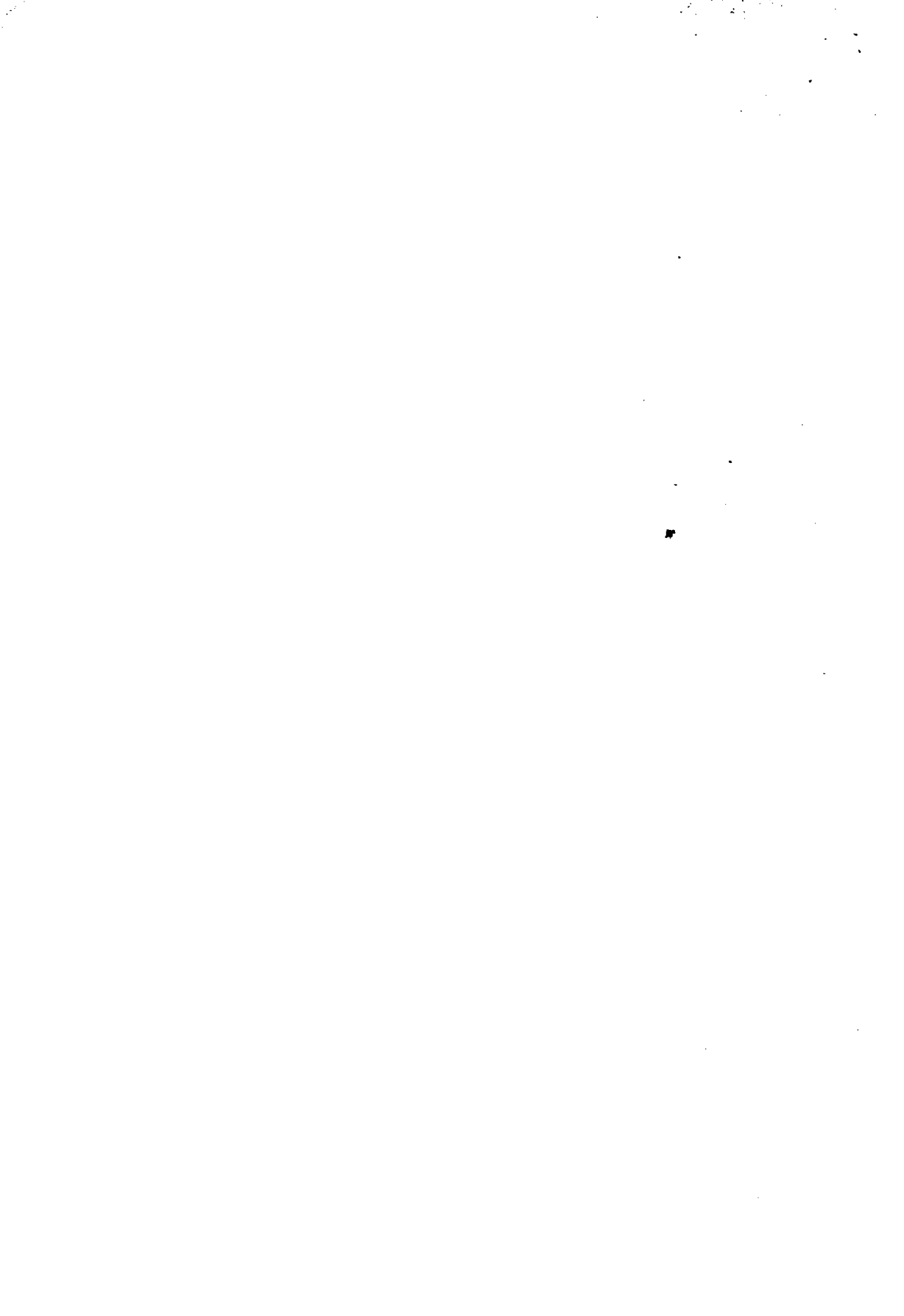


Séminaire de rhéologie

Paris, 19-20 mai 1998

Les actes



SÉMINAIRE DE RHÉOLOGIE

École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts
PARIS
19 et 20 mai 1998

Séminaire de rhéologie. 19-20 mai 1998

Coordination scientifique : Christophe ANCEY. Secrétariat : Evelyne LANGLOIS

Impression et façonnage : Ateliers Cemagref-Dicova. Vente par correspondance : Publi-Trans, BP 22, 91167 Longjumeau Cedex 9, Tél. 01.69.10.85.85. Diffusion aux libraires : Tec et Doc Lavoisier, 14 rue de Provigny - 94236 Cachan Cedex. © Cemagref, ISBN 2-85362-504-4, dépôt légal 4^{ème} trimestre 1998. Prix de vente : 225 F TTC

Premier séminaire sur la rhéologie au Cemagref

ENGREF - PARIS
19 et 20 mai 1998

First workshop on the rheology
at Cemagref

Coordinateur scientifique :
Christophe ANCEY

Comité scientifique :
Graciela ALVAREZ, Cemagref
Christophe ANCEY, Cemagref
Christian DUQUENNOI, Cemagref

Président de séance :
Graciela ALVAREZ, Cemagref
Christian DUQUENNOI, Cemagref
Rémi POCHAT, Cemagref

Secrétariat :
Evelyne LANGLOIS

Avant-propos

La rhéologie se trouve soit au premier plan, soit en arrière plan de beaucoup d'actions de recherche au Cemagref. En effet, dans des domaines aussi variés que le génie des procédés en agro-alimentaire, les géomatériaux ou bien encore les fluides naturels, une meilleure maîtrise des phénomènes passe par une connaissance suffisante du comportement rhéologique des matériaux impliqués. Pour notre établissement, le nombre de thèses soutenues ces dernières années avec pour sujet une étude rhéologique témoigne de la vigueur et de l'intérêt de ces recherches dans différents programmes. S'il est vrai que le Cemagref a été et reste surtout un utilisateur en matière de rhéologie, il faut aussi signaler qu'il a ponctuellement contribué à améliorer la connaissance sur les lois de comportement, les écoulements, et les processus.

Le séminaire qui s'est tenu le 19 et 20 mai 1998 à l'ENGREF a été l'occasion de dresser un premier bilan sur les investigations en rhéologie menées au Cemagref. Une originalité du séminaire a été de mêler les exposés des équipes de recherche du Cemagref et des conférences présentées par quatre spécialistes français de la rhéologie. Trois thèmes ont été distingués.

- le génie des procédés en agroalimentaire concerne les processus de fabrication et de mise en forme des matériaux de l'agroalimentaire. Le professeur Lionel Choplin de l'ENSICN à Nancy a présenté un exposé sur ses travaux, où il essaye de faire le lien entre les caractéristiques mécaniques mesurées sur des réacteurs et les propriétés rhéologiques des matériaux mobilisés ;
- les géomatériaux regroupent des matériaux grossiers divers allant du sol au béton en passant par les roches. Le professeur Félix Darve de l'INPG à Grenoble a présenté un exposé de synthèse sur la rhéologie des géomatériaux, où il a proposé une classification des différentes lois de comportement utilisées ;
- les fluides naturels sont les fluides impliqués dans des écoulements naturels tels que les laves torrentielles, les laves volcaniques, les avalanches, etc. On peut également incorporer les boues d'épandage qui ne sont pas mobilisés dans des écoulements naturels mais résultent de la transformation des résidus de station d'épuration. Philippe Coussot du LMSGC à Champs-sur-Marne a dressé un panorama des différents types d'écoulement naturel et des lois de comportement qui leur sont associées.

Jean-François Agassant de l'École des Mines de Paris a présenté un exposé général sur la rhéologie. Si l'accent au niveau des exemples a été mis sur la rhéologie des polymères fondus, les grands principes fondateurs de la rhéologie ont été rappelés (avec beaucoup d'humour et de clarté).

Participants et universitaires invités ont noté la variété des problèmes traités au sein de l'établissement (des sols de remblai aux avalanches !), la complexité des matériaux impliqués et le couplage à l'ingénierie. Le succès de cette première rencontre tient beaucoup à la participation active de plusieurs personnes. Tout d'abord, nous avons reçu le plein soutien de la direction des programmes. Le comité de pilotage composé de Graciela Alvarez, de Christian Duquennoi, et de moi-même a fait un gros travail de relecture des articles présentés. Il faut également signaler la diligence et le soutien logistique apporté par Evelyne Langlois qui s'est occupée de la préparation du séminaire. Je sais gré également à François Lacroix et Maurice Meunier de l'aide qu'ils ont apportée dans le relevé des débats ou la relecture des articles. Enfin, il faut adresser nos plus vifs remerciements aux quatre conférenciers extérieurs qui sont venus présenter un état de l'art dans leur domaine et nous ont fait part de leurs commentaires à la suite des exposés des équipes du Cemagref.

Christophe ANCEY
Coordonnateur scientifique

Sommaire

Introduction :

- J.F. Agassant (Cemef) : « *Rhéologie des fluides polymères* » 3
- Débat 25

Thème 1 : Rhéologie et génie des procédés en agroalimentaire

- L. Choplin (ENSICN) : « *Maîtrise rhéologique de procédés complexes de transformation de bioproduits* » 29
- M.A. Ben Lakhdar, J. Guilpart, et A. Lallemand (Cemagref) : « *Caractérisation rhéologique d'un fluide frigoporteur diphasique : "coulis de glace" glace + eau + éthanol* » 35
- D. FLick, J. Moureh, et P. Lema-Larrieu (Cemagref) : « *Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur à noyau tournant conique pour des fluides newtoniens et rhéofluidifiants* » 43
- Débat 53

Thème 2 : Rhéologie et géomatériaux

- F. Darve (INPG - 3S) : « *Rhéologie des géomatériaux* » 57
- S. Bonelli et P. Anthinac (Cemagref) : « *Sur le comportement hydroplastique des sols* » 89
- D. Poulain, H. Girard, et P. Kouassi (Cemagref) : « *Étude en laboratoire du comportement hydromécanique des sols fins compactés* » 109
- Débat 125

Thème 3 : Rhéologie et environnement

- P. Coussot (LMSGC) : « *Rhéologie et environnement* » 129
- C. Ancey (Cemagref) : « *Rhéologie des écoulements granulaires* » 147
- D. Laigle (Cemagref) : « *La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses* » 169
- P. Frey (Cemagref) : « *Un exemple d'application de la rhéologie et de l'hydraulique des laves torrentielles boueuses* » 183
- M. Naaim (Cemagref) : « *Avalanche mixte de neige sèche considérée comme un écoulement granulaire* » 191
- J.C. Baudez (Cemagref) : « *Rhéologie des boues de stations d'épuration, comportement au stockage et à l'épandage* » 225
- Débat 243

Rhéologie : introduction

Rhéologie des fluides polymères

Rheology of polymer melts

Jean-François AGASSANT

École des Mines de Paris

CEMEF, UMR CNRS 7635

Sophia Antipolis

06560 Valbonne

email : Jean-Francois.Agassant@cemef.cma.fr

(notes prises par Christophe ANCEY)

Résumé : Cet article présente les bases du raisonnement suivi en rhéologie pour aboutir à une formulation tensorielle de la loi de comportement à partir d'expériences réalisées en dimension 1. Les exemples sont empruntés à la rhéologie des polymères fondus. Dans un premier temps, on met en évidence les insuffisances du modèle newtonien pour décrire les écoulements de polymères, puis dans un second temps, on passe en revue les propriétés pseudoplastiques et viscoélastiques de ces écoulements. Enfin, dans un troisième temps, on examinera quelques techniques expérimentales utilisées en rhéométrie.

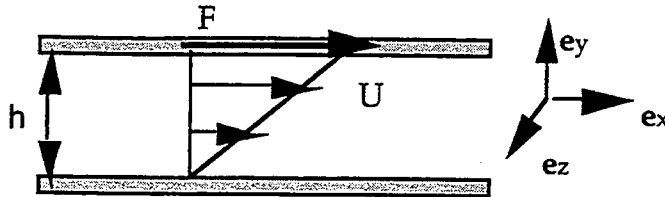
L'objectif de cet exposé est de présenter un survol rapide de la rhéologie avec en toile de fond les applications que l'on peut en tirer pour étudier le comportement des polymères fondus. Les polymères sont des matériaux composés de macromolécules dont les applications sont très nombreuses dans l'industrie, par exemple en plasturgie. La compréhension physique du comportement des polymères à l'échelle moléculaire n'est pas aisée car on doit tenir compte d'interactions élémentaires plus ou moins complexes : enchevêtrement des macromolécules, distribution des branchements et des masses moléculaires. A l'échelle macroscopique, leur étude s'avère un peu plus facile, notamment sur un plan expérimental. Par exemple, en comparaison avec les matériaux naturels dont il est question au cours de ce séminaire, le rhéologue s'intéressant aux polymères a la chance de pouvoir s'appuyer sur des mesures précises et bien reproductibles. Au cours de cet exposé, nous allons présenter les ingrédients nécessaires à la description macroscopique du comportement des écoulements de polymères.

Dans un premier temps, l'accent sera mis sur l'approche tensorielle en rhéologie. Souvent vécue par les étudiants et certains chercheurs comme une lourdeur, la représentation du comportement sous forme tensorielle est extrêmement intéressante et féconde. A titre d'exemple, on reviendra sur la classique loi de comportement newtonienne et on expliquera comment on fait pour passer du comportement observé (en dimension 1) à la formulation (tensorielle) de la loi de comportement. Dans un second temps, on appliquera la méthodologie proposée au cas des polymères. On s'intéressera à décrire le comportement pseudoplastique, puis

viscoplastique des polymères fondus. En dernier lieu, quelques indications sur les méthodes de mesure seront présentées.

1 Les paradoxes du comportement newtonien

C'est au grand Newton que l'on doit la première loi sur le comportement des fluides en 1687 établie expérimentalement à partir d'essais sur de la mélasse (cf. Fig. 1). Traduit dans la terminologie scientifique actuelle, cette loi énonce que la viscosité, c'est-à-dire le rapport de la contrainte de cisaillement d'un fluide (appelé aujourd'hui newtonien) sur le taux de cisaillement, est constante.



- contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{F}{S}$
- taux de cisaillement : $\dot{\gamma} = \frac{U}{h}$

Fig. 1 : Expérience de cisaillement simple : écoulement de Couette plan.

Quelques siècles plus tard, en 1909, un autre anglais, Trouton, réalise des expériences d'élongation sur des bitumes (cf. Fig. 2). Il aboutit à un résultat similaire à celui de Newton, à savoir que la viscosité élongationnelle, définie comme le rapport de la contrainte de traction sur le taux d'élongation, est constante. Toutefois, cette viscosité élongationnelle est trouvée être environ trois fois supérieure à la viscosité en cisaillement simple.

Tel quel, le résultat de Trouton est troublant voire embarrassant. Il incite à penser que la viscosité d'un fluide n'existe pas réellement et qu'il existe autant de valeurs de viscosité que de types d'expérience. A l'extrême, il peut remettre en cause l'intérêt de la démarche mise en œuvre si aucune unité de comportement ne peut être trouvée expérimentalement. En fait le résultat de Trouton ne constitue pas un paradoxe si l'on prend soin de formuler la loi de comportement sous forme tensorielle. C'est ce que nous allons montrer.

Pour cela, il faut se placer dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Deux descripteurs sont utilisés pour représenter le comportement du fluide à l'échelle locale. D'une part, on introduit le tenseur des taux de déformations $\dot{\epsilon}$ défini comme la partie symétrique du gradient du champ de

vitesse ; ce tenseur traduit donc la vitesse avec laquelle se déforme localement le fluide :

$$(1) \quad \dot{\epsilon} = \frac{1}{2} (\text{grad } \mathbf{u} + {}^t \text{grad } \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j$$

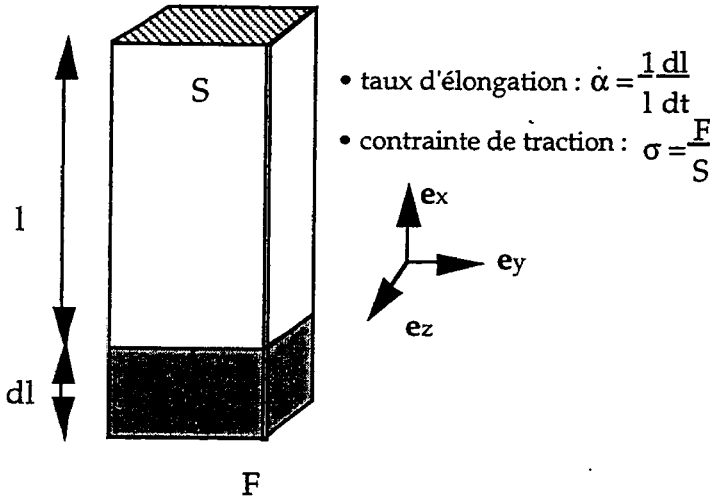


Figure 2 : Expérience d'élongation.

D'autre part, on définit la notion de contrainte s'exerçant sur une surface infinitésimale comme étant la limite des forces affectant la facette quand on fait tendre la surface S vers zéro. La contrainte en un point est donc une fonction de la normale \mathbf{n} à la facette considérée :

$$(2) \quad \mathbf{t}(\mathbf{M}, \mathbf{n}) = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta \mathbf{F}}{\delta S}$$

En examinant l'équilibre locale des forces s'exerçant sur un tétraèdre élémentaire, on montre que les variations de la contrainte en un point en fonction de la normale ne sont pas quelconques mais linéaires par l'intermédiaire d'un objet que l'on appelle le tenseur des contraintes σ :

$$(3) \quad \mathbf{t}(\mathbf{M}, \mathbf{n}) = \sigma \mathbf{n}$$

Par ailleurs, l'hypothèse d'équilibre des couples permet de montrer que le tenseur des contraintes est symétrique $\sigma = {}^t \sigma$. Pour diverses raisons sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici, il est souvent nécessaire de décomposer le tenseur des contraintes sous la forme suivante :

$$(4) \quad \sigma = -p \mathbf{1} + \mathbf{s}$$

où p est la pression (partie sphérique) et \mathbf{s} le tenseur des extra-contraintes (partie déviatorique, avec $\text{tr } \mathbf{s} = 0$). Pour un fluide incompressible, la pression est indéterminée et ne peut être calculée qu'après résolution des équations du mouvement. Pour un fluide compressible, la pression est définie thermodynamiquement par l'intermédiaire de l'énergie libre.

Outre ces deux descripteurs, nous avons besoin d'équations de conservation qui permettent de traduire le bilan de masse, de quantité de mouvement (et d'énergie) au cours d'un écoulement. Ces équations au nombre de 5 constituent les équations du mouvement. Notons que le nombre d'inconnues est de 10 : \mathbf{u} , p , \mathbf{s} , ρ et qu'il est supérieur au nombre d'équations disponibles. Nous avons donc besoin d'une relation supplémentaire pour fermer le problème : c'est la loi de comportement, qui est généralement formulée comme une relation entre les extra-contraintes et le tenseur des taux de déformation. Par exemple, dans le cas des fluides newtoniens, on écrit que cette relation est linéaire (loi de Navier, 1823) :

$$(5) \quad \mathbf{s} = 2\eta \dot{\boldsymbol{\epsilon}}$$

où η est une grandeur scalaire intrinsèque au fluide (et fonction uniquement de la température) que l'on appelle *viscosité*.

Revenons maintenant à notre exemple précédent. Considérons le cas du cisaillement simple entre deux plaques maintenues parallèles : la plaque supérieure est déplacée à une vitesse U constante (cf. Fig. 1). Le profil de vitesse est linéaire et s'écrit :

$$(6) \quad \mathbf{u} = U \frac{y}{h} \mathbf{e}_x = \dot{\gamma} y \mathbf{e}_x$$

Nous en déduisons directement que le tenseur des taux de déformation s'écrit :

$$(7) \quad \dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\dot{\gamma}}{2} & 0 \\ \frac{\dot{\gamma}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le tenseur des contraintes a pour composantes :

$$(8) \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} -p & \tau & 0 \\ \tau & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix}$$

avec $\tau = F/S$. D'après la loi de comportement newtonienne Eq. (5), on trouve que l'on a également :

$$(9) \quad \tau = \eta \dot{\gamma}$$

On trouve que la viscosité de la loi de comportement est égale à la viscosité en cisaillement simple de l'expérience de Newton. Dans le cas d'une élongation pour un fluide newtonien incompressible, le tenseur des taux de déformation a pour composantes :

$$(10) \quad \dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\dot{\alpha}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\dot{\alpha}}{2} \end{bmatrix}$$

Le tenseur des contraintes a pour composantes :

$$(11) \quad \sigma = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

avec $\sigma = F/S$. Dans le même temps par application de (5), on doit avoir :

$$(12) \quad \sigma = \begin{bmatrix} -p + 2\eta\dot{\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & -p - \eta\dot{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & -p - \eta\dot{\alpha} \end{bmatrix}$$

En comparant (11) et (12), on tire que l'on doit avoir :

$$(13) \quad p = -\eta\dot{\alpha} \text{ et } \sigma = 3\eta\dot{\alpha}$$

On trouve donc que la viscosité élongationnelle est égale à trois fois la viscosité du fluide. Ainsi on montre que le résultat obtenu par Trouton n'est pas du tout incompatible avec celui obtenu deux siècles plus tôt par Newton. Cet exemple illustre bien l'importance de la formulation de la loi de comportement sous une forme tensorielle.

L'objectif de la rhéologie n'a pas été seulement de formuler la loi de comportement newtonienne sous une forme tensorielle adéquate. Le gros du travail est d'arriver à proposer des lois de comportement pertinentes pour décrire plusieurs classes de matériau. En effet, il s'est avéré qu'une loi linéaire comme la loi newtonienne n'est pas représentative du comportement de tous les fluides. A titre d'exemple, examinons la différence de pression qu'il faudrait exercer entre les deux extrémités d'une filière pour extruder des polymères. Imaginons une filière de section rectangulaire, de longueur 10 cm, de hauteur 1 mm et de largeur 1 m. Si l'on souhaite extruder des polymères fondus extrêmement visqueux ($\eta = 10^4$ Pa.s, $\rho = 100$ kg/m³) à un débit de $Q = 100$ kg/h, il faudrait exercer une différence de pression :

$$(14) \quad \Delta P = \frac{12\eta QL}{\rho W h^3} = 333 \text{ MPa}$$

A l'évidence, ce résultat est sans commune mesure avec ce qui est industriellement mis en œuvre dans une filière d'extrusion. La conclusion est que le comportement des polymères fondus ne suit pas le modèle newtonien. Dans la section suivante, nous allons examiner les caractéristiques rhéologiques des polymères fondus.

2. Le comportement pseudoplastique des polymères.

Des expériences de rhéométrie en cisaillement simple montrent que les polymères sont des fluides rhéofluidifiants. Autrement dit, en comparaison avec des fluides newtoniens, la contrainte de cisaillement augmente moins vite lorsque le taux de cisaillement croît comme l'illustre la figure 3.

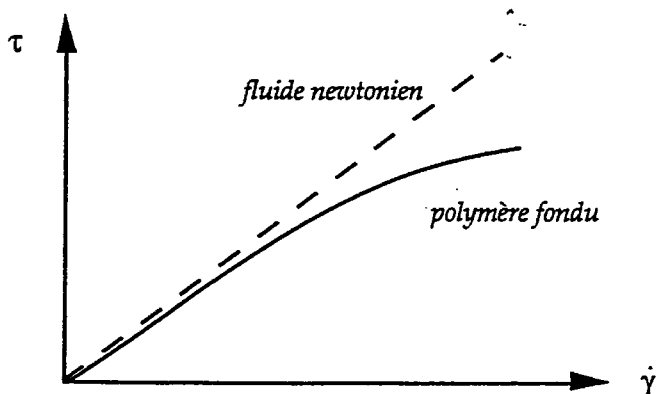


Figure 3 : Rhéogrammes typiques d'un polymère fondu et d'un fluide newtonien.

Si l'on introduit une viscosité équivalente $\eta(\dot{\gamma}) = \tau / \dot{\gamma}$, alors on trouve qu'aux faibles taux de cisaillement ($\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0$) la viscosité est constante et en conséquence le comportement s'apparente à celui d'un fluide newtonien. On parle alors de *plateau newtonien*. Aux plus forts taux de cisaillement, la viscosité diminue et on s'écarte donc de plus en plus du comportement newtonien (cf. Fig. 4). On parlera de comportement pseudoplastique.

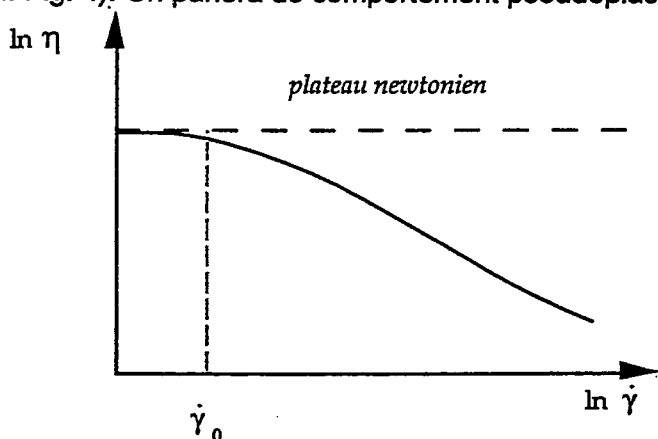


Fig. 4. Courbe de viscosité typique d'un polymère fondu en diagramme logarithmique. Mise en évidence du comportement pseudoplastique (ou rhéofluidifiant) aux forts taux de cisaillement.

Il faut descendre à l'échelle des molécules pour comprendre l'origine de ce comportement. A cette échelle, les polymères se présentent comme un amas de pelotes de macromolécules lovées sur elles-mêmes. Ces pelotes statistiques sont reliées les unes aux autres par un réseau de points d'enchevêtrement des polymères (cf. Fig. 5). La viscosité équivalente du fluide dépend de la densité d'enchevêtrement, car on sent bien que plus il y aura de points d'enchevêtrement, plus il faudra exercer de force pour dérouler les pelotes, et en conséquence plus le fluide exercera une résistance au mouvement. La viscosité équivalente doit également dépendre du temps caractéristique de l'écoulement, qui *grosso modo* correspond au temps durant lequel deux pelotes seront en contact au cours du cisaillement. Si ce temps est très faible devant le temps de formation ou de destruction d'un enchevêtrement (c'est-à-dire que l'on se situe dans le domaine des forts taux de cisaillement), alors la densité d'enchevêtrement diminue d'autant plus que l'on cisaille vite le fluide ; la viscosité équivalente doit donc diminuer. Au contraire, à faibles taux de cisaillement, le temps de contact entre pelotes est suffisamment long pour que des macromolécules se nouent et se dénouent. En considérant que le bilan des créations et de destructions des nœuds est équilibré, on trouve que la densité d'enchevêtrement est à peu près constante et donc la viscosité équivalente est constante.

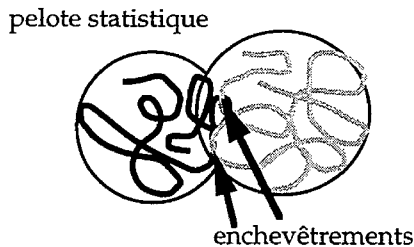


Figure 5 : Idéalisation des contacts entre polymères.

Il existe plusieurs manières de rendre compte mathématiquement du comportement pseudoplastique des polymères. La plus simple assurément, mais aussi la moins précise, consiste à retenir quand même le modèle newtonien en supposant que la viscosité du fluide est une viscosité moyenne estimée expérimentalement par le taux de cisaillement moyen prévu pour l'écoulement (cf. Fig. 6).

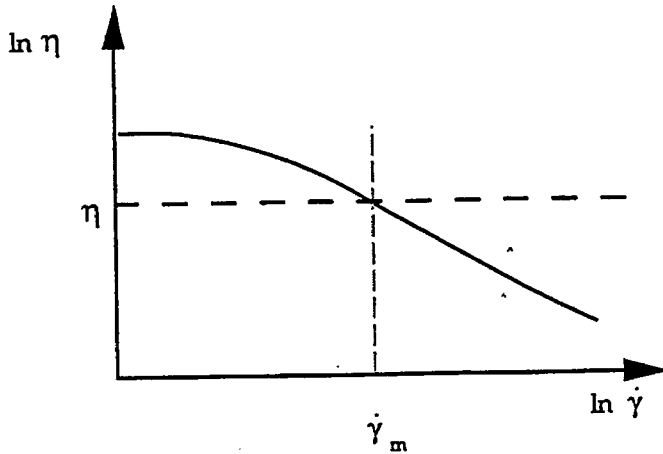


Figure 6 : Courbe de viscosité et définition de la viscosité moyenne.

Une autre méthode consiste à caler une loi puissance de la forme :

$$(1) \quad \eta = K|\dot{\gamma}|^{m-1}$$

avec K la *consistance* et m ($0 < m < 1$) l'*indice de pseudoplasticité*. Le principal avantage est qu'il est toujours possible de faire des calculs analytiques. L'inconvénient est que la viscosité ainsi calée tend vers l'infini aux faibles taux de cisaillement (cf. Fig. 7).

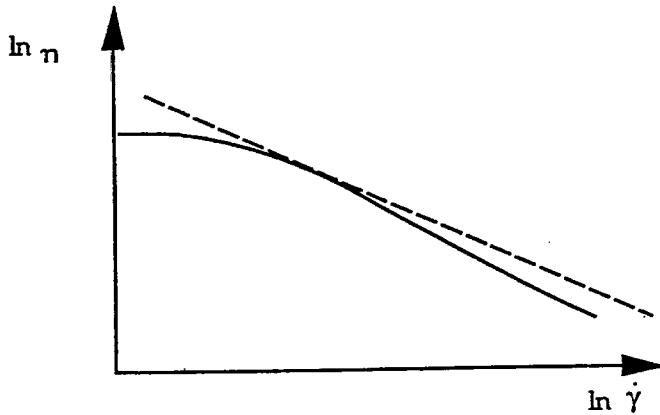


Figure 7 : Approximation de la courbe de viscosité expérimentale par une loi puissance.

Il faut recourir à une loi de calage à trois paramètres pour arriver à rendre correctement compte du comportement pseudoplastique. La loi de Carreau, qui s'écrit :

$$(2) \quad \eta = \eta_0 \left(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{m-1}{2}}$$