

# APPROCHE D'EVALUATION DE L'APTITUDE A L'EXTRUSION D'UN FLUIDE EPAIS, APPLICATION AUX PATES ARGILEUSES

Par

Abdelkrim AIT-MOKHTAR

Maître de Conférence, Université de la Rochelle, France

## Résumé

*Cette étude comprend deux étapes : d'abord, quantifier l'aptitude à l'extrusion (extrudabilité) d'un fluide épais à base d'argile par l'élaboration de tests réalisables au laboratoire ou sur une chaîne de fabrication industrielle ; puis, pallier à la lourdeur des essais préliminaires d'extrudabilité de pâtes argileuses par un essai de réalisation rapide au plastomètre à plateaux parallèles. La courbe résultante d'un fluide "candidat" à l'extrusion doit s'inscrire, au moins en partie, dans un fuseau traduisant les extrudabilités limites. Une étude de l'analogie des écoulements non viscosimétriques à l'extrudeuse et au plastomètre a permis d'affiner l'exploitation du domaine et l'on peut prédire, voire corriger, les prédispositions du fluide au moulage par extrusion.*

**Mots clés :** fluide épais - argile - extrusion - normalisation - plastomètre - écoulement non viscosimétrique.

## 1 INTRODUCTION

Bien que l'utilisation du procédé d'extrusion soit large et concerne différentes industries (la métallurgie, l'agro-alimentaire, les industries plastique et briquetière), les phénomènes engendrés par l'écoulement du fluide dans les machines demeurent peu maîtrisés [1, 2]. Aussi, l'objectif de cette étude, réalisée au laboratoire GTMa de l'INSA de Rennes, est de cerner l'aptitude à l'extrusion (extrudabilité) de fluides par une approche globale. Ceci permettra de relier ensuite cette extrudabilité à un essai d'écoulement non viscosimétrique au plastomètre à plateaux parallèles non rotatifs, autrement plus simple et rapide que celui de l'extrusion.

On s'intéresse ici plus particulièrement à l'extrusion des produits à base d'argiles pour les industries de la terre cuite ou stabilisée à froid.

## 2 CARACTERISATION DE L'EXTRUDABILITE

Quel que soit le type du produit extrudé, ses diverses qualités à l'utilisation dépendent de la réussite de l'opération d'extrusion. Dès lors, on comprend la nécessité de quantifier l'extrudabilité du produit considéré.

### 2.1 La machine de laboratoire

Dans le cas des produits argileux, les essais sont réalisés sur une machine de modèle réduit qui fonctionne selon le même principe que celui des extrudeuses industrielles utilisées en briqueteries (Figure 1).

### 2.2 Tests élaborés

Ils tiennent compte, pour les uns, des qualités requises du produit fini et, pour les autres, de la morphologie et des propriétés dynamiques de la machine. Ces qualités sont pour le cas présent déduites des exigences des normes AFNOR des produits en terre cuite. Ainsi, les tests sont des mesures réalisées sur des éprouvettes creuses de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Afin d'en faciliter l'analyse, un système de notation est adopté pour transcrire la mesure.

#### 2.2.1 L'aspect du produit

Pour répondre à des exigences de qualité équivalentes à celles des produits en terre cuite, l'aspect est

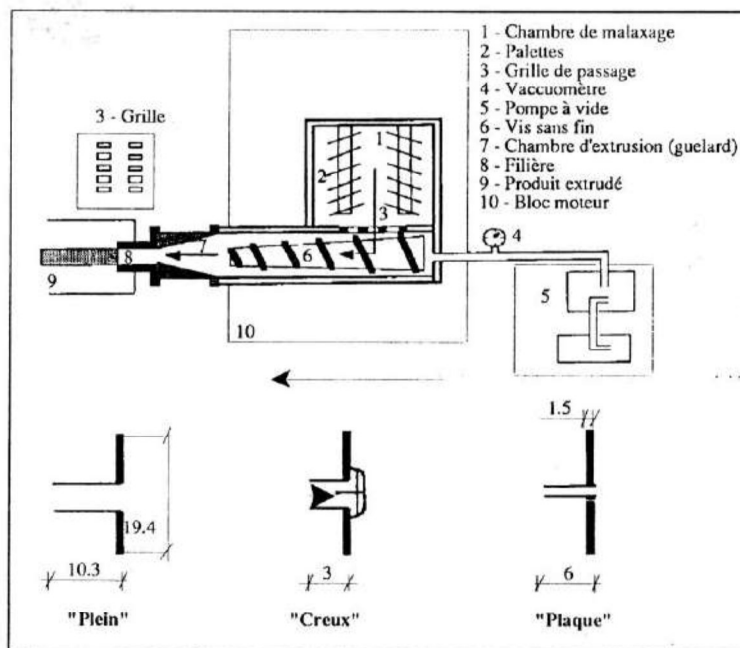


Figure 1 : Schéma de l'extrudeuse du laboratoire avec les filières adaptées (dimensions en cm).

directement lié aux prescriptions des normes NF P 13-301 et suivantes (fissures, cassures, déchirures, etc.) qui suggèrent l'absence de ces défauts sur un minimum de 30% de la production. Les aspects pris en compte sont : les fissures et les déchirures d'arêtes.

#### 2.2.1.1 Fissures

D'une façon pratique, les fissures sont observées et comptées sur 10 éprouvettes prélevées au cours d'une extrusion d'un minimum de 30 éprouvettes. Il sera établi alors le système de notation du tableau 1.

|                    |   |     |   |     |   |     |    |
|--------------------|---|-----|---|-----|---|-----|----|
| Nombre de fissures | 0 | 1   | 2 | 3   | 4 | ... | 10 |
| Note (sur 5)       | 5 | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 | ... | 0  |

Tableau 1 : Notation des fissures.

En rapportant le nombre de fissures admises dans les normes à la longueur minimale observée des briques, le nombre maximal de fissures qui y sera admis sera de 5 pour 10 éprouvettes. La note 2.5/5 sera donc admise comme minimum pour admettre l'extrudabilité.

#### 2.2.1.2 Déchirures d'arêtes

Bien que les deux phénomènes fissures et déchirures d'arêtes soient d'origines différentes, ils ont des apparences semblables et leurs caractères sont analogues. L'évaluation des déchirures d'arêtes que l'on appellera "frisettes" se fera de la même manière que les fissures, avec la même notation minimale.

#### 2.2.2 Conservation de la forme géométrique

Il est question de la planéité et des rectitudes d'arêtes qui peuvent être entamées dans la phase manutention / stockage du produit avant emploi pour les produits stabilisés à froid, et avant cuisson pour la terre cuite.

Les déformations étant permanentes étant donné le caractère plastique prédominant du fluide, la flèche de l'éprouvette est étudiée par analyse dimensionnelle en appliquant le théorème de Vashy-Buckingham, et par suite, en similitude restreinte et distordue [3] avec celle de la brique classique, dont le maximum admis dans les normes est de 5 mm.

On peut écrire :

$$F(f; q; \sigma; E; k; \rho; L) = 0;$$

où :

- $f$  flèche admissible de la brique ou de l'éprouvette appuyée sur deux extrémités (manutention),
- $q$  charge par unité de surface supportée,
- $\sigma$  et  $E$  respectivement, seuil de plasticité et module de Young du fluide, considéré à comportement élastoplastique quelconque,

Pour caractériser les paramètres géométriques :

- $k = \sqrt{\frac{I}{S_t}}$  rayon de giration de la section droite (traduit l'inertie).  $I$  et  $S_t$  respectivement moment quadratique et surface totale de la section droite,
- $L$  longueur du produit,
- $\rho$  poids volumique apparent :  $\rho = \rho_s \frac{S_n \cdot L}{S_t \cdot L} = \rho_s \frac{S_n}{S_t}$  ( $S_n$  section droite nette,  $S_t$  totale, et  $\rho_s$  poids volumique absolu du fluide au sortir de l'extrudeuse).

La matrice dimensionnelle donne la forme générale des termes en  $\Pi$  :

$$\Pi_i = f^r \cdot q^s \cdot \sigma^t \cdot E^u \cdot k^v \cdot \rho^w \cdot L^x$$

Afin de dimensionner l'éprouvette correspondant à la brique, on prend comme variables principales  $f$ ,  $q$  et  $L$ , et répondant à la condition d'adimensionnalité des termes en  $\Pi_i$ , on écrit :

$$\Pi_i = f^{2i+2u+w-v} \cdot q^{-i-v-w} \cdot \sigma^t \cdot E^u \cdot \rho^w \cdot L^{-2i-2u} \cdot k^v$$

$$\Pi_i = \left( \frac{k}{f} \right)^v \left( \frac{f \cdot p}{q} \right)^w \left( \frac{\sigma \cdot f^2}{q \cdot L^2} \right)^t \left( \frac{E \cdot f^2}{q \cdot L^2} \right)^u$$

En simplifiant, le comportement de la brique peut être décrit par :

$$G \left( \frac{k}{f} ; \frac{f \cdot p}{q} ; \frac{\sigma \cdot f^2}{q \cdot L^2} ; \frac{E \cdot f^2}{q \cdot L^2} \right) = 0.$$

En affectant d'un signe (\*) les paramètres concernant la brique, les produits  $\Pi_i$  (épreuve) et  $\Pi_i'$  (brique) doivent respecter les échelles de similitude :

$$\begin{aligned} f' &= \alpha \cdot f ; & q' &= \beta \cdot q ; & \sigma' &= \gamma \cdot \sigma ; & E' &= \epsilon \cdot E ; \\ k' &= \lambda \cdot k ; & p' &= \mu \cdot p ; & L' &= \delta \cdot L \end{aligned}$$

Le fluide étant le même,  $\lambda = \epsilon = 1$ , et ces relations donnent :

$$\beta = \lambda \cdot \mu \quad \text{et} \quad \delta = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}}$$

Les caractéristiques connues sont :

- $H'$ ,  $B'$ ,  $L'$  respectivement hauteur, largeur et longueur du produit industriel et  $H$ ,  $B$ ,  $L$  pour l'éprouvette,
- les caractéristiques de la section droite du produit et de l'éprouvette : épaisseur des parois (0.7 cm pour l'éprouvette) et nombre d'alvéoles (une seule pour l'éprouvette),
- le poids volumique absolu du fluide au sortir de l'extrudeuse, considéré le même dans les deux cas d'extrusion :  $\rho_s' = \rho_s$ . L'expérience montre que  $\rho_s = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ N/cm}^3$ ,
- la flèche du produit industriel  $f$ .

En calculant  $k'$ ,  $p'$ ,  $k$ ,  $r$  ;  $\lambda$  et  $\mu$  sont déterminés, et par suite :

- la flèche admissible de l'éprouvette  $f : f/\lambda$
- la charge qu'elle doit supporter :  
 $q_s = q'/\lambda \cdot \mu - q_e = (k \cdot p/k' \cdot p') \cdot q' - q_e$ . La charge  $q$  est décomposée en poids propre de l'éprouvette et en charge supplémentaire à appliquer sur celle-ci au cours de la mesure de la flèche.
- sa longueur  $L = L' \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} = L' \cdot \sqrt{\frac{\rho' \cdot k}{\rho \cdot k'}}$

#### 2.2.2.1 Généralisation du calcul

En adaptant à la machine du laboratoire des filières de profilés quelconques, mais demeurant à une seule alvéole compte tenu de ses dimensions réduites, on n'aura plus une épaisseur de 0.7 cm, elle sera définie par  $h$  et  $b$  : hauteur et largeur de l'alvéole. Pour des considérations de proportionnalité, il sera admis que :  $H/B = h/b = p$  ;  $p$  étant le coefficient de proportionnalité.

$$k \text{ sera alors défini : } k^2 = \frac{I}{S_1} = \frac{BH^3 - bh^3}{12BH} \text{ et } k'^2 = \frac{k'^2}{\alpha^2}$$

c'est-à-dire :

$$\frac{k'^2}{\alpha^2} = \frac{BH^3 - bh^3}{12BH} = \frac{B^4 p^3 - b^4 p^3}{12B^2 p}$$

d'où :

$$b = \sqrt[4]{B^4 - \frac{12B^2 \cdot k'^2}{p^2 \cdot \alpha^2}} \quad \text{et} \quad h = p \cdot \sqrt[4]{B^4 - \frac{12B^2 \cdot k'^2}{p^2 \cdot \alpha^2}}$$

Il est clair qu'il faut se fixer au préalable  $H$  et  $B$ , se donner une échelle de similitude  $\alpha$ , puis, à partir du produit industriel considéré, déterminer  $h$  et  $b$ . Cependant,  $\alpha$  doit vérifier la condition  $\alpha \geq \alpha_{\min}$ , c'est l'échelle minimale correspondant à  $h = b = 0$  (épreuve de section pleine) :

$$\alpha_{\min} = \frac{2\sqrt{3} \cdot k'}{H}$$

Ces relations montrent que les caractéristiques de l'éprouvette et de l'essai sont définies à partir d'un profilé industriel donné, en fixant les dimensions extérieures de celle-ci et l'échelle des similitudes entre les propriétés d'inertie des sections droites ( $k$  et  $k'$ ).

#### 2.2.2.2 Application aux éprouvettes extrudées

Pour le cas présent, limitons-nous à l'exemple de la brique industrielle de dimensions 20 cm x 20 cm x 40 cm, alvéolée, de 0.7 cm d'épaisseur de paroi ; l'éprouvette extrudée étant de section 4 cm x 4 cm, alvéolée avec la même épaisseur de paroi. Cela donne  $f = 1.36 \text{ mm}$ ,  $q_s = 1.83 \cdot 10^{-2} \text{ N/cm}^2$  et  $L = 15.6 \text{ cm}$ . On retrouve pratiquement l'éprouvette creuse 4 cm x 4 cm x 16 cm sur deux appuis avec la charge supplémentaire  $q_s$ . D'après cette valeur maximale de la flèche, le système de notation du tableau 2 est adopté. Une conversion directe des mesures par la relation :

Note = (5/2.25)(2.25-f) permet l'objectivité de la notation.

| Flèche (mm)  | 0 | 0.45 | 0.90 | 1.35 | 1.80 | 2.25 |
|--------------|---|------|------|------|------|------|
| Note (sur 5) | 5 | 4    | 3    | 2    | 1    | 0    |

Tableau 2 : Notation de la flèche.

#### 2.2.3 Rendement

Il est basé sur la mesure du débit au sortir de l'extrudeuse. Afin de quantifier le rendement, le débit théorique est estimé selon la théorie écrou-vis largement utilisée dans la conception et l'amélioration des machines d'extrusion [4]. Elle consiste à considérer le fluide se déplaçant sans rotation le long de la vis. En pratique, cela revient à mesurer les vitesses de sortie à l'extrudeuse pour les trois profilés définis en figure 1. Les mesures rapportées à la théorie montrent que le rendement obtenu pour les produits pleins concorde avec celui obtenu par Pels Leusden [4] sur une machine spécialement adaptée (18 à 24%). Compte tenu de ces considérations, le tableau de notation sera le sui-

vant, avec comme vitesse minimale admettant l'extrudabilité 20 cm/mn.

| Vitesse (cm/mn) | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 | 80 - 100 | >100 |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|----------|------|
| Note (sur 5)    | 0 - 1  | 1 - 2   | 2 - 3   | 3 - 4   | 4 - 5    | 5    |

Tableau 2 : Notation de la vitesse.

### 3 ETUDE A L'EXTRUDEUSE

Les fluides testés sont confectionnés à base d'une argile traitée : le kaolin d'Arvor (Bretagne Sud), connue pour sa prédisposition au moulage. Différents mélanges sont réalisés, avec la dénomination 80K + 20S + 28E : 80% de kaolin, 20% de sable fin et 28% du mélange total sec d'eau. L'ajout de cendres volantes silico-alumineuses "CV" est effectué pour simuler des extrusions difficiles. Le tableau 4 donne un extrait des résultats.

| Mélanges<br>Note (/20) | Vitesse<br>(cm/mn)<br>note (/5) | Fissures<br>(nombre)<br>note (/5) | Frisettes<br>(nombre)<br>note (/5) | Flèche<br>(mm)<br>note (/5) |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| K+26E<br>11.84         | 18.85<br>0.94                   | 1<br>4.5                          | 6<br>2                             | 0.27<br>4.40                |
| 80K+20S+28E<br>15.65   | 49.00<br>2.45                   | 0<br>5                            | 0<br>5                             | 0.81<br>3.20                |
| 70K+30CV+28E<br>15.64  | 44.4<br>2.22                    | 0<br>5                            | 0<br>5                             | 0.71<br>3.42                |

Tableau 4 : Extrait des résultats de mesures.

#### 3.1 Classification - Analyse en composantes principales

Les résultats ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales afin d'illustrer les extrudabilités des fluides testés par une représentation imagée [5].

Du tableau de données R d'éléments  $r_{ij}$ , on tire les paramètres normés  $X(x_{ij})$ , tels que :

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{np} \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}$$

$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{s_j \sqrt{n}} ; \quad \bar{r}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij} ; \quad s_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)^2$$

après diagonalisation de la matrice  $\{C\} = \{X'\} \cdot \{X\}$ , avec :

$$c_{jj'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ij'} - \bar{r}_{j'})}{s_j s_{j'}}$$

on a les coordonnées des n points individus (fluides) sur l'axe  $u_\alpha$  :

$$v_\alpha = \{X\} \cdot u_\alpha ;$$

(l'abscisse du point individu i :  $v_{\alpha i} = \sum_{j=1}^p u_{\alpha j} \cdot x_{ij}$ )

et les coordonnées des p points variables sur le  $\alpha^{\text{ème}}$  axe d'inertie :  $u_\alpha \cdot \sqrt{\lambda_\alpha}$ .

D'où la représentation de la figure 2.

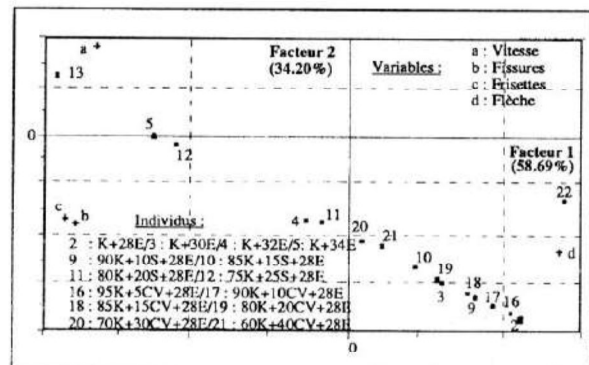


Figure 2 : Représentation graphique individus-variables en ACP.

#### 3.2 Analyse des résultats

Il est à noter d'abord que les premiers pourcentages d'inertie sont très élevés (92.89%) à cause d'une part de la faiblesse relative des dimensions du tableau et, d'autre part, des propriétés peu variées analysées : concentration du nuage des individus (fluide).

La position des variables (paramètres des tests) sur le premier axe montre que les paramètres "fissures" et "frisettes" sont corrélés positivement et les paramètres "vitesse" et "flèche" inversement proportionnels.

Cette analyse de données sert surtout à mettre en évidence les extrudabilités similaires des fluides regroupés sur la figure. A titre d'exemple : "K + 30E" et "80K + 20CV + 28E" d'une part, et "K + 32E" et "80K + 20S + 28E" d'autre part.

Comme les performances d'un fluide à l'extrusion sont fonction de son "rapprochement" de l'ensemble des variables, on voit que "K + 26E", peu prédisposé à l'extrusion, est le plus éloigné (hors figure 2), contrairement à "K + 32E" le plus rapproché. Ce dernier est alors considéré comme le fluide optimum. Quant à la distinction des fluides d'extrudabilité limite, il suffit de se référer aux limites imposées à chaque paramètre (Figure 3) : elles sont représentées par les fluides "K + 28E" et "K + 34E". Le premier est borné par les exigences de rendement, le second par celles de stabilité de la forme.

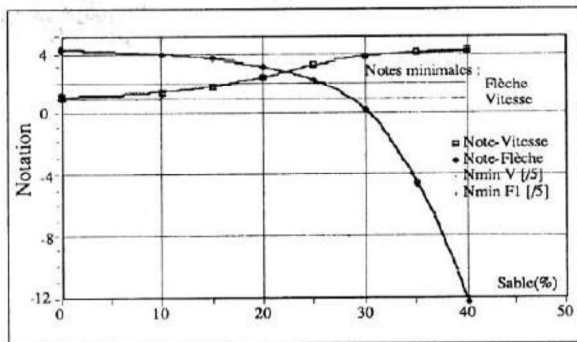


Figure 3 : Extrudabilités limites.

#### 4 ETUDE AU PLASTOMETRE A PLATEAUX PARALLELES

L'objectif est de traduire les extrudabilités des fluides par des données qui leurs sont intrinsèques. Il s'agit alors d'étudier leurs comportements.

##### 4.1 Choix du plastomètre

Il existe divers types d'appareils pour l'étude des fluides selon le caractère prédominant de ceux-ci. Etant donnée la composition grossière des fluides argileux, ce sont les appareils à écoulement non viscosimétrique qui y sont adaptés. Le choix du plastomètre est justifié par le type d'écoulement engendré ainsi que par la rapidité et la simplicité de l'essai. L'appareil utilisé est un plastomètre à plateaux circulaires coaxiaux et parallèles, animés d'un mouvement de translation permettant leur rapprochement.

##### 4.2 Principe de l'étude

L'échantillon de fluide placé entre les deux plateaux est mis en compression et s'échappe radialement.  $F$  est l'effort enregistré en fonction de la hauteur entre plateaux  $h$  (Figure 4).

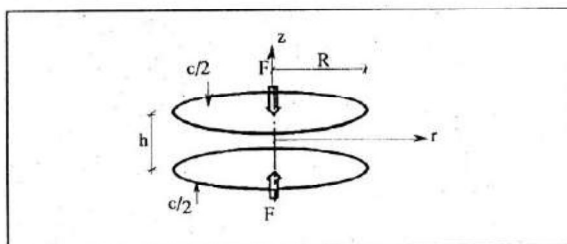


Figure 4 : Géométrie du plastomètre.

##### 4.3 Essais et analyses

###### 4.3.1 Elaboration du fuseau

Les différents fluides déjà extrudés ont fait l'objet d'essais au plastomètre. Ces essais sont menés à vitesse de rapprochement constante (0.5 mm/s), l'influence de la vitesse étant négligeable sur les courbes obtenues [2].

Ils montrent que les courbes  $F(h)$  correspondant aux fluides extrudables s'incrivent dans un fuseau présenté figure 5.

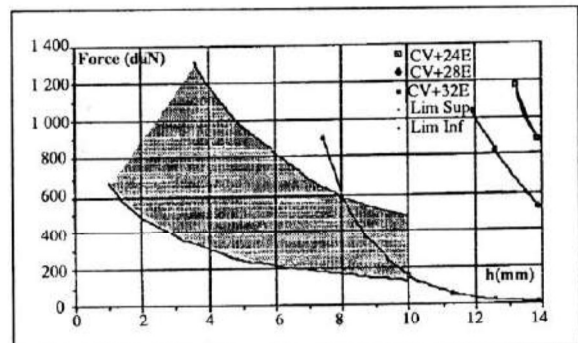


Figure 5 : Domaine d'extrudabilité (fuseau).

##### 4.3.2 Exploitabilité - Limites

Des fluides fermes sont confectionnés afin d'étudier l'exploitabilité du fuseau. Ceci se traduit essentiellement par l'utilisation d'ajouts : les cendres volantes silico-alumineuses sont parmi ceux qui modifient fortement le comportement rhéologique du fluide à base de kaolin (Figure 5). Au plastomètre, la courbure s'accroît avec le pourcentage de cendres et les courbes s'en trouvent n'appartenir que partiellement au fuseau. A l'extrudeuse, le manque de plasticité de celles-ci et leur caractère abrasif font croître la difficulté de l'opération malgré le fort dosage en eau des mélanges. Le passage par différentes filières atteste d'extrudabilités fonctions entre autre du facteur de réduction de celles-ci, d'où l'idée de comparer les deux types d'écoulements.

#### 5 RELATION EXTRUDEUSE-PLASTOMETRE

##### 5.1 Approche théorique

Une approche de caractérisation du comportement du fluide peut permettre de relier les paramètres externes de l'extrudeuse et du plastomètre. Limitons-nous à un écoulement isotherme d'un fluide incompressible, isotrope, à dilatabilité négligeable et présentant un caractère adhérent ou glissant à la paroi. Faisons le bilan énergétique en reliant le taux de dissipation d'énergie aux puissances de mises en écoulement [6] :

$$\Gamma = f(I_2) ; \Gamma \text{ potentiel de dissipation,}$$

$$I_2 \text{ second invariant du tenseur taux de déformation.}$$

On peut écrire :

$$\sigma_{ij}^{(d)} = \frac{\partial \Gamma}{\partial I} \cdot D_{ij} \quad \text{avec} \quad D_{ij} = \frac{1}{2} (V_{ij} + V_{ji}), \quad I_2 = \frac{1}{2} \cdot D_{ij} \cdot D_{ji}$$

où :  $V$  vitesse d'une particule de fluide,  
 $D_{ij}^{(d)}$  élément du tenseur taux de déformation.



Le taux de dissipation d'énergie est :

$$\sigma_{ij}^{(d)} \cdot D_{ij} = 2 \cdot I_2 \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial I_2}$$

sur tout le volume, il vient :

$$P = \int_V 2 \cdot I_2 \frac{\partial \Gamma}{\partial I_2} \cdot dv$$

La fonction étant continue, le théorème de la moyenne donne :

$$P = 2 \cdot \bar{I}_2 \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial I_2} \right)_{(I_2 = \bar{I}_2)} \cdot V$$

$\sqrt{\bar{I}_2}$  taux de déformation moyen.

### 5.2 Etude au plastomètre

Si l'enregistrement d'un essai permet de déterminer, à partir des paramètres externes, l'évolution du gradient du potentiel de dissipation en fonction du taux de déformation moyen, on obtiendra une courbe image indépendante de l'essai. Des études [7] ont montré que pour  $h \ll R$  :

$$\sqrt{\bar{I}_2} = \alpha \cdot \frac{c \cdot R}{h^2}$$

$\alpha = 0.5$  à  $1$  selon le fluide. En paramètres réduits, le repère admis au plastomètre sera donc  $F^* = F \cdot h / \pi \cdot R^3$ , fonction de  $h/R$ .

### 5.3 Etude par simulation de l'extrusion

L'extrusion d'un fluide plastique selon Von Mises est simulée par éléments finis dans les géométries de la figure 6. L'écoulement à travers l'orifice de diamètre  $d$  est induit par un piston de diamètre  $D$  qui génère l'effort de mise en plasticité  $F$ . Ces simulations montrent que :

- il existe une proportionnalité entre l'effort de compression et le seuil de plasticité  $\sigma$ ,

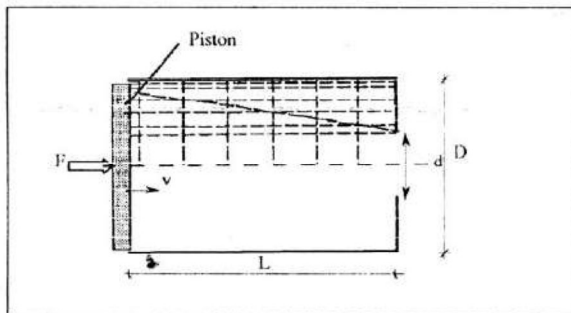


Figure 6 : Géométrie et maillage de l'extrusion.

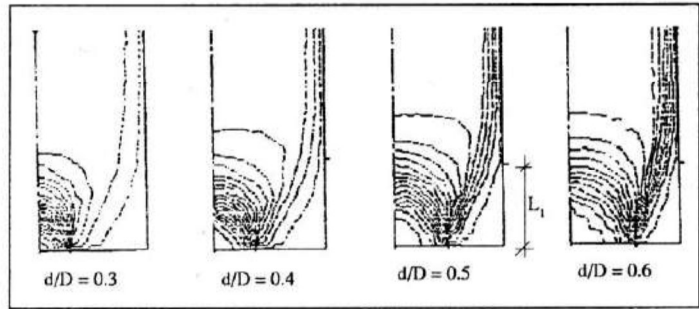


Figure 7 : Incréments de déplacement.

- l'effort d'extrusion est indépendant de  $L$  en condition de glissement parfait,
- le tracé des "iso-valeurs" des incréments de déplacement (Figure 7) atteste que  $L_1$  est quasi constant pour  $0.3 \leq d/D \leq 0.6$  :  $L_1 \approx 0.375 \cdot D$ .

D'après les hypothèses de sommation de Kendall [8], l'écoulement peut être décomposé en deux phénomènes :

- un écoulement simple sur la longueur  $L - L_1$ , dont l'effort est :  $F_s = \pi \cdot \sigma \cdot D \cdot (L - L_1)$ ,
- un autre convergent pour la mise en forme, dont l'effort est obtenu en imposant un glissement parfait aux parois. Dans ce cas, l'allure de la courbe qui traduit l'évolution de  $P/\sigma$  en fonction de  $(1 - d/D)$  est semblable à celle obtenue expérimentalement par Kendall [8] sur les plasticines. Ces résultats semblent également similaires à ceux de Hill [9] pour un problème plan, où il propose la relation  $P/\sigma = 0.5 (\pi + 2)$  pour  $d/D = 0.5$ . En axi-symétrie nous obtenons  $P/\sigma = \pi + 2$ . D'où :  $F = 0.5 \cdot \pi \cdot D \cdot \sigma (\pi + 2) \cdot (1 - d/D)$  pour  $d/D = 0.6$ .

A l'extrusion, le taux de déformation moyen est fonction de  $d$ ,  $D$  et  $v$ . Pour des raisons d'homogénéité, on écrit :

$$\sqrt{\bar{I}_2} = \frac{v}{D} \cdot f(d/D)$$

Le gradient du potentiel de dissipation devient :

$$\frac{F \cdot v}{2 \cdot V} \cdot \frac{1}{\bar{I}_2} = \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial I_2} \right)_{(I_2 = \bar{I}_2)}$$

avec :

$$V = L_1 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

on obtient donc à l'extrusion dans le cas d'un fluide de Von Mises :

$$\sqrt{\bar{I}_2} = \frac{8}{3} \cdot (\pi + 2) \cdot \frac{v \cdot (1 - d/D)}{D}$$

En considérant que deux écoulements sont "équivalents" si leurs taux de déformation moyens sont égaux, une similitude entre les paramètres  $(D-d)D^2$  (à l'extrudeuse) et  $R/h^2$  (au plastomètre) est constatée dans la mesure où  $d/D \leq 0.6$  et  $h/R \ll 1$ . Le paramètre lié à l'extrusion analogue à  $F^*$  serait  $F^\circ = P(1-d/D)$ .

#### 5.4 Analyses

A chaque géométrie d'extrusion correspond une géométrie au plastomètre. Ceci est par ailleurs confirmé expérimentalement par le comportement des mélanges contenant des cendres volantes : leur extrusion n'est possible que pour certains rapports de réduction correspondant à des valeurs de  $h/R$  contenues dans l'intervalle où il y a intersection de leurs courbes  $F(h)$  avec le domaine d'extrudabilité. En conséquence, des corrections sont possibles dès lors qu'un fluide présente des difficultés à être extrudé :

- d'une part, sur le taux de déformation moyen à l'extrudeuse par un ajustement de la vitesse d'extrusion  $v$  ou, plus généralement, sur le produit  $P.v$ ,
- d'autre part, sur le comportement même du fluide en modifiant sa composition par des ajouts dont le rôle est de corriger le seuil de plasticité. Par cette opération, l'interaction fluide-parois de la machine peut également évoluer vers un comportement à l'interface plus favorable. En facilitant le glissement, le taux de cisaillement du fluide s'en trouvera décru, amoindissant ainsi les puissances de mise en écoulement.

#### 6 CONCLUSIONS

Cette étude présente de multiples intérêts :

- d'abord, apporter une formulation au problème de l'extrudabilité des produits à base d'argiles par la mise au point de tests applicables aussi bien en laboratoire que sur une chaîne industrielle. Ils offrent en outre la faculté d'adaptation à divers cas d'extrusion,
- ces mêmes tests ont servi de base à la construction d'un domaine d'extrudabilité au plastomètre, dont l'essai rapide convient à l'étude des fluides fermes en limitant les quantités de matériaux mises en œuvre. Il conditionne ainsi leur exploitation à l'échelle industrielle. Bien que l'élaboration du domaine cible les fluides argileux pour l'industrie

de la terre (cuite ou stabilisée à froid), la démarche demeure intéressante pour d'autres industries utilisant l'extrusion comme procédé de mise en forme.

- l'approche théorique a permis d'affiner l'exploitation du domaine construit en faisant apparaître une correspondance entre les géométries des deux écoulements : à l'extrudeuse et au plastomètre. Il demeure cependant souhaitable d'en systématiser la création par la prise en compte des divers paramètres intervenant dans le comportement du fluide, c'est-à-dire tenir compte par exemple des phénomènes de glissement avec frottement aux parois, dont l'importance est manifeste à la machine d'extrusion. De ceci découleraient les possibilités d'optimisation du procédé d'extrusion ⑤

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.P. Molard, J.P. Camps et M. Laquerbe : "Etude de l'extrusion et de la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales". RILEM, Materials and Structures, n° 20-44-50, 1987.
- [2] C. Bierre : "Caractérisation des pâtes d'argiles". Thèse de Docteur-Ingénieur, INSA Rennes 1985.
- [3] H.L. Langhaar : "Dimensional analysis and theory of models". Edition J. Wileys & sons, New York 1951.
- [4] Van C.O. Pels Leusden : "Über die fließvorgänge in der schneckenpresse". Institut für ziegelforschung essen E.V 1966.
- [5] L. Lebart, J.P. Morineau et J.P. Fenelon : "Traitement des données statistiques-Méthodes et programmes". Edition Dunod, Paris 1979.
- [6] P. Germain : "Mécanique tome II". Edition Ellipses 1986.
- [7] C. Lanos : "Méthode d'identification non viscosimétrique de comportements de fluides". Thèse de Docteur, INSA Rennes 1993.
- [8] K. Kendall : "Interparticle friction in slurries". Tribology in particulate technology, Edition Briscoe & Adam, 91-103, 1987.
- [9] R. Hill : "Mathematical theory of plasticity". Clarendon Press, Oxford 1950.