

### *Chapitre III*

#### *Résultats de la simulation numérique*

##### **3.1 Introduction**

Dans le passé, la prédiction numérique de l'extrusion des polymères était un procédé de grand challenge. Cependant, avec le développement continu et rapide des moyens de calcul et avec le développement des nouvelles techniques numériques, il est maintenant possible de simuler, d'analyser, et d'optimiser les processus d'extrusion de géométries complexes, en tenant compte du comportement non linéaire et viscoélastique du polymère fondu. Avec les simulations numériques, les champs de vitesse, de pression, et de la température à l'intérieur de la matrice d'extrusion peuvent être obtenus, qui est autrement impossible expérimentalement.

La conception du profil de la matrice d'extrusion demeure plus un art étant donné qu'il est très difficile de déterminer la géométrie optimale d'écoulement à partir des calculs technologiques. L'art de la conception de la matrice doit prévoir la forme exigée du canal d'écoulement de la matrice et de la coupe de sa section de sortie afin d'obtenir l'extrudât désiré avec le nombre minimum d'essais.

Le code de calcul, une fois correctement utilisé, réduit au minimum le nombre d'essais nécessaires pour obtenir la forme optimale du canal d'écoulement de la matrice et par conséquent d'accélérer le processus de conception de la matrice. Il est possible de prédire l'écoulement à l'intérieur du canal de la matrice et la forme du profil de vitesse à la lèvre de la matrice avec une bonne précision. La méthode des différences finies et la méthode des éléments finis sont les plus utilisées pour la prédiction de tels écoulements.

La méthode des différences finies est relativement simple à comprendre et de la mettre en oeuvre. De plus, cette technique a des avantages en ce qui concerne le temps et la capacité de calcul de l'ordinateur, par contre il est très difficile de prédire des écoulements à géométries complexes par cette méthode. La méthode des éléments finis est beaucoup

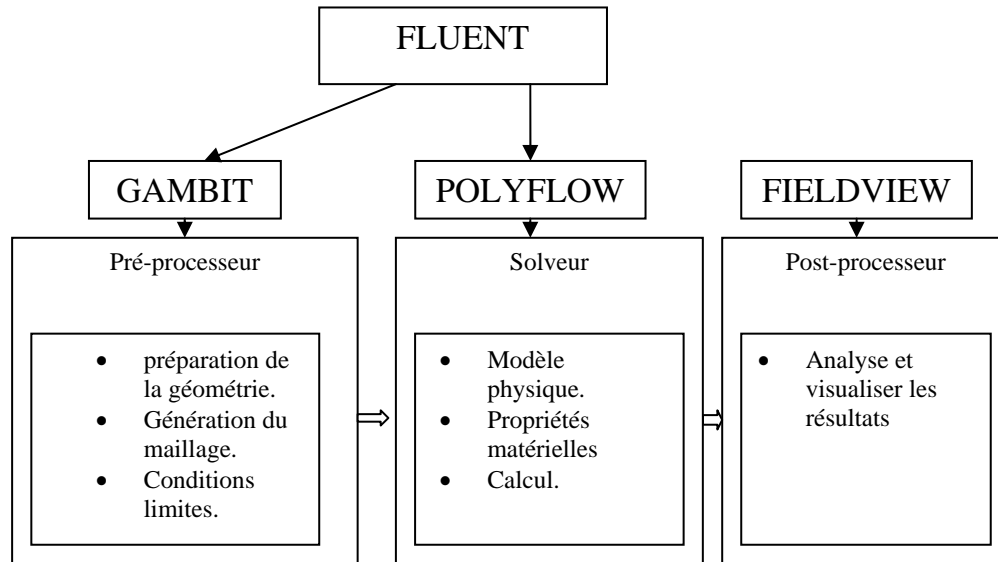
plus difficile, mais le code calcul établit à partir de celle-ci peut prédire des écoulements de géométries complexes.

### **3.2 Code de calcul Polyflow**

Au début les premières simulations numériques de l'extrusion ont été faites pour les plastiques et ont été réalisées à l'aide du code EXTRUD en 1970. Aujourd'hui, différents codes commerciaux sont à la disposition des Ingénieurs et des chercheurs en extrusion à savoir Polyflow, FIDAP, HyperXtrude, Dieflow, Polycad, Flow 2000, Spiralcad, etc., qui permettent de résoudre des problèmes d'écoulement mono, bi et tridimensionnels traversant le canal de la matrice d'extrusion (Vaddiraju 2004). La majorité de ces codes prédit les dimensions du profil final de l'extrudât à partir des dimensions bien données de la matrice (extrusion directe). Par contre il est possible d'obtenir les dimensions de la matrice à partir des dimensions du profil et la forme de l'extrudât (extrusion inverse). Cette caractéristique est possible à travers le code Polyflow. Ce code prédit l'écoulement à l'intérieur de la matrice en donnant toutes les informations sur la température, le champ de vitesse, de pression et la distribution de la contrainte. Ces informations peuvent être utilisées pour développer une nouvelle conception de la matrice ou d'évaluer l'efficacité de la matrice existante. Ceci offre beaucoup de flexibilité en ce qui concerne la géométrie de la matrice, le traitement des conditions, et le matériau peut être facilement changé. Parfois la simulation est la seule manière pour une solution rapide aux problèmes tels que des pertes excessives de pression, l'existence des zones de stagnation, l'écoulement déséquilibré, et le chauffage excessif. Le code Polyflow est conçu pour prédire et analyser l'écoulement des polymères. Ces écoulements peuvent être isothermes ou non-isothermes, bi ou tridimensionnels, stationnaires ou dépendant du temps. Le calcul de tel écoulement est basé sur le calcul de la dynamique des fluides (CFD) non-newtonienne, en résolvant les équations régissant les données en chapitre 2, à savoir les équations de Navier-Stokes, l'équation d'énergie et l'équation constitutive donnant la nature rhéologique du fluide en considération. Le code de calcul Polyflow est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD généralistes qui simule tous les écoulements fluides. Ce code est largement utilisé dans l'industrie polymère, et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel Polyflow modélise par la méthode des éléments finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes.

Il nécessite l'utilisation, comme tout logiciel de type CFD, de deux éléments clés qui sont : le pré-processeur et le post-processeur en plus de son module solveur (Polyflow).

L'organigramme ci-dessous montre l'enchaînement du logiciel POLYFLOW avec les autres logiciels. L'organigramme 3.1, montre l'enchaînement des logiciels de calcul.



**Organigramme 3.1:** Structure de base du code « Polyflow »

### 3.2.1 Pré-processeur GAMBIT

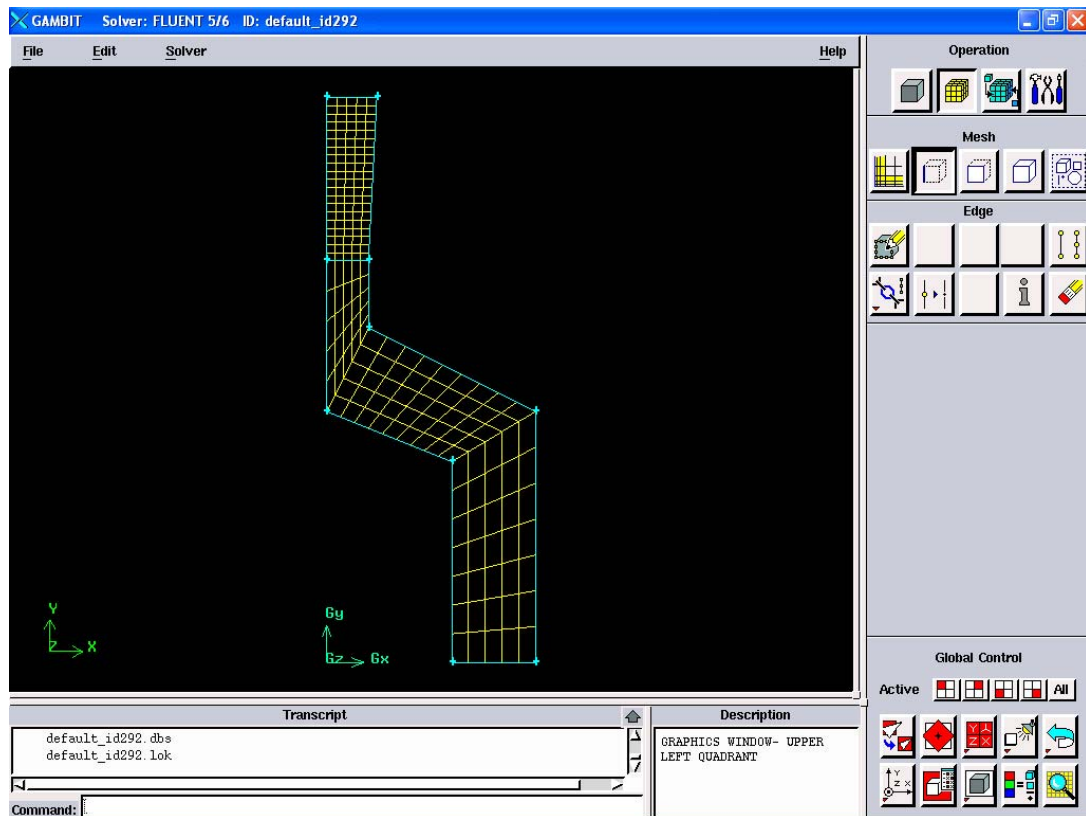
Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau (voir figure 3.2).

### 3.2.2 Solveur POLYFLOW (figure 3.3)

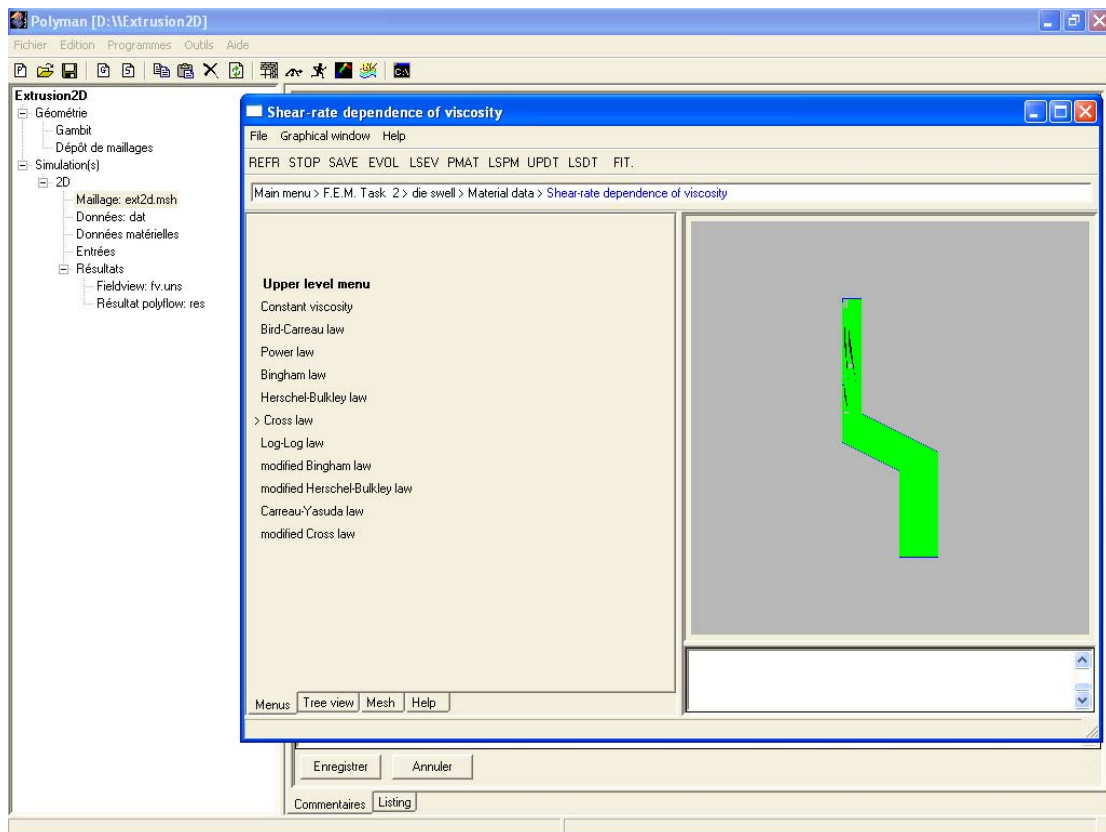
Ce code utilise la méthode des éléments finis pour pouvoir intégrée numériquement les équations aux dérivées partielles régissant le problème en question. Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Discrétisation en espace et en temps des équations : substitution des dérivées partielles par des approximations algébriques ; transformation du système d'équations différentielle en système d'équations algébriques,

- Résolution du système algébrique par un processus itératif de convergence assurée.
- Stockage des résultats obtenu en archive pour pouvoir les visualisé graphiquement par un post-processeur.



**Figure 3.2:** Génération du maillage par Gambit



**Figure 3.3:** Simulation de l'extrusion par le code Polyflow.

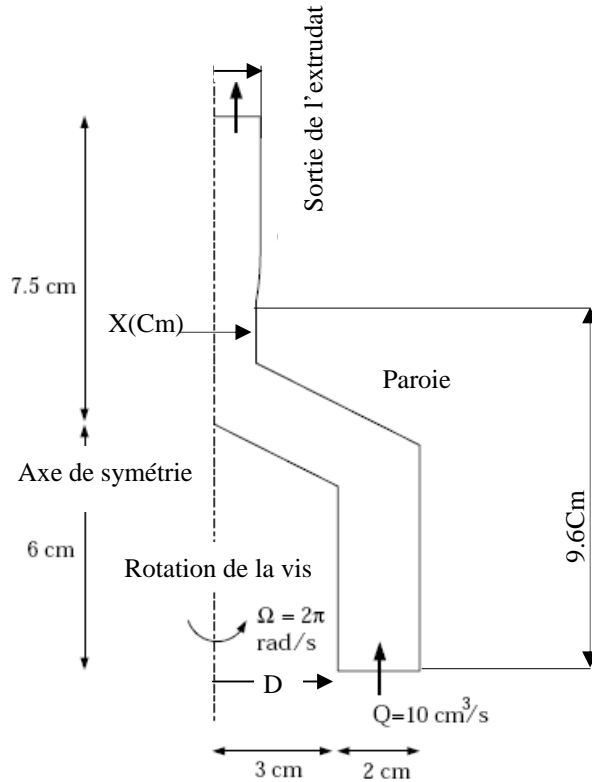
### 3.2.3 Post-processeur FIELDVIEW

Le post-processus est réalisé grâce à l'utilisation du logiciel commercial Fieldview spécialisé en graphisme. Ce dernier permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de pression, ligne de courant, viscosité, contrainte cisaillement...ect.)

### 3.3 Problème à résoudre

Dans ce mémoire on s'intéresse en premier lieu à prédire l'écoulement du polymère de type LDPE (polyéthylène basse densité) qui se trouve à l'état fondu dans une extrudeuse axisymétrique simple et de géométrie bien déterminée (voir figure 3.4). En second lieu, on s'intéresse à améliorer cette extrudeuse et ce par l'étude de l'influence de la géométrie (diamètre d'entrée et diamètre de sortie), du débit d'entrée et de la vitesse de rotation de la vis, sur la viscosité dynamique, la pression et le taux de cisaillement. Ces simulations

numériques ont été conduites pour les différents paramètres influents, voir tableau 3.1. La figure (3.4), présente la partie étudiée de pompage de l'extrudeuse.



**Figure 3.4:** Description du problème

### 3.3.1 Conditions aux limites

Pour résoudre un tel écoulement, nous devons à présent définir les conditions aux limites du système. La figure 3.5 montre assez clairement et définit la nomenclature des limites du système étudié. Six conditions aux limites ont été considérées :

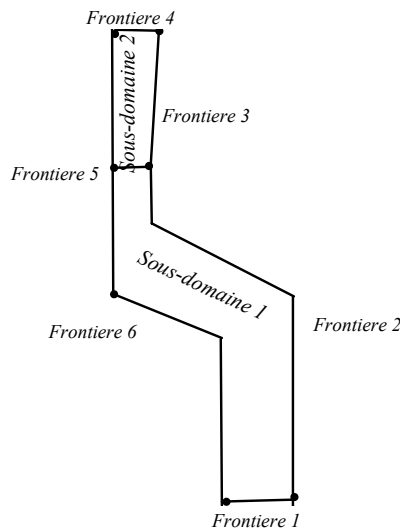
- *L'écoulement à l'entrée (Frontière 1)*, à cette frontière l'écoulement est supposé établi et la fraction à un débit massique constant ( $\partial v / \partial y = 0$  ;  $\partial u / \partial x = 0$ )
- *mur externe (Frontière 2)*, à cette frontière les conditions d'adhérence sont appliquées et les deux composantes de la vitesse  $u=v=0$ .
- *surface libre (Frontière 3)*, c'est une frontière à surface libre de condition à la limite :  

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$$

3.1

Où:  $n$  est vecteur unitaire normale à la surface libre.

- *Écoulement sortie (Frontière 4)*, on considère un profil uniforme de vitesse à la sortie et de ce fait aucune force n'agit sur cette frontière à savoir les forces tangentielle, normale et circonférentielle ( $\sigma_y=0$ ,  $\sigma_x=0$ ,  $\sigma_w=0$ ).
- *la condition de symétrie (Frontière 5)*, pour cette frontière à l'axe de symétrie la vitesse normale et la contrainte tangentielle sont égale à zéro :  $v=0$  et  $\sigma_x=0$ .
- *Vis tournante (Frontière 6)* : à cette frontière le fluide est entraîné par une vitesse de rotation cependant les conditions à cette limite seront :  
 $\Omega=cte$  (vitesse angulaire de rotation) ;  $u=0$  et  $v=0$



**Figure 3.5:** Conditions aux limites

### 3.3.2 Génération du maillage

La discrétisation par éléments finis de la structure (partie pompage-filière) a été réalisée par le logiciel GAMBIT(2004) sous la version 2.2.30. C'est un modèle bidimensionnel, les éléments utilisés sont de types iso paramétriques quadratiques à 4 nœuds. Le nombre d'éléments utilisés est de 451 éléments est de nombre de nœuds de 247 nœuds, voir figure 3.6. Le quadrillage utilisé est un maillage structure d'éléments quadratiques.

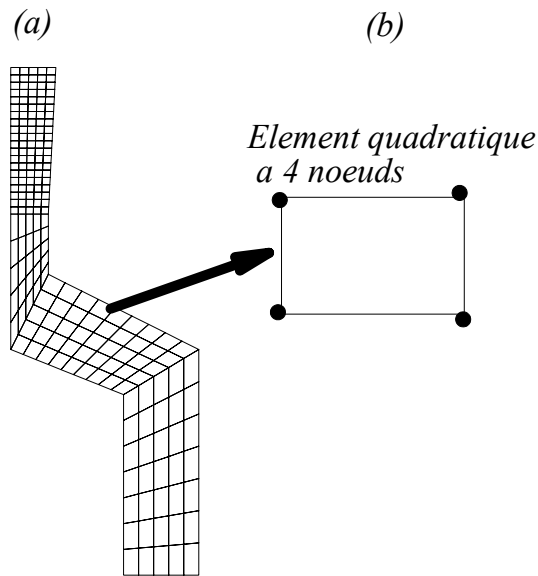


Figure 3.6: Maillage par éléments finis

### 3.4 Résultats et discussions

(I) Pour $d=2\text{cm}$ ; $\omega=2\pi\text{rad/s}$ et $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$	(II) Pour $D=6\text{cm}$ ; $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ ; $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$	(III) Pour $D=6\text{cm}$ ; $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ et $d=2\text{ cm}$	(IV) Pour $d=2\text{ cm}$ ; $D=6\text{ cm}$ ; et $\omega= 2\pi\text{ ras/s}$
D (cm)	d (cm)	$\omega$ (rad/s)	Q (cm <sup>3</sup> /s)
6	1.2	$2\pi$	10
10	1.6	$4\pi$	20
18	2.0	$6\pi$	30
-	2.4	$8\pi$	40
-	2.8	-	-

Tableau 3.1: Paramètres de calcul.

Dans cette section on va présenter les différents résultats issus des prédictions numériques de l'extrusion à travers de la machine présentée dans la figure 3.4 par le code Polyflow. Pour mieux optimiser l'écoulement à travers cette machine on va étudier l'influence des paramètres suivants (voir tableau 3.1) : (I) le diamètre de la vis  $D$  ; (II) le diamètre de sortie la matrice  $d$  ; (III) la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  et (IV) le débit  $Q$ .



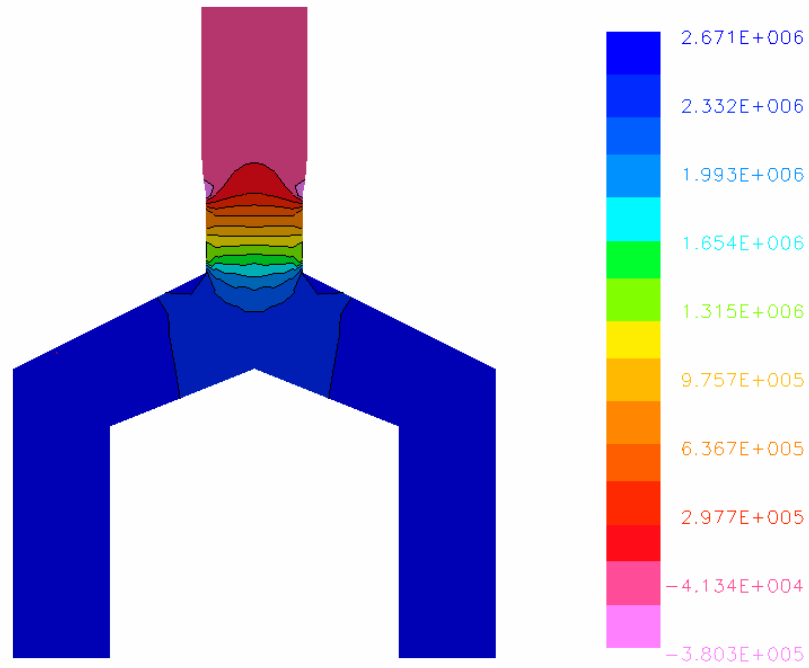
Tout d'abord, on présentera les résultats d'une extrudeuse de caractéristiques ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ ) qu'on la prend comme référence pour mieux comprendre l'influence de chaque paramètre à étudier.

Les calculs du champ de vitesse, de la pression, de la contrainte de cisaillement et de la viscosité dynamique ont été déterminés à la sortie de la filière sur une distance de 9.6 Cm, voir figure 3.4.

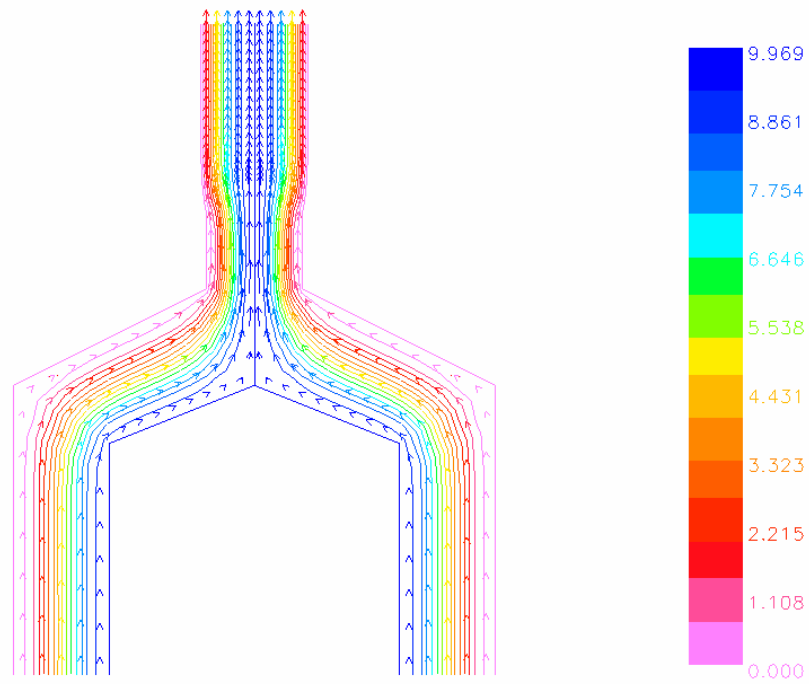
### **3.4 Résultats pour le cas référence ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ , $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ , $D=6\text{cm}$ et $d=2\text{cm}$ ):**

Le matériau fondu entre sous haute pression ( $p_e=26.73 \text{ bar}$ ) et se dirige vers la matrice de l'extrudeuse sous l'effet d'une force de poussée générée par la vis de la machine qui est menée par une vitesse de rotation constante ( $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ). La pression du polymère reste pratiquement inchangeable au cours de son passage dans l'espace annulaire existant entre le fourreau et la vis de section constante comme le montre la figure 3.6, qui visualise le champ de pression et montre clairement que la pression est trop élevée dans la zone de pompage et trop faible à la sortie de la matrice.

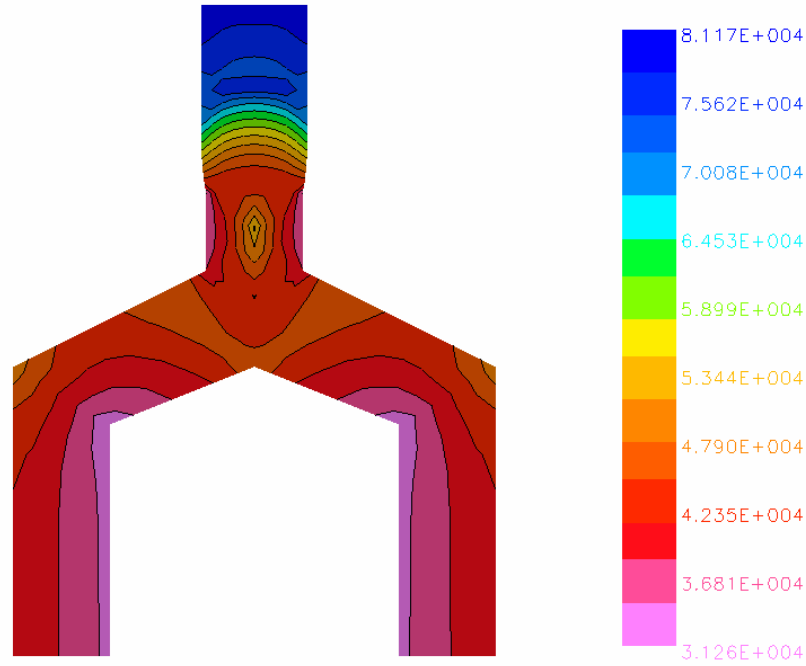
Le nombre de Reynolds est faible, cependant les forces visqueuses dominent sur autres forces. Par suite, l'écoulement est lent et laminaire, et les lignes de courant restent uniformes comme le montre la figure 3.7 sans présence de contre courant ou de tourbillons malgré la présence d'une zone de croisement des courants de directions différentes entre le bout de la vis conique et la matrice.



**Figure 3.6:** La pression ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ )

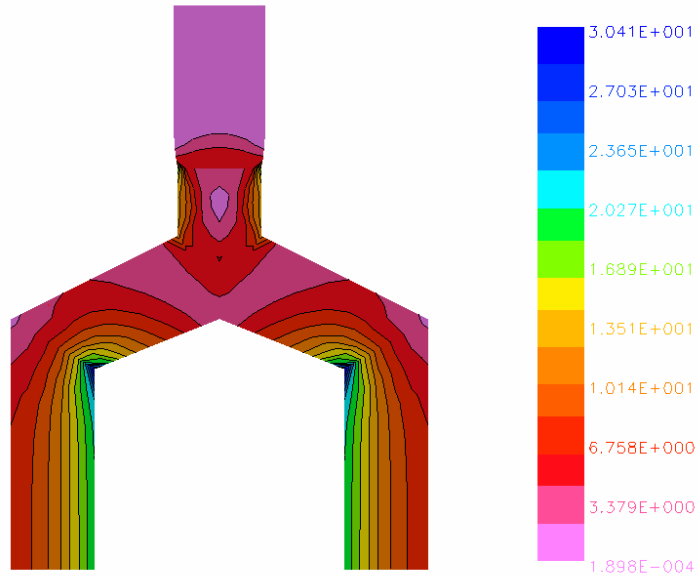


**Figure 3.7:** Champs de vitesse et lignes de Courant ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ )



**Figure 3.8:** Viscosité ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ )

La figure 3.8 visualise les iso-contours de la viscosité et montre que le matériau fondu se caractérise d'une viscosité moyenne de l'ordre  $3.5 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$  dans la zone de pompage et sort de la matrice avec une viscosité plus élevée d'ordre  $8 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$ . La viscosité est faible sous l'effet de la vitesse de rotation, plus le rayon augmente dans la zone de pompage plus la viscosité augmente. D'autre part, sous l'effet d'une haute pression à l'axe de la matrice la viscosité est plus élevée d'ordre de  $5 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$  et se décroît progressivement plus on éloigne de l'axe jusqu'à elle devienne d'ordre  $3.7 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$  à la frontière solide de la matrice. La viscosité du produit générée croît plus on s'éloignant de la sortie de la matrice de la valeur  $4.2 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$  jusqu'à elle atteint la valeur  $8.11 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$ .

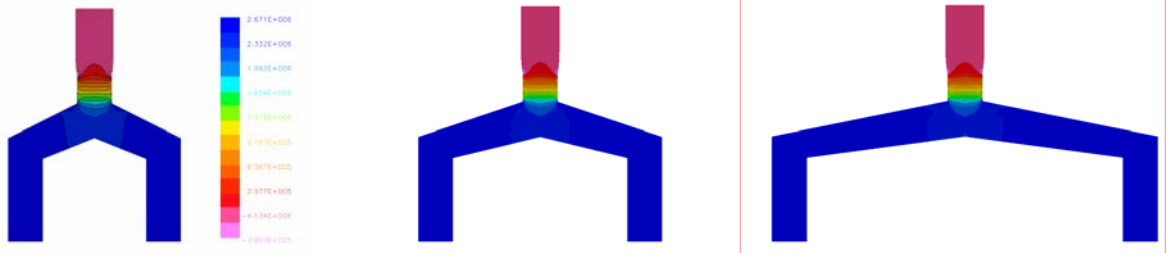


**Figure 3.9:** Contrainte de cisaillement ( $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ )

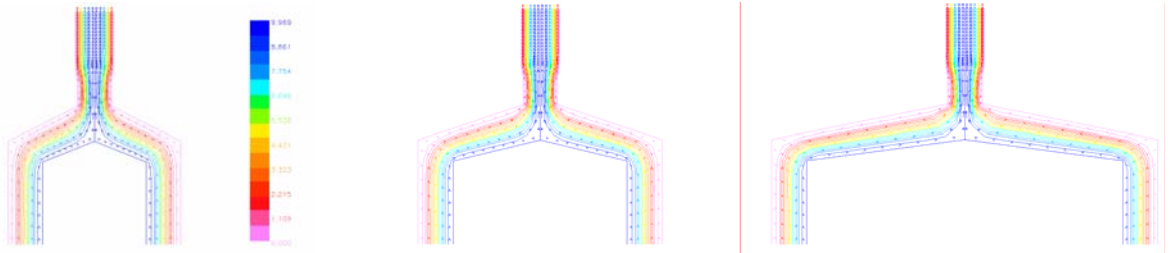
Les iso-contours de la contrainte de cisaillement sont visualisés dans la figure 3.9. Cette figure montre au contraire de la viscosité le polymère pompé est caractérisé par une contrainte moyennement élevée et l'extrudât de contrainte faible. A la surface de la vis la contrainte est élevée plus la distance radiale augmente plus la contrainte décroît. D'autre part, à l'axe de la matrice la contrainte est faible et plus le distance de l'axe augmente plus la contrainte augmente. En ce qui concerne l'extrudât celui-ci est de contrainte faible.

#### 4.3 Etude de l'influence du diamètre d'entrée pour $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ , $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ et $d=2\text{cm}$

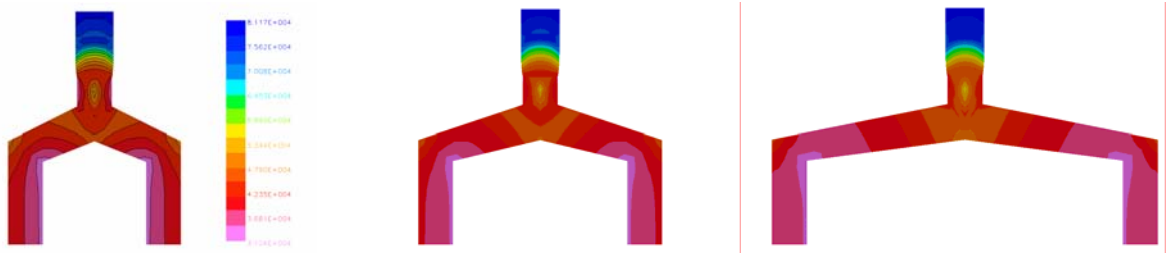
Les figures 3.10; 3.11; 3.12 et 3.13 examinent l'influence du diamètre de la vis ( $D=6\text{cm}$  ;  $10\text{cm}$  ;  $18\text{cm}$ ) en gardant la distance d'espace annulaire constante ( $2\text{cm}$ ) et pour le même débit ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ) ainsi que la vitesse de rotation ( $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ) respectivement sur le champ de pression, le champ des lignes de courant, la viscosité et la contrainte de cisaillement. Pratiquement il n'y a pas d'influence qualitative signifiante du diamètre de la vis sur les quatre grandeurs physiques.



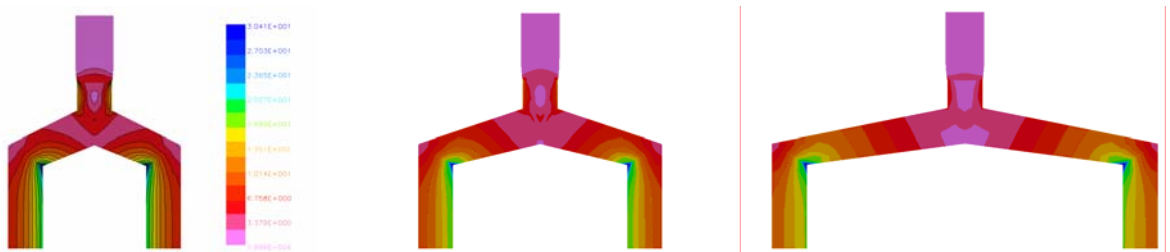
**Figure 3.10:** Pression pour différents diamètres : (a)  $D=6\text{cm}$  ; (b)  $D=10\text{cm}$  ; (c)  $D=18\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$  et  $d=2\text{cm}$ .



**Figure 3.11:** Champs de vitesse et lignes de Courant pression pour différents diamètres : (a)  $D=6\text{cm}$  ; (b)  $D=10\text{cm}$  ; (c)  $D=18\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$  et  $d=2\text{cm}$ .



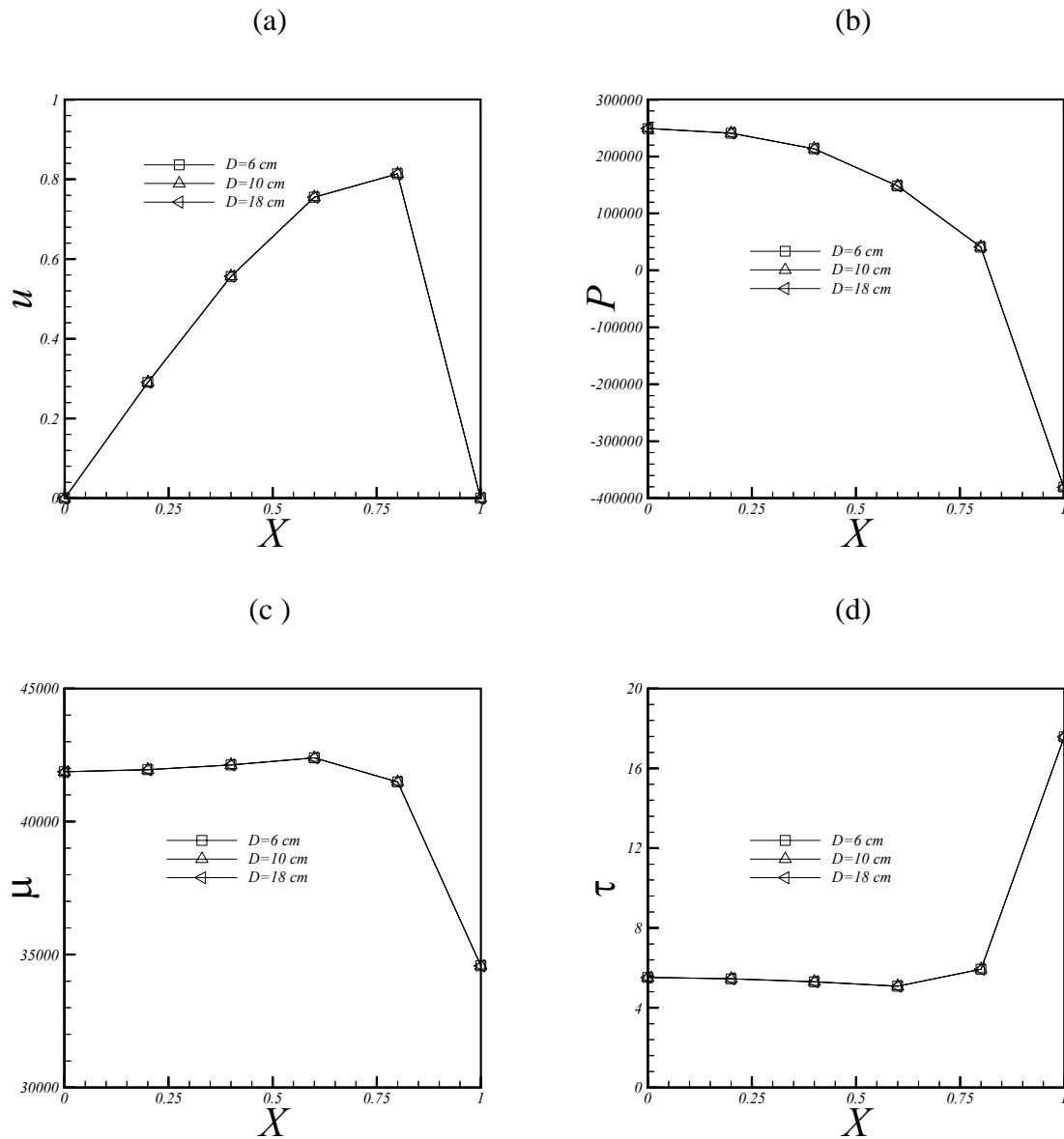
**Figure 3.12:** Viscosité pression pour différents diamètres: (a)  $D=6\text{cm}$  ; (b)  $D=10\text{cm}$  ; (c)  $D=18\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$  et  $d=2\text{cm}$ .



**Figure 3.13:** Contrainte cisaillement pression pour différents diamètres: (a)  $D=6\text{cm}$  ; (b)  $D=10\text{cm}$  ; (c)  $D=18\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$  et  $d=2\text{cm}$ .

D'autre part, une comparaison quantitative a été faite à partir de la figure 3.14 qui montre l'influence du diamètre de la vis sur les caractéristiques de l'extrudât juste à la sortie de la matrice. Cette figure montre clairement que le diamètre de la vis n'a aucune influence sur la pression, la vitesse, la viscosité et la contrainte de cisaillement du

polymère juste à la sortie de l'extrudeuse. Par suite, on voit bien que augmenter les dimensions de la machine ne peut que augmenter son encombrement, son prix de revient et le coût de son exploitation.

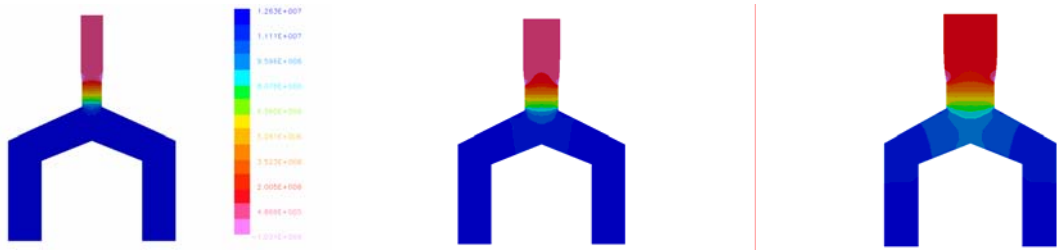


**Figure 3.14:** Effet du diamètre de la vis sur la distribution des caractéristiques de l'exsudât à la sortie de la matrice : (a) vitesse longitudinale ; (b) pression ; (c) viscosité et (d) contrainte de cisaillement pour ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$  et  $d=2\text{cm}$ )

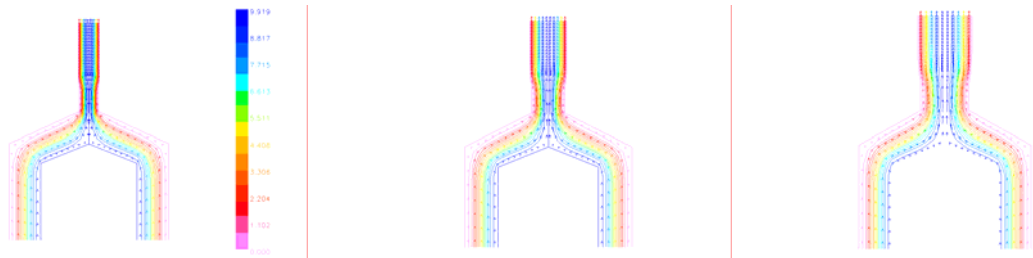
#### 4.4 Etude de l'influence du diamètre de sortie ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ , $D=6\text{cm}$ et $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ ):

Les figures 3.15 ; 3.16 ; 3.17 et 3.18 visualisent l'influence du diamètre de sortie ( $d=1.2\text{cm}$  ;  $2\text{cm}$  ;  $2.8\text{cm}$ ) et pour le même débit ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ) ainsi que la même vitesse de rotation ( $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ ) sur les caractéristiques du polymère en extrusion. D'après la figure

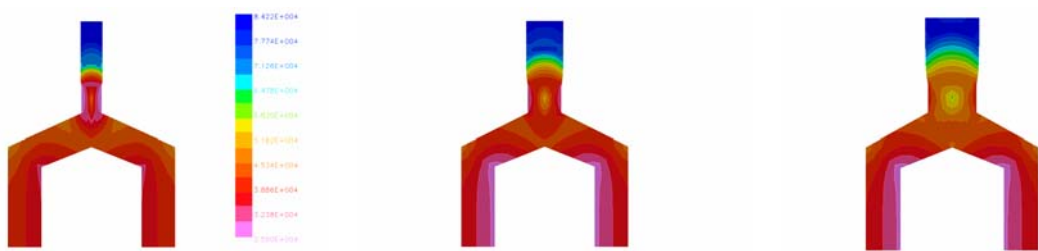
3.15 plus le diamètre de la matrice augmente plus la pression diminue dans la zone qui se situe entre le bout de la vis et l'ouverture de la matrice. D'autre part, la figure 3.16 nous signale que l'écoulement est totalement uniforme sans présence de tourbillon ou contre courant ceci est justifié par le faible nombre de Reynolds. La figure 3.17 nous indique que l'augmentation du diamètre de sortie fait augmenter la viscosité du matériau en extrusion. D'autre part, la contrainte de cisaillement est inversement proportionnelle à l'ouverture de la matrice comme est claire dans la figure 3.18.



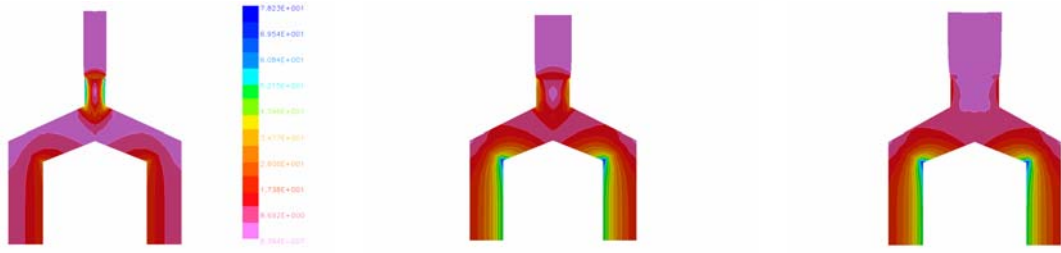
**Figure 3.15** Pression pour différents diamètres : (a)  $d=1.2\text{cm}$  ; (b)  $d=2\text{cm}$  ; (c)  $d=2.8\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$



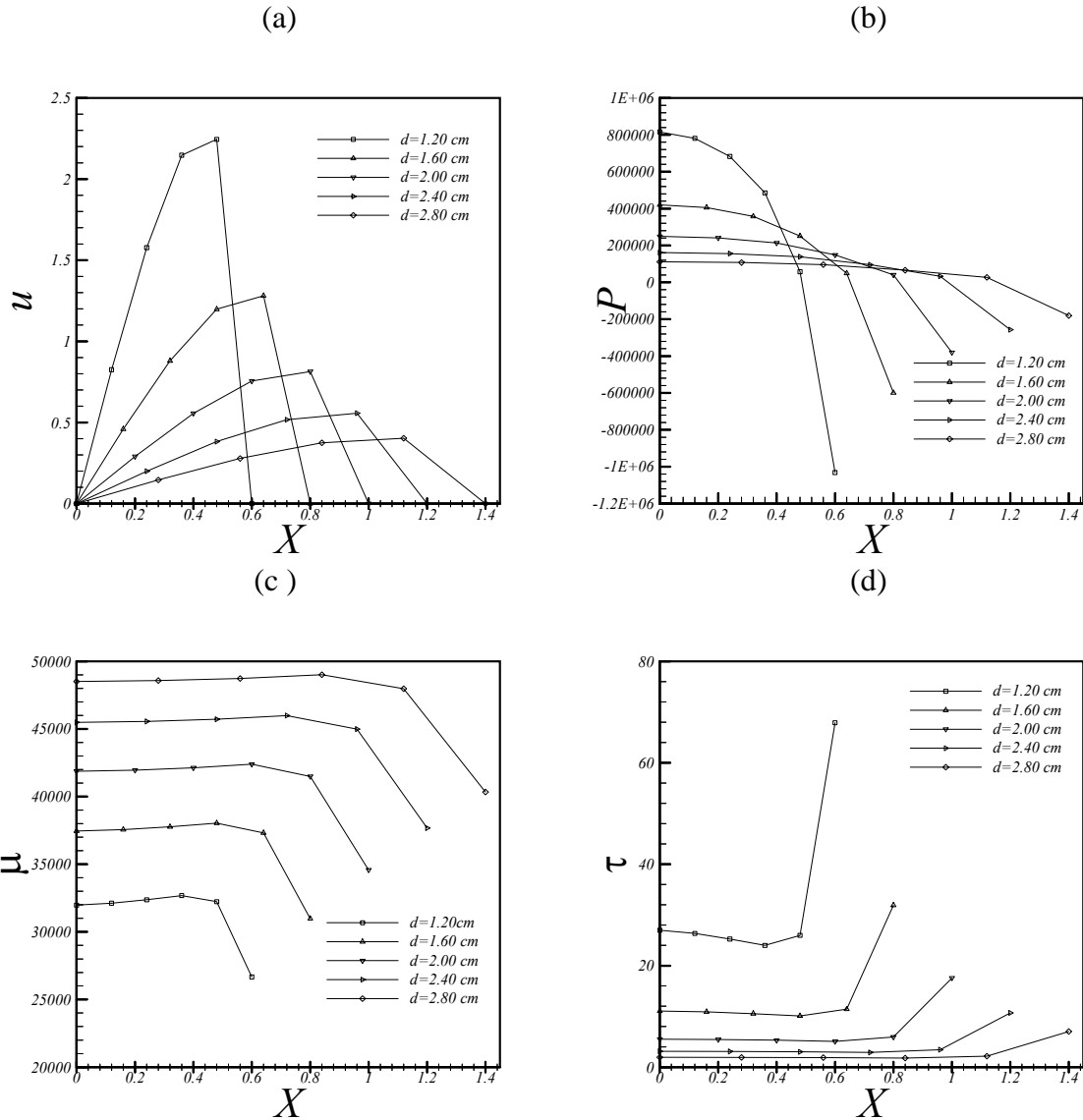
**Figure 3.16:** Champs de vitesse et lignes de courant pression pour différents diamètres : (a)  $d=1.2\text{cm}$  ; (b)  $d=2\text{cm}$  ; (c)  $d=2.8\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$



**Figure 3.17:** Viscosité pour différents diamètres (a)  $d=1.2\text{cm}$  ; (b)  $d=2\text{cm}$  ; (c)  $d=2.8\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$



**Figure 3.18:** Contrainte de cisaillement pression pour différents diamètres : (a)  $d=1.2\text{cm}$  ; (b)  $d=2\text{cm}$  ; (c)  $d=2.8\text{cm}$  avec  $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$

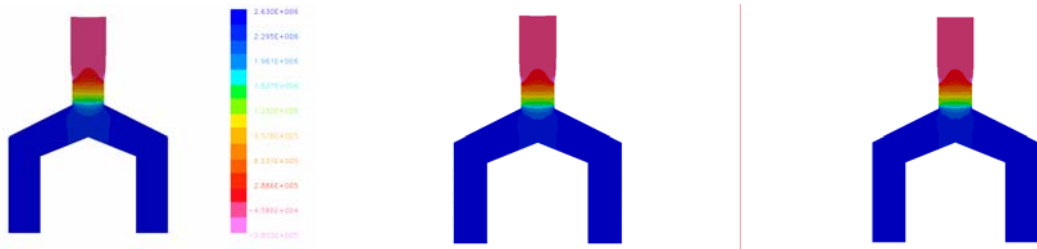


**Figure 3.19:** Effet du diamètre de sortie sur la distribution des caractéristiques de l'exsudât à la sortie de la matrice : (a) vitesse longitudinale ; (b) pression ; (c) viscosité et (d) contrainte de cisaillement pour ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{rad/s}$ )

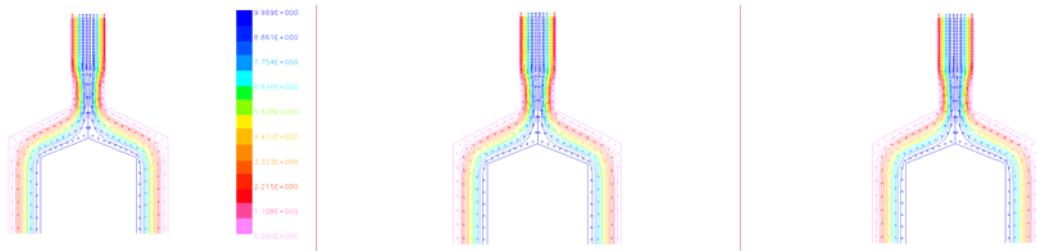


L'étude comparative des paramètres de sortie de l'extrudât dans la section de sortie sont bien montrés dans la figure 3.19, qui montre clairement que plus l'ouverture de la matrice est grande plus ces caractéristiques deviennent plus uniforme. D'autre part, pour de faible diamètre l'extrudât sort de la matrice plus vite sous haute pression et avec une viscosité faible et une contrainte de cisaillement supérieure en comparaison avec celui de grande ouverture.

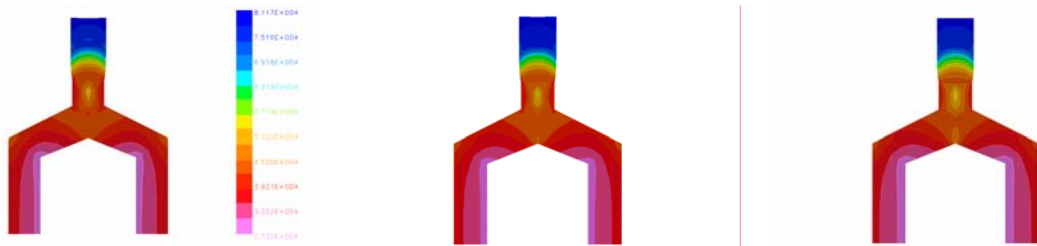
#### 4.5 Etude de l'influence de la vitesse de rotation ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ , $D=6\text{cm}$ , $d=2\text{cm}$ ):



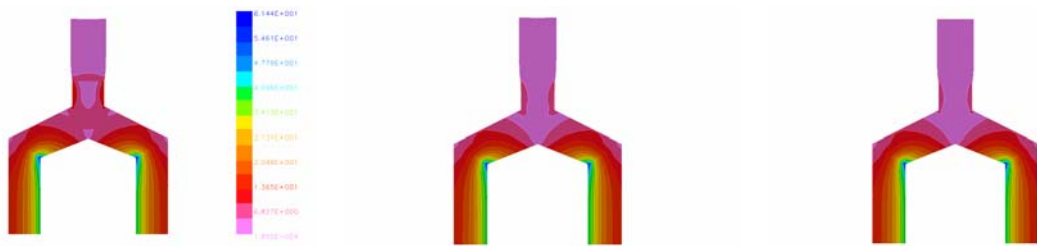
**Figure 3.20:** Pression pour différents diamètres: ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=4\pi$ ,  $\omega=6\pi$ ,  $\omega=8\pi$  rad/s)



**Figure 3.21:** Champs de vitesse et lignes de courant pression pour différents diamètres ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=4\pi$ ,  $\omega=6\pi$ ,  $\omega=8\pi$  rad/s)

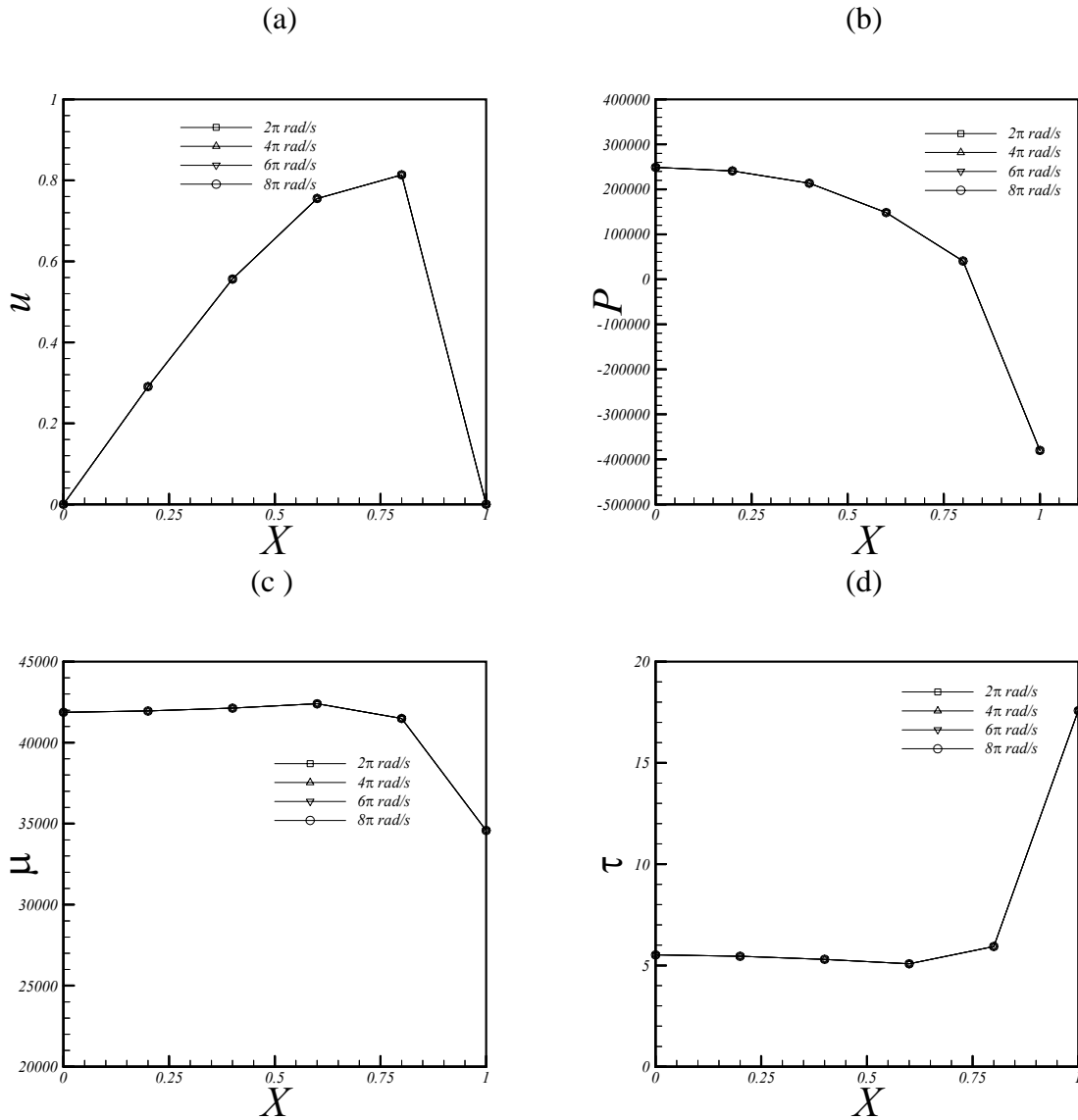


**Figure3.22:** Viscosité pour différents diamètres ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=4\pi$ ,  $\omega=6\pi$ ,  $\omega=8\pi$  rad/s)



**Figure 3.23:** Contrainte cisaillement pression pour différents diamètres ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=4\pi$ ,  $\omega=6\pi$ ,  $\omega=8\pi$  rad/s)

L'étude de l'influence de la vitesse angulaire de rotation ( $\omega=4\pi$ ;  $\omega=6\pi$  et  $\omega=8\pi$  rad/s) sur les paramètres physiques du polymère en extrusion sont montrés sur les figure 3.20 ; 3.21 ; 3.22 et 3.23 tout en maintenant le débit ; le diamètre de la vis et l'ouverture de la matrice constants ( $10\text{cm}^3/\text{s}$  ;  $D=6\text{cm}$  et  $d=2\text{cm}$ ). Ces figures nous indiquent clairement que la variation de la vitesse angulaire de rotation n'influe pratiquement pas sur la vitesse, la pression, la viscosité et la contrainte de cisaillement.

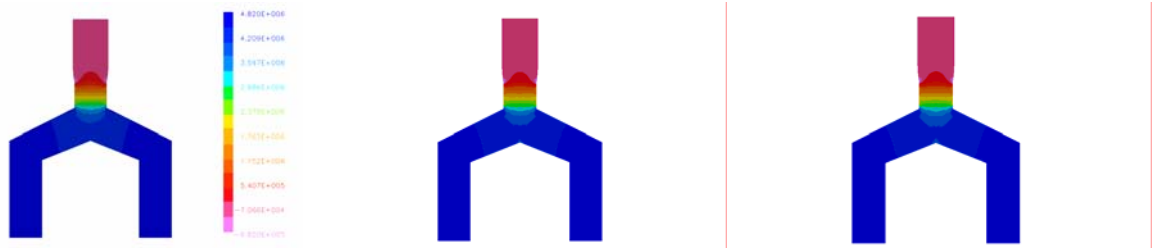


**Figure 3.24:** Effet de la vitesse de rotation de la vis sur la distribution des caractéristiques de l'exsudat à la sortie de la matrice : (a) vitesse longitudinale ; (b) pression ; (c) viscosité et (d) contrainte de cisaillement pour ( $Q=10\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $d=2\text{cm}$ )

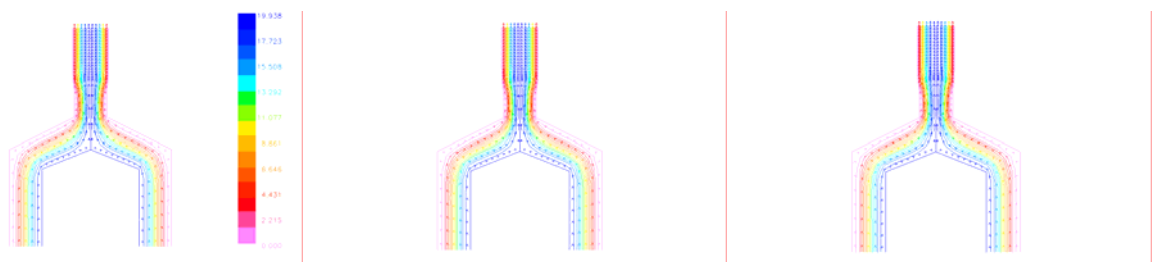
Toutefois, une comparaison directe des ces grandeurs physiques a été faite sur la section de sortie de la matrice suivant la figure 3.24. Cette dernière nous indique que la variation de la vitesse angulaire ne fait varier aucune grandeur physique à savoir la vitesse, la pression, la viscosité et la contrainte de son allure et sa valeur. Cependant, l'augmentation de la vitesse angulaire ne fait que augmenter le coût de production de l'extrudât sans aucune modification des caractéristiques du produit final.

#### 4.6 Etude de l'influence du débit ( $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ , $D=6\text{cm}$ , $d=2\text{cm}$ ):

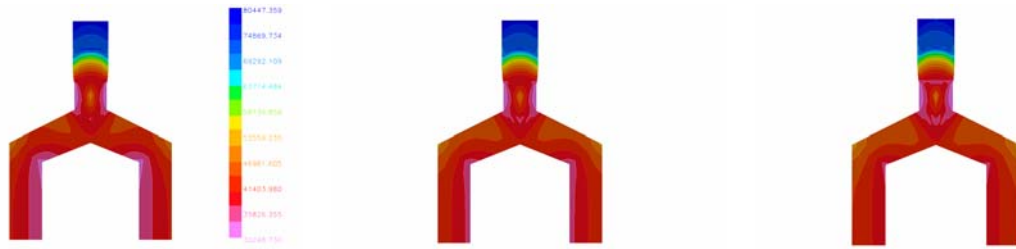
En dernier, l'étude de l'influence du débit ( $Q=10, 20, 30 \text{ et } 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) sur les grandeurs physiques pour le polymère a été faite dans cette sous-section ceci pour  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ ,  $D=6\text{cm}$ ,  $d=2\text{cm}$ . La figure 3.25 nous indique que l'accroissement du débit fait augmenter la pression de l'extrudât. D'autre part, cette augmentation du débit ne fait guerre changer la structure de l'écoulement qui reste uniforme et bien stable comme le montre la figure 3.26. Les figures 3.27 et 3.28 nous indiquent respectivement que le débit fait décroître la viscosité et accroître la contrainte de cisaillement de l'extrudât.



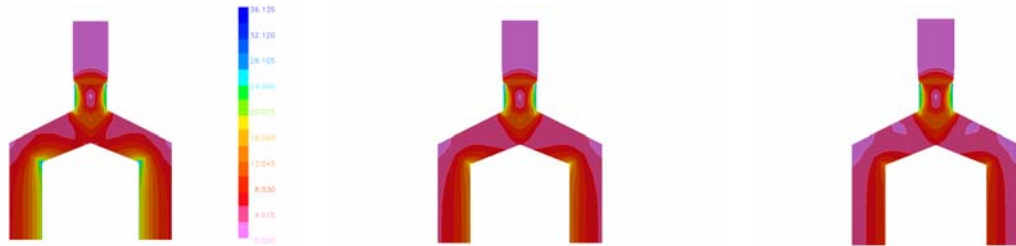
**Figure 3.25:** Pression pour différents débits: ( $Q=20\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=30\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ )



**Figure 3.26:** Champs de vitesse et lignes de courant pression pour différents débits ( $Q=20\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=30\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi \text{ rad/s}$ )

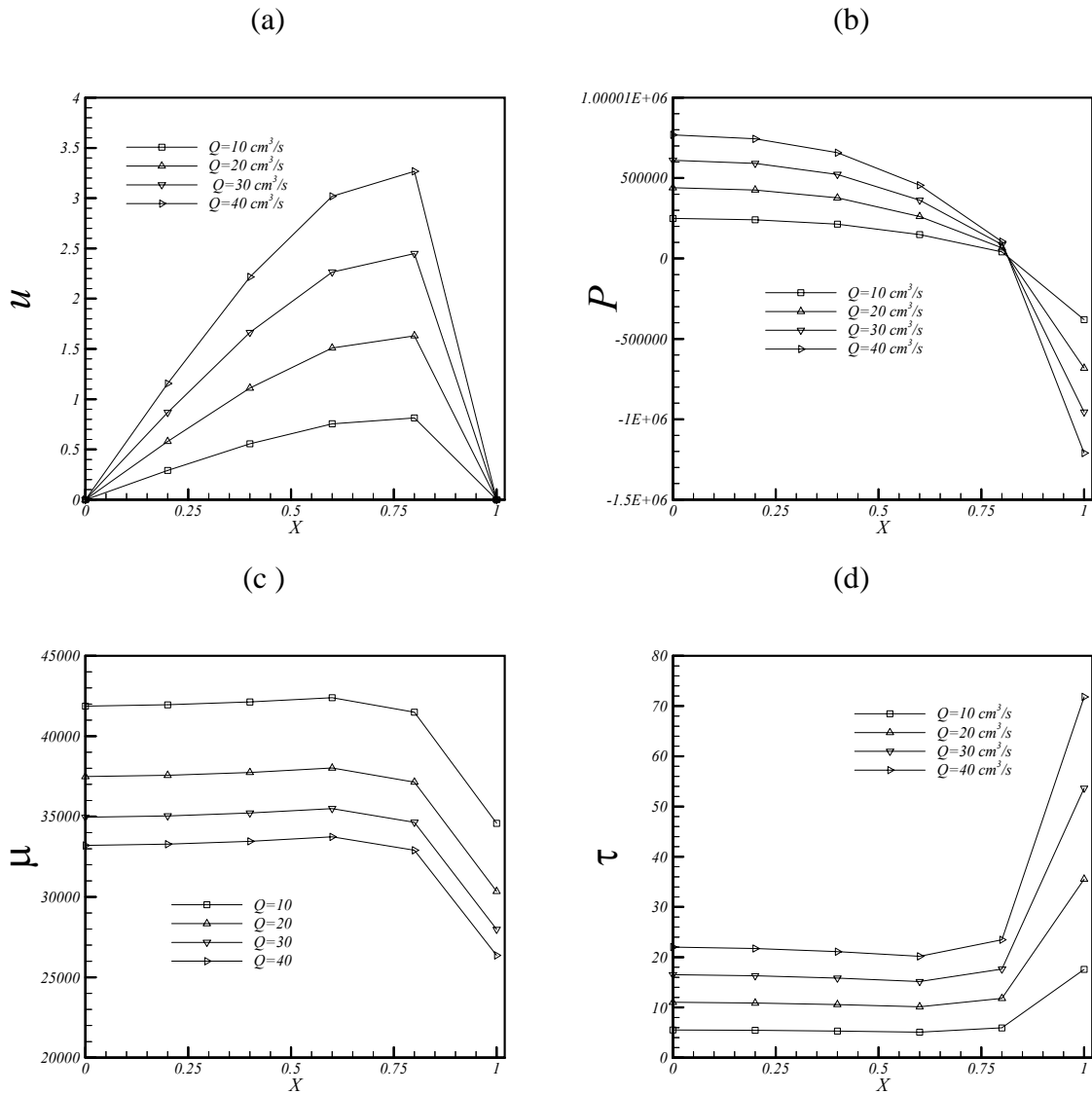


**Figure 3.27:** Viscosité pour différents débits ( $Q=20\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=30\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ )



**Figure 3.28:** Contrainte de cisaillement pression pour différents débits ( $Q=20\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=30\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $\omega=2\pi\text{ rad/s}$ )

Dans le même sens de comparaison la figure 3.29 visualise la vitesse, la pression, la viscosité et la contrainte de cisaillement pour différents débits à la section de sortie de la matrice. Cette figure nous indique des résultats très intéressants de point de vue technologique, et nous montre que pour avoir un matériau dur et de viscosité faible il faut augmenter le débit. D'autre part, si on désire obtenir des caractéristiques inverses il faut travailler avec de faible débit. D'après la figure 3.29 (a), la vitesse atteint une valeur maximale de l'ordre  $3.4\text{Cm/s}$  pour un débit de  $40\text{Cm}^3/\text{s}$  ( $X=0.8\text{Cm}$ ), suivie d'une diminution brutale. Selon la figure 3.29(c), la viscosité dynamique diminue en augmentant le débit d'entrée ( $Q=40\text{Cm}^3/\text{s}$ ) de l'ordre de  $33000.10^4\text{ Pa.s}$ . Plus le débit est faible ( $Q=10\text{Cm}^3/\text{s}$ ), plus la viscosité est élevée ( $42000.10^4\text{Pa.s}$ ). La viscosité est inversement proportionnelle au débit d'entrée. Contrairement, la contrainte de cisaillement augmente en fonction du débit atteignant une valeur maximale de l'ordre de  $70\text{ N/m}^2$  pour un débit de  $40\text{ Cm}^3/\text{s}$ .



**Figure 3.29:** Effet du débit sur la distribution des caractéristiques de l'exsudât à la sortie de la matrice : (a) vitesse longitudinale ; (b) pression ; (c) viscosité et (d) contrainte de cisaillement pour  $(D_i=3\text{cm}, \omega=2\pi\text{rad/s})$

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons, tout d'abord, présenté le modèle géométrique en deux dimensions qui a été construit à l'aide du logiciel « GAMBIT » dans sa version 2.3. Le code Gambit est utilisé pour la génération du maillage et l'introduction des conditions aux limites appropriées. Finalement, les résultats de la simulation sont visualisés et représentés par le code Fieldview.