'extrusion revêt actuellement un intérêt économique tout particulier; mis à part l'industrie céramique qui l'a adopté depuis fort longtemps, il est actuellement utilisé dans différents secteurs industriels tels que l'agro-alimentaire, l'industrie pharmaceutique, l'industrie cosmétique, la métallurgie, la plasturgie et le génie civil [1-6]. Ce procédé consiste à forcer de manière continue le matériau plastique et viscoplastique à s'écouler à travers des filières bien définie, dont la taille et la forme sont celle de la section de l'objet désiré (films, plaques, feuilles, tubes, câbles, profilés...). Les matières extrudées peuvent se présenter sous forme de poudres, flocons, paillettes, granulés, bandes, morceaux irréguliers, pâtes plus au moins visqueuses... L'utilisation des ressources argileuses par l'homme, principalement dans la fabrication des matériaux de construction et des poteries, date depuis l'antiquité. Au cours de ces dernières années, de nombreux progrès ont

été réalisés dans plusieurs laboratoires et centres de recherche en Algérie, afin d'exploiter les différents gisements et carrières d'argiles dans l'industrie et cela, pour leurs diverses propriétés physico-chimiques, géotechniques et rhéologiques. Cependant, de nombreux procédés de transformation sont limités par l'apparition de certains défauts d'extrusion. Ce problème industriel crucial dans la mise en forme des matières a conduit à de nombreuses recherches sur les extrusions des argiles à l'état pâteux. Plusieurs travaux antérieurs [7-9] ont montré que le comportement rhéologique et tribologique d'un matériau pris à l'état pâteux, dans les conditions optimales d'extrusion, est fortement lié à ses caractéristiques physico-chimiques et à la caractérisation de sa plasticité.

La maîtrise des performances du procédé d'extrusion et du produit extrudé nécessite la compréhension des mécanismes de formation et d'apparition de certains défauts d'extrusion. Ces derniers ont des enjeux commerciaux très importants sur le domaine industriel, car ils limitent la productivité du processus d'extrusion. Les défauts d'extrusion sont généralement observés à la sortie de la filière, lorsque certaines conditions d'écoulements ne sont pas réunies tels que le mode de variation de la pression exercée, la géométrie des filières et la consistance des matériaux... et par conséquent l'extrusion de la pâte devient instable, ce qui favorise donc l'apparition de ces défauts des extrudats [10-11].

Certains auteurs ont considéré que la migration de la phase liquide à travers le squelette de la pâte pendant l'extrusion présente aussi l'un des principaux phénomènes d'apparition des défauts de surface et peut conduire au blocage de l'écoulement [12-19]. D'autres auteurs ont trouvé aussi que les paramètres géométriques de la filière de l'extrudeuse, qui sont la longueur (L_f) et le diamètre (D_f), peuvent être aussi l'un des facteurs impliqués dans l'apparition des défauts au niveau de l'extrudat [20-26]. Autres études ont montré également que les défauts d'extrusion sont généralement de deux types: les défauts de volume et les défauts de surface qui prennent des formes distinctes: arrachements, pelures ou en tronc de palmier [27-33].

Dans ce contexte, notre contribution consiste à développer au laboratoire une machine d'extrusion à piston qui permet d'étudier, à petite échelle, l'influence de certains paramètres mécaniques et géotechniques sur la qualité de l'extrudat, tout en mettant en évidence les conditions et les facteurs susceptibles d'initier la formation des défauts lors de l'extrusion de trois types d'argiles à l'état pâteux mis à l'essai. Cette démarche est effectuée à l'aide d'une filière axisymétrique de longueur L_f et de diamètre D_f variables, en faisant varier la valeur de la teneur en eau de chaque pâte d'argile utilisée au voisinage de la limite de sa plasticité.

2. Matériels et méthodes

2.1. Types d'argile utilisés

Les essais d'extrusion quantitatifs ont été réalisés sur des échantillons de pâtes d'argiles prises à l'état brut à des teneurs en eau, des dimensions géométriques de la filière et des pressions variables. Les trois variétés d'argiles utilisées proviennent de différentes régions de l'ouest algérien et sont désignées par KA, MK et SMB. Le premier type d'argile (KA) est issu de l'usine de céramique d'El-Remchi (CERAMICA) de la région de Tlemcen. C'est une argile blanchâtre, de type Kaolin, traitée pour être utilisée dans la préparation de la barbotine et est caractérisée par une teneur en eau à la limite de plasticité W_p égale à 39.30 %. Le deuxième type d'argile (MK) est extrait de la carrière de la dépression de Mers El Kébir de la région d'Oran. C'est une argile de couleur gris-vert et ayant une teneur en eau à la limite de plasticité W_p de 24.37 %. Le troisième échantillon, noté SMB, est une argile jaunâtre, recueillie des montagnes de Dahra de la région de Relizane. Cette argile est destinée à la fabrication de la brique rouge et possède une teneur en eau à la limite de plasticité W_p égale à 24.18 %.

2.2. Préparation des pâtes d'argile

Les trois échantillons d'argiles bruts utilisés (KA, MK et SMB) sont d'abord séchés à l'étuve à une température de 105 à 110 °C pendant 24 heures, suivi d'une aération, ensuite broyés et tamisés à une granulométrie inférieure à 80 μm . La poudre ainsi obtenue est constituée uniquement d'argile, du limon et du sable fin. Une quantité de 700 g de cette poudre est dispersée dans l'eau distillée et mélangée à l'aide d'un malaxeur mécanique pendant 5 à 8 min jusqu'à l'obtention d'une pâte plus ou moins homogène, plastique, malléable et déformable.

La mesure de la teneur en eau réelle W est réalisée après chaque préparation de la pâte d'argile avec des incertitudes de mesures sur W égales à ± 0.3 %. Pour cela, on détermine la masse d'eau réellement présente dans la pâte qui correspond à la perte en masse d'un échantillon de pâte humide après un temps de séjour de 24 heures à l'étuve à une température égale à 105 °C. Le rapport masse d'eau de l'échantillon humide sur masse de

l'échantillon sec donne la teneur en eau réelle. Pour chaque essai, trois échantillons de pâte sont prélevés et leur teneur en eau mesurée. La teneur en eau considérée est la moyenne des trois.

2.3. Dispositif expérimental

Afin d'étudier les conditions d'extrudabilité des pâtes d'argile préparées et les critères d'apparition des défauts, un dispositif expérimental a été développé au niveau de notre laboratoire. Il s'agit d'une extrudeuse en acier à piston, représentative d'une machine d'extrusion industrielle, fixée sur un support rigide à quatre pieds et composée essentiellement de sept éléments principaux (Figure 1):

- (1) un réservoir cylindrique qui sera alimenté en pâte d'argile à extruder;
- (2) un gueulard de forme conique relié au réservoir par sa partie supérieure;
- (3) une filière axisymétrique de diamètre D_f et de longueur L_f connectée au gueulard par sa partie inférieure;
- (4) un distributeur pneumatique à simple effet muni d'une commande électrique;
- (5) un vérin pneumatique qui pousse un piston couissant dans le réservoir et extrude la pâte à travers la filière;
- (6) un compresseur de 12 bars renforcé par une bouteille d'azote de 300 bars;
- (7) un manomètre à aiguilles pour mesurer la pression.

La particularité de cette extrudeuse réside dans sa filière axisymétrique, qui est facilement démontable et qui peut s'ouvrir longitudinalement avec le gueulard; ce qui permet donc l'étude de l'apparition des défauts et la caractérisation des modifications locales du matériau en question.

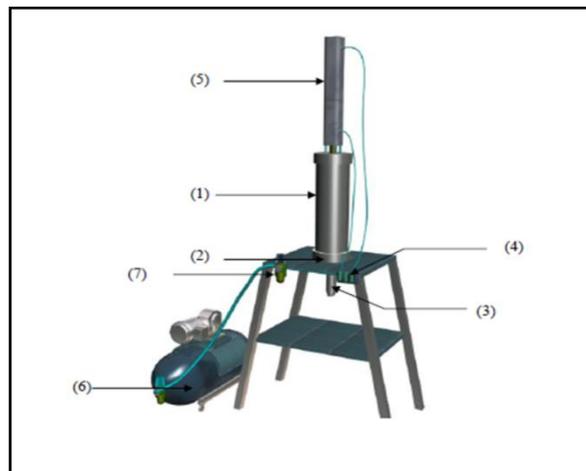


Figure 1 : Schéma d'ensemble de l'extrudeuse à piston développée au laboratoire

2.4. Principe de mesure des paramètres rhéologiques des extrudâts

Les deux paramètres rhéologiques des extrudâts à l'état pâteux, à savoir la contrainte de cisaillement apparente à la paroi notée τ_{ap} et la vitesse de cisaillement apparente à la paroi désignée par γ'_{ap} , sont calculés à partir des couples : débit volumique de l'extrudât (Q)-chute de pression (ΔP). Ces couples sont mesurés entre les deux extrémités de la filière axisymétrique en acier, en supposant l'absence de glissement à la paroi et un écoulement dans la direction axiale. Ainsi, la contrainte et la vitesse de cisaillement apparentes à la paroi (τ_{ap} et γ'_{AP}) seront calculées à l'aide des deux équations suivantes [34-36]:

$$\tau_{ap} = \frac{R_f \cdot \Delta P}{2L} \quad (1)$$

et

$$\gamma'_{ap} = \frac{4Q}{\pi R_f^3} \quad (2)$$

avec,

τ_{ap} : contrainte de cisaillement apparente à la paroi (Pa), ΔP : chute de pression (Pa), R_f : rayon de la filière (m), L_f : longueur de la filière (m), Q : débit volumique de l'extrudât (m^3/s), γ'_{ap} : vitesse de cisaillement apparente à la paroi (s^{-1}).

3. Résultats et discussion

3.1. Effet de la teneur en eau sur les courbes d'écoulement

Lors de l'extrusion des échantillons d'argiles à l'état pâteux (KA, MK et SMB) à travers une filière axisymétrique, différentes instabilités d'écoulement peuvent apparaître. Ces défauts ont une importance industrielle, car ils limitent la productivité des procédés d'extrusion. On distingue par visualisation à la sortie de la filière, plusieurs types de défauts qui affectent la surface de l'extrudât de formes régulières et irrégulières. La forme régulière est présentée par une surface lisse le long de l'extrudât et est notée par la lettre (a) dans les figures 2 à 7. En ce qui concerne les formes irrégulières, elles sont illustrées dans les mêmes figures 2 à 7, par l'apparition des défauts à la surface de l'extrudât. On distingue habituellement des défauts de surface par la présence des traces d'eau à la surface de l'extrudât sous forme de poches d'eau et sont désignés par la lettre (b). Les défauts de type d'arrachement superficiel, de type pelure sur la surface de l'extrudât et de type tronc de palmier sont indiqués par les lettres (c), (d) et (e) respectivement.

Industriellement, les pâtes d'argile sont extrudées à des teneurs en eau proches de la limite de plasticité d'Atterberg W_p . Le but des essais réalisés sur notre extrudeuse développée au laboratoire est de déterminer l'influence d'une variation de la teneur en eau de la pâte d'argile sur son comportement à l'extrusion et ce, en traçant les courbes d'écoulement expérimentales: la contrainte de cisaillement apparente à la paroi en fonction de la vitesse de cisaillement apparente à la paroi ($\tau_{ap} = f(\dot{\gamma}_{ap})$). Pour les trois argiles utilisées (KA, MK et SMB), la teneur en eau légèrement supérieure à la limite de plasticité W_p sera ajustée et ensuite abaissée jusqu'à ce que l'extrusion demeure difficile et ce, pour une longueur et un diamètre fixes de la filière axisymétrique ($L_f = 70$ mm et $D_f = 20$ mm) et à température ambiante égale à 27 °C. L'analyse de l'ensemble des courbes d'écoulement, représentées par les figures 2, 3 et 4, illustre une allure quasiment identique quelle que soit la valeur de la teneur en eau choisie. Notons que les résultats expérimentaux ont été modélisés à l'aide du modèle mathématique de Herschel-Bulkely (H-B) [37]. En effet, l'examen de la figure 2 relative à la pâte préparée à partir de l'argile KA indique que lorsque la teneur en eau W diminue de 50 à 40 % jusqu'à des valeurs proches de la limite de plasticité ($W_p = 39.30$ %), la contrainte de cisaillement apparente à la paroi τ_{ap} augmente avec une légère variation de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}_{ap}$, qui demeure plus au moins rapide à une certaine valeur de la contrainte de cisaillement τ_{ap} .

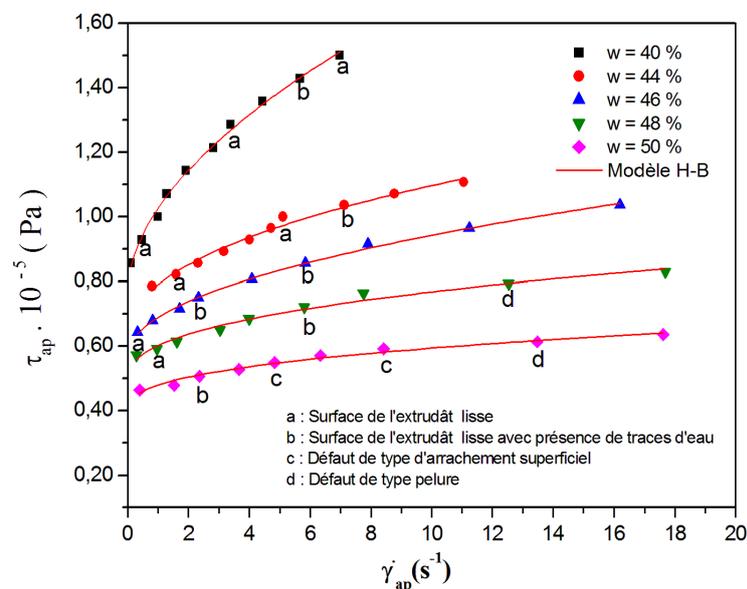


Figure 2: Présentation des courbes d'écoulements et les défauts apparents de la pâte d'argile KA pour différentes teneurs en eau (pH=6.3, T=27 °C, D_f=20 mm, L_f=70 mm)

En plus, il existe un domaine de teneur en eau entre 40 et 50 % permettant l'extrusion de la pâte d'argile; en dehors de cette marge, l'écoulement devient impossible. Ainsi, pour des teneurs en eau proches de la limite de plasticité et pour des valeurs de contrainte de cisaillement τ_{ap} faibles et proches de la valeur seuil τ_0 , les défauts d'extrudâts sont inexistantes et les extrudâts obtenus ont une surface lisse et sont de bonne qualité. Par ailleurs, si

la teneur en eau augmente au delà de la limite de plasticité, les défauts commencent à apparaître. Par ailleurs, si la teneur en eau augmente au delà de la limite de plasticité, les défauts commencent à apparaître. Ce phénomène peut être expliqué par le fait qu'un excès d'eau visiblement sous forme de traces est adhérent sur la surface de l'extrudât; ceci est probablement lié à une migration d'eau dans la phase solide de la pâte due essentiellement à l'existence d'une pression intra-particulaire.

De même, la figure 3 correspondant à la pâte d'argile MK montre que, pour une fourchette de teneur en eau comprise entre 36 et 46 %, il existe une valeur limite de la teneur en eau W permettant d'obtenir une bonne qualité d'extrusion. Cette valeur est proche de celle de la limite de plasticité W_p qui est égale à 24.37 %, qui dépend de la nature du matériau envisagé et aux dimensions géométriques (L_f et D_f) de la filière utilisée. La diminution de la teneur en eau W de 46 à 36 % engendra d'une part une augmentation systématique de la contrainte de cisaillement à la paroi τ_{ap} et la contrainte seuil de cisaillement τ_0 d'autre part. Quant à la figure 4 de la pâte d'argile SMB, elle révèle aussi l'existence d'une contrainte seuil de cisaillement τ_0 , liée fortement à la teneur en eau et à la géométrie de la filière axisymétrique, au delà de laquelle l'extrusion a lieu. En plus, pour ce cas de figure, l'évolution des courbes d'écoulement expérimentales ($\tau_{ap}=f(\dot{\gamma}_{ap})$) en fonction de la teneur en eau choisie montre, d'une part, une relation proportionnelle entre l'inverse de la teneur en eau et la contrainte de cisaillement et, d'autre part, l'apparition des défauts sur les surfaces du matériau extrudé, pour des teneurs en eau supérieure à la limite de plasticité ($W_p=24.18$ %). Ces défauts sont les trois types de défauts superficiels observés habituellement: arrachement, pelure et tronc de palmier. En revanche, pour des teneurs en eau en dessous de la limite de plasticité ($W_p=24.18$ %), la pâte d'argile se comporte comme un matériau élastique difficile à extruder.

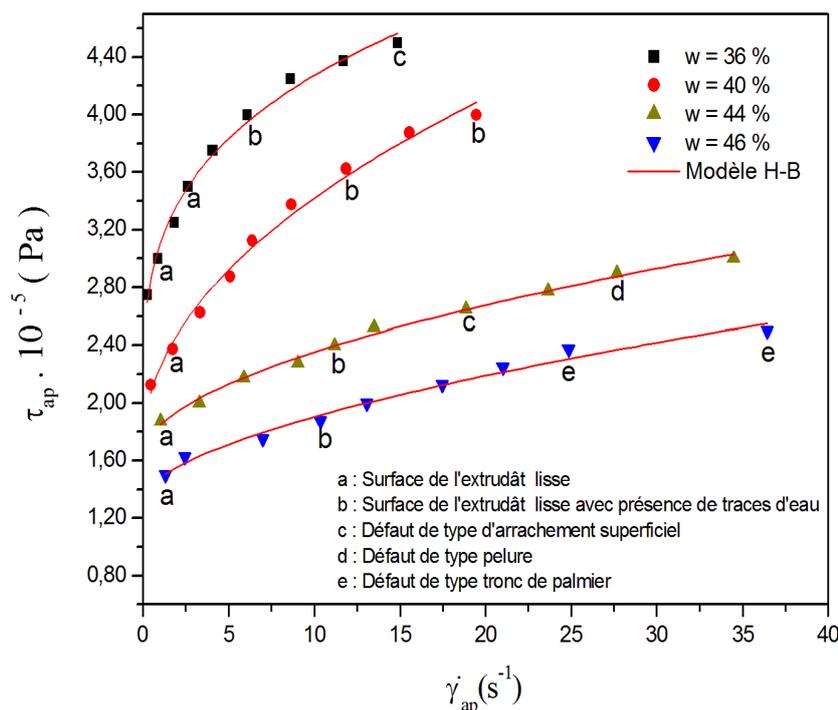


Figure 3: Présentation des courbes d'écoulement et les défauts apparents de la pâte d'argile MK pour différentes teneurs en eau (pH=8.4, T=27 °C, D_f=20 mm, L_f=70 mm)

3.2. Influence du rapport géométrique de la filière

L'effet des caractéristiques géométriques (longueur et diamètre) de la filière axisymétrique sur la qualité de l'extrudât des pâtes d'argiles KA, MK et MSB a été mis en évidence. Les figures 5, 6 et 7 présentent l'évolution des courbes d'écoulement pour des valeurs du rapport adimensionnel longueur sur diamètre de la filière (L_f/D_f) de 1.5, 2 et 3 et à des taux d'humidité W respectivement de 40, 36 et 38 % pour KA, MK et SMB. Les tableaux 1, 2 et 3 présentent également les différents aspects de surface des trois pâtes d'argiles extrudées (KA, MK et SMB) en fonction du rapport géométrique L_f/D_f de la filière et du taux d'humidité W .

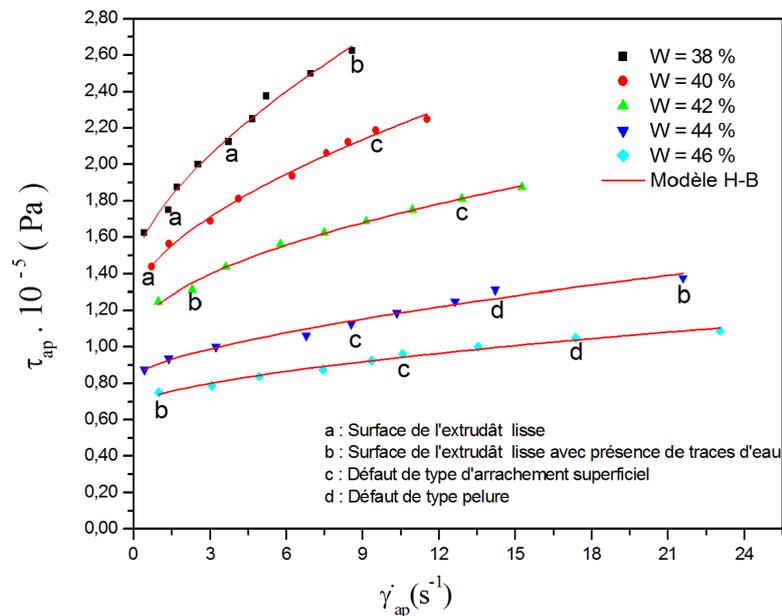


Figure 4: Présentation des courbes d'écoulement et les défauts apparents de la pâte d'argile SMB pour différents teneurs en eau (pH=8.3, T=27 °C, $D_f=20$ mm, $L_f=70$ mm)

Les résultats ainsi obtenus montrent que les courbes d'écoulement ($\tau_{ap}=f(\dot{\gamma}_{ap})$) sont inversement proportionnelles au rapport géométrique L_f/D_f de la filière. En effet, une diminution de la section de la filière de 25 % pour la pâte d'argile KA engendra une chute sensible de la contrainte de cisaillement τ_{ap} de 26 à 36 %. Les mêmes constatations ont été pratiquement faites sur les deux autres pâtes d'argiles, où la diminution de la contrainte de cisaillement apparente était de 21.9 à 26 % pour la pâte d'argile MK et celle de SMB était de 22 à 36 %.

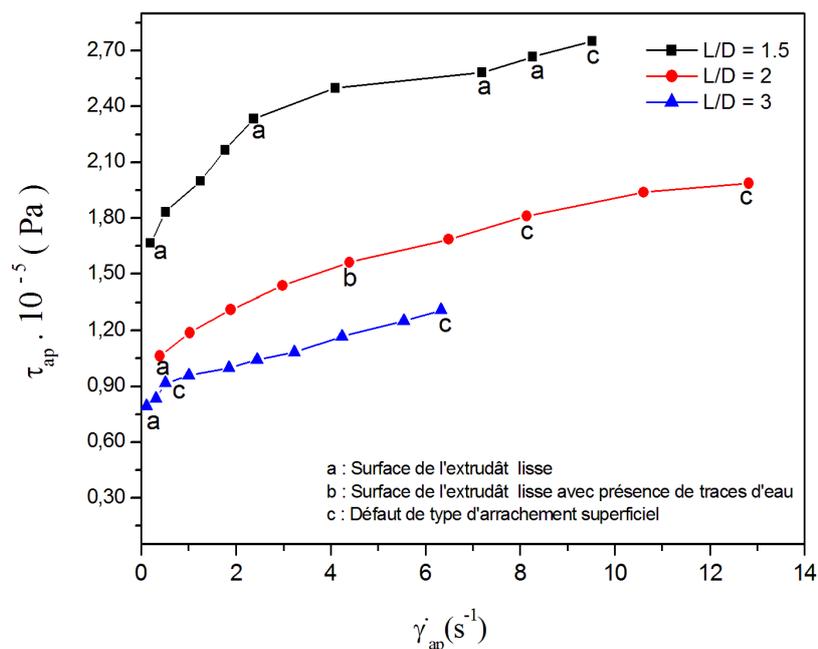


Figure 5: Effet du rapport géométrique de la filière L_f/D_f sur la qualité de l'extrudât de la pâte d'argile KA (W=40 %, $L_f=30$ mm)

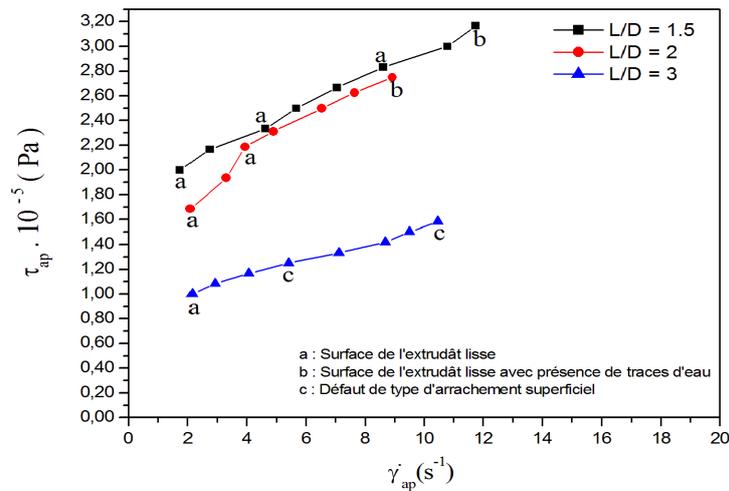


Figure 6: Effet du rapport géométrique de la filière L_f/D_f sur la qualité de l'extrudât de la pâte d'argile MK ($W=36\%$, $L_f=30\text{ mm}$)

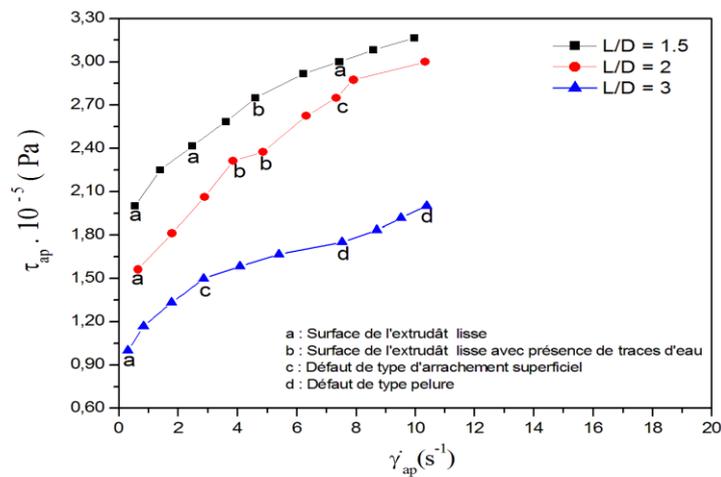


Figure 7: Effet du rapport géométrique L_f/D_f de la filière sur la qualité de l'extrudât de la pâte d'argile SMB ($W=38\%$, $L_f=30\text{ mm}$)

Tableau 1: Présentation des différents aspects de surface des extrudâts de la pâte KA

W=40 %	L_f/D_f	τ_{ap} (kPa)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s^{-1})	Aspects de surface
	1.5		$\in [167.41 - 234.41]$	$\in [0.16 - 2.40]$
		$\in [234.41 - 249.14]$	$\in [2.40 - 4.15]$	Surface de l'extrudât lisse avec présence de traces d'eau
		$\in [249.14 - 266.41]$	$\in [4.15 - 8.33]$	Surface de l'extrudât lisse
		$\in [266.41 - 275.27]$	$\in [8.33 - 9.54]$	Défaut de type d'arrachement superficiel
2		$\in [106.25 - 156.45]$	$\in [0.4 - 4.39]$	Surface de l'extrudât lisse
		$\in [156.45 - 180.92]$	$\in [4.39 - 8.14]$	Surface de l'extrudât lisse avec présence de traces d'eau
		$\in [180.92 - 199.42]$	$\in [8.14 - 12.8]$	Défaut de type d'arrachement superficiel
3		$\in [78.05 - 91.12]$	$\in [0.12 - 0.52]$	Surface de l'extrudât lisse
		$\in [91.12 - 130.76]$	$\in [0.52 - 6.30]$	Défaut de type d'arrachement superficiel

Tableau 2: Présentation des différents aspects de surface des extrudats de la pâte MK

W=36 %	L_f/D_f	τ_{ap} (kPa)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s ⁻¹)	Aspects de surface
	1.5		∈[200-284.65]	∈[1.70-8.64]
		∈[284.65-315.99]	∈[8.64-11.75]	Surface de l'extrudat lisse avec présence de traces d'eau
2		∈[167.79-219.36]	∈[2.16-3.94]	Surface de l'extrudat lisse
		∈[219.36-275.40]	∈[3.94-8.94]	Surface de l'extrudat lisse avec présence de traces d'eau
3		∈[98.61-125.47]	∈[2.21-5.40]	Surface de l'extrudat lisse
		∈[125.47-158.4]	∈[5.4-10.50]	Défaut de type d'arrachement superficiel

Tableau 3: Présentation des différents aspects de surface des extrudats de la pâte SMB

W=38 %	L_f/D_f	τ_{ap} (kPa)	$\dot{\gamma}_{ap}$ (s ⁻¹)	Aspects de surface
	1.5		∈[199.6-241.21]	∈[0.56-2.47]
		∈[241.21-274.75]	∈[2.47-4.6]	Surface de l'extrudat lisse avec présence de traces d'eau
		∈[274.75-299.97]	∈[4.60-7.52]	Surface de l'extrudat lisse
2		∈[156.19-231.33]	∈[0.64-3.82]	Surface de l'extrudat lisse
		∈[231.33-275.27]	∈[3.82-7.33]	Surface de l'extrudat lisse avec présence de traces d'eau
		∈[275.27-298.93]	∈[7.33-10.4]	Défaut de type d'arrachement superficiel
3		∈[99.9-133.97]	∈[0.38-1.80]	Surface de l'extrudat lisse
		∈[133.97-167.5]	∈[1.80-5.42]	Défaut de type d'arrachement superficiel
		∈[167.5-200.38]	∈[5.42-10.4]	Défaut de type pelure

Quant aux photos (a), (b), (c), (d) et (e) de la figure 8 ci-après, elles présentent les résultats des essais de visualisation photographique des aspects de surface des extrudats des trois pâtes d'argiles considérées, menés sur des filières axisymétriques en acier de différents diamètres D_f (10, 15 et 20 mm). L'examen de ces résultats montre clairement que l'apparition des défauts de surface dépend étroitement de la diminution du rapport géométrique de la filière (L_f/D_f). Des résultats pratiquement similaires ont été obtenus sur des pâtes à base d'argiles et du sable [25] et sur des pâtes d'argiles [28].

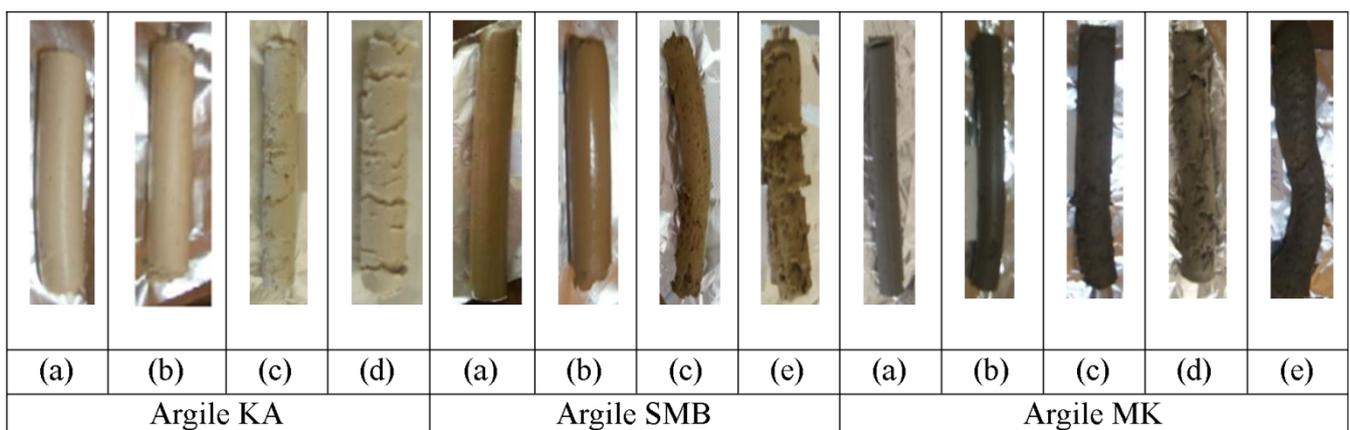


Figure 8: Présentation photographique des défauts de surface des trois extrudats de pâtes d'argiles étudiées: (a) Surface de l'extrudat lisse, (b) Surface de l'extrudat lisse avec traces d'eau, (c) Défaut de type arrachement superficiel, (d) Défaut de type pelure, (e) Défaut de type tronc de palmier

3.3. Rhéologie des pâtes

Les courbes d'écoulement expérimentales ($\tau_{ap}=f(\dot{\gamma}_{ap})$) des trois types de matériaux étudiés à l'état pâteux (KA, MK et SMB), obtenus par extrusion sous l'effet de la compression par piston, pour une marge de teneurs en eau

variable pour chaque matériau (voir partie 3.1), ont été modélisées à l'aide du logiciel Carri50. L'analyse rhéologique des résultats de modélisation, regroupés sur le tableau 4, a montré que le modèle rhéologique le mieux adapté, pour les trois extrudats obtenus, est celui de Herschel-Bulkely (H-B) [37], sous sa forme unidimensionnel, donné par l'équation 3 suivante, dont les valeurs du coefficient de corrélation R^2 sont très satisfaisantes ($R^2 > 0.99$).

$$\tau = \tau_0 + k.\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

où,

τ : contrainte de cisaillement apparente à la paroi (Pa), τ_0 : contrainte seuil de cisaillement (Pa), k: indice de consistance (Pa.s), $\dot{\gamma}_{ap}$: vitesse de cisaillement apparente (s^{-1}).

Tableau 4: Paramètres du modèle Herschel-Bulkley (H-B) des trois extrudats obtenus

Matériau	W (%)	R^2	τ_0 (Pa)	k (Pa.s)	n
KA	40	0.998	76763	25815	0.5443
	44	0.998	61380	17595	0.4382
	46	0.998	56515	12369	0.4839
	48	0.998	49255	10986	0.3993
	50	0.998	39671	8301	0.3762
MK	36	0.996	182574	162882	0.2853
	40	0.996	165584	58571	0.4990
	44	0.996	163930	20632	0.5391
	46	0.996	132569	15256	0.5790
SMB	38	0.990	141374	32077	0.6272
	40	0.990	123556	25083	0.5817
	42	0.990	101482	21958	0.5041
	44	0.990	82971	7823	0.6468
	46	0.990	67056	6736	0.5940

3.4. Migration de la phase liquide

Dans le cas du procédé d'extrusion des pâtes d'argiles, les travaux de Bonbow et Bridgwater (1993) [38] ont montré que le phénomène de migration de la phase liquide est fortement lié au mécanisme de filtration de cette phase au travers le milieu granulaire poreux de la pâte d'argile en question. Cette filtration se produit sous l'effet d'un gradient de pression qui règne dans la filière et ainsi le fluide a tendance à s'introduire à l'intérieur du squelette de l'extrudât. Les observations expérimentales montrent souvent des gouttes de fluide sortant par la filière et la présence de traces d'eau à la surface des extrudats [38]. Par ailleurs, d'après Yaras *et al.* (1994) [39], l'interprétation du phénomène de migration de la phase liquide, repose sur l'existence d'un cycle dans lequel le fluide filtre et assèche ensuite le mélange dans la filière ; ce qui engendre une augmentation de la pression d'extrusion et renforce donc la filtration. Il se forme, par conséquent, un « mat » solide dans la filière, qui finit par être chassé sous très forte pression et le cycle recommence. En plus, le mécanisme d'infiltration peut également présenter des hétérogénéités qui sont induites par l'écoulement du fluide de la phase liquide vers la phase solide [9].

En effet, nous avons réalisé une série d'expériences sur le matériau KA à des teneurs en eau W différentes de 42, 46 et 50 % et à des pressions variables de 4, 9 et 11 bars respectivement. Pour cela, nous avons effectué huit prélèvements de l'extrudât de la pâte d'argile KA, à 3 cm par rapport au gueulard de l'extrudeuse le long du diamètre. Dans les deux sens de la section de la pâte extrudée et pour chaque prélèvement, la teneur en eau a été évaluée. Le tracé de la teneur en eau en fonction de la position horizontale des prélèvements donne accès au profil des teneurs en eau W (Figure 9).

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 9. Il en ressort que la teneur en eau augmente en allant de la paroi vers l'axe du cylindre de l'extrudeuse, c'est-à-dire que les teneurs en eau les plus élevées se retrouvent au centre de l'axe du cylindre, tandis que les moins se concentrent près de la paroi. Ceci témoigne l'existence d'une migration de la phase liquide au travers le squelette du matériau extrudé et ce, de la paroi vers l'axe de l'écoulement de la pâte. Cette typologie d'écoulement des pâtes d'argiles a été confirmée par les travaux de

Rough et al. (2000) [18], Martin et al. (2006) [15], Mascia et al. (2006) [19], Patel et al. (2009) [17] et Khelifi et al. (2013) [14], qui ont montré que lorsque le piston coulissant de l'extrudeuse se déplace, il se produit un frottement à l'interface pâte-paroi et la force de frottement résultante va créer, par conséquent, un gradient de pression et une contrainte de cisaillement à l'intérieure de l'extrudeuse, provoquant ainsi la migration d'eau à travers les grains de la pâte d'argile.

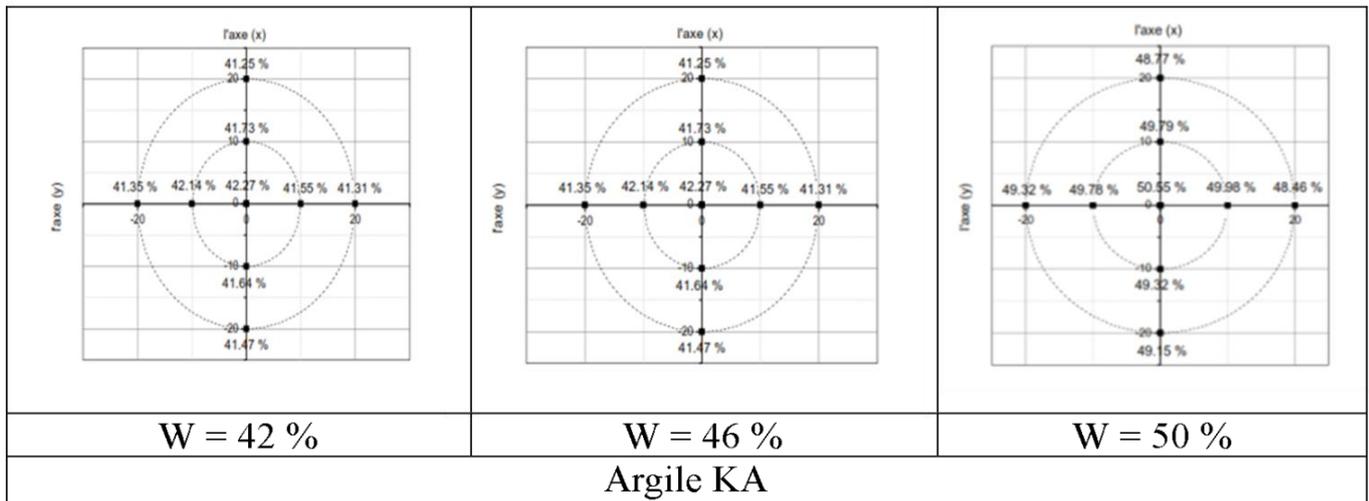


Figure 9: Schéma représentatif des mesures de la migration d'eau des points de prélèvement à 3 cm par rapport au gueulard pour la pâte d'argile KA

Conclusion

Notre étude s'est axée sur la description des défauts d'extrusion des pâtes d'argiles à travers la visualisation photographique des aspects de surface des extrudats et le suivi d'une façon continue du processus d'apparition des défauts jusqu'à la rupture du produit final. Pour cela, un appareil d'extrusion à piston a été développé pour étudier les différents paramètres responsables du déclenchement des défauts lors de l'extrusion de trois types d'argiles à l'état brut. Les résultats des essais d'extrusion ont montré que l'évolution des défauts d'extrusion des trois pâtes d'argiles étudiées est complexe et mal définie vis-à-vis de l'évolution de la teneur en eau. En effet, il existe une teneur en eau à la limite de plasticité au-dessous de laquelle le phénomène d'extrusion est impossible. Les résultats obtenus ont aussi indiqué que durant le processus d'extrusion, la contrainte de cisaillement croit considérablement avec la diminution de la teneur en eau. Par ailleurs, il a été noté que le rapport géométrique de la filière a une influence directe sur le seuil d'écoulement et il joue un rôle déterminant dans l'apparition des défauts. Ces derniers sont incités par l'augmentation du cisaillement à la sortie de la filière, l'atténuation et la relaxation des instabilités le long de la filière. Enfin, les résultats expérimentaux ont révélé également que durant l'extrusion, la migration radiale de la phase liquide vers la phase solide des pâtes d'argiles peut se produire et elle est beaucoup plus importante pour des teneurs en eau supérieures à la limite de plasticité. De même, pour les différentes teneurs en eau des trois pâtes d'argiles étudiées, les courbes d'écoulement suivent convenablement le modèle rhéologique d'Herschel-Bulkely.

En perspectives de cette étude, il serait intéressant de procéder à une analyse de l'influence de la granulométrie et de la tribologie des pâtes d'argiles.

Remerciements-L'ensemble des auteurs remercie vivement l'Université des Sciences et de la Technologie « Mohamed Boudiaf » d'Oran, Algérie, pour son appui financier et son support technique et scientifique, qui ont conduit considérablement à l'aboutissement de ce travail de recherche.

Références

1. Zhou X., Li Z., Fan M., Chen H., *Cement Concrete Comp.* 37 (2013) 304-311.
2. Aouadja F.Z., Mimoun M., Doutsen A., Laquerbe M., *Mater. Struct.* 30 (1997) 561-565.
3. Enric C.S., Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble (2006), France.
4. Perrot A., Lanos C., Melling Y., *Rheol. Acta* 46 (2007) 1065-1073.

5. Vitorino Y., Ribeiro M.J., Abrantes J.C.C., Labrincha J.A., Frade J.R., *Ceram. Int.* 40 (2014) 14543-14547.
6. Azzolini A., Sglavo V.M., Downs J.A., *J. Adv. Ceram.* 3(1) (2014) 7-16.
7. Vitorino N., Freitas C., Ribeiro M.J., Frade J.R., *J. Appl. Clay Sci.* 101 (2014) 314-319.
8. Molard J.P., Camps J.P., Laquerbe M., *Mater. Struct.* 20 (1987) 44-50.
9. Malet J.P., Remaitre A., Ancey C., Locat J., Meunier M., Maquaire O., *Rhéologie*, 1 (2002) 17-25.
10. Lusting-Gustafsson C., Kaure-Johal H., Podczeck F., Newton J. M., *Eur. J. Pharm. Sci.* 8 (1999) 147-152.
11. Tomer G., Newton J.M., *Int. J. Pharm.* 182 (1999) 71-77.
12. Kaci A., Racineux G., Chaouche M., 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août (2007), France.
13. Perrot A., Lanos C., Estelle P., Melling Y., *Rheol. Acta* 45 (2006) 457-467.
14. Khelifi H., Perrot A., Lecompte T., Rangeard D., Ausias G., *Powder Technol.* 249 (2013) 258-268.
15. Martin P.J., Wilson D.I., Bonnett P.E., *Powder Technol.* 168 (2006) 64-73.
16. Yu A.B., Bridgwater J., Burbidge A.S., Saracevic Z., *Powder Technol.* 103 (1999) 103-109.
17. Patel M.J., Wedderburn J., Blackburn S., Wilson D.I., *J. Eur. Ceram. Soc.* 29 (2009) 937-941.
18. Rough S.L., Bridgwater J., Wilson D.I., *Int. J. Pharm.* 204 (2000) 117-126.
19. Mascia S., Patel M.J., Rough S.L., Martin P.J., Wilson D.I., *Eur. J. Pharm. Sci.* 29 (2006) 22-34.
20. Nowotynska I., Smykla A., *J. Mater. Process. Tech.* 209 (2009) 1943-1949.
21. Combeaud C., Demay Y., Vergnes B., *Rhéologie* 4 (2003) 50-57.
22. Combeaud C., Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris (2004), France.
23. Goutille Y., Raveyre C., Guillet J., *Rhéologie* 1 (2002) 40-50.
24. Vergnes B., *Rhéologie* 25 (2014) 1-25.
25. Beaumel C., Thèse Doctorat, INPG de Grenoble (1998), France.
26. Robert L., Thèse de doctorat, Université Sophia-Antipolis de Nice (2001), France.
27. Lebaal N., Thèse de doctorat, Université de Lorraine (2007), France.
28. Amarasinghe A.D.U.S., Wilson D.I., *Trans IChemE* 76(A) (1998) 3-8.
29. Combeaud C., Vergnes B., Merten A., Hertel D., Munstedt H., *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 145 (2007) 69-77.
30. El Kissi N., Piau J.M., Toussaint F., *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 68 (1997) 271-290.
31. Kulikov O.L., Hornung K., *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 107 (2002) 133-144.
32. Lisa Welles B. E., Ph.D., University of Wollongong (2002), Australia.
33. Domanti A.T.J., Bridgwater J., *Trans IChemE* 78 (2000) 68-78.
34. Brunello J.-M., Recherche technique charbon, Rapport final de la commission européenne (1997), Luxembourg.
35. Kuder K.G., Shah S.P., 16th European Conference of Fracture : Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, Alexandroupolis, Greece, July (2006) 479-484.
36. Muksing N., Nithitanakul M., Graby B.P., Magaraphan R., *Polym. Test.* 27 (2008) 470-479.
37. Herschel W.H., Bulkely R., *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, 26 (1926) 621-633.
38. Benbow J., Bridgwater J., Larendon Press, Oxford (1993), UK.
39. Yaras P., Kalyon D., Yilmazer U., *Rheol. Acta* 33 (1994) 48-59.

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>