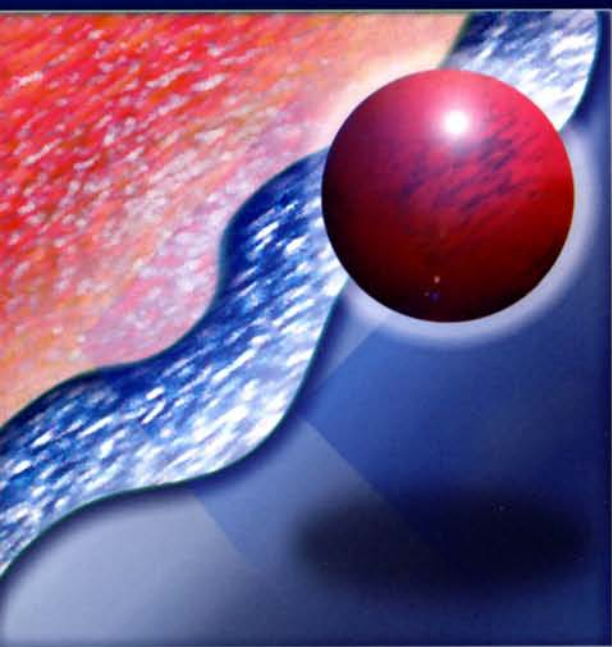


Comprendre la Rhéologie

DE LA CIRCULATION DU SANG
À LA PRISE DU BÉTON



COORDINATEURS
PHILIPPE COUSSOT
JEAN-LOUIS GROSSIORD

Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton

Coordinateurs

Philippe Coussot
Jean-Louis Grossiord



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883-546-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2001

Préface

Si la définition de la rhéologie est très simple : science de la matière en écoulement, son contenu mérite quelques explications. En effet, la rhéologie recouvre des activités scientifiques majeures et se trouve associée à des technologies irremplaçables. Mais elle n'est pas assez enseignée ni prise en compte à ce jour en France, où elle reste encore mystérieuse pour beaucoup, même pour certains scientifiques.

Le Groupe Français de Rhéologie (GFR), association sans but lucratif à vocation purement scientifique, régie par la loi de 1901, et la Société EDP Sciences se sont donné pour objectif de publier une série de documents en français dédiés à la rhéologie. Ce premier ouvrage contient essentiellement les textes rédigés par un groupe d'amis réunis à cette occasion sous la conduite de leurs cèlestes Ph. Coussot et J.-L. Grossiord. Chacun vient parler d'un sujet qu'il affectionne, sans souci d'exhaustivité. À l'heure où le livre, selon Bernard Pivot, ne fait plus même un dixième de l'audience TV des spectacles humains organisés sur M6, le GFR fait dans le très sérieux du point de vue médiatique. Il vise pour l'heure un public qui apprécie encore l'effort de la lecture. Mais d'autres opportunités pourront être saisies pour produire des images, d'autant plus que le sujet s'y prête bien. Finalement le présent ouvrage s'adresse aux étudiants scientifiques des Universités et des Écoles, aux industriels, et à la société en général. Je pense en effet que l'intérêt des exposés et le talent des différents auteurs faciliteront une meilleure perception de la rhéologie auprès du public le plus large, ainsi que l'appropriation de son vocabulaire, deux points essentiels pour cette activité interdisciplinaire.

Il est à mon sens crucial que les chercheurs et les enseignants soutiennent les activités interdisciplinaires dans la mesure où les problèmes les plus pertinents et les voies de leur résolution n'ont pas de raison d'appartenir à l'une des disciplines décrétées par Auguste Comte, penseur, philosophe, mais farfelu extrême à ses heures. Il faut que les étudiants soient avertis que l'ouverture disciplinaire est une voie essentielle de l'excellence et de la réussite professionnelle, et qu'ils puissent faire d'autres choix que ceux des seules orientations étroites dans lesquelles trop d'organismes et de responsables pourraient encore plus ou moins les maintenir, compte tenu de leurs rattachements administratifs officiels.

Interdisciplinaire par essence même, la rhéologie fait appel à la chimie, à la physique, à la mécanique, aux mathématiques et à la biologie, qui lui fournissent

des instruments de base, et se montre utile à chacune de ces disciplines. La façon dont elle est née ne laisse aucune doute à ce sujet. C'est aux États-Unis qu'Eugène Cook Bingham (1878-1945) a proposé en 1929 de créer le mot savant rhéologie, composé de deux racines grecques $\rho\epsilon\omega$ et $\lambda\omicron\gamma\omicron\sigma$, en même temps qu'une revue dédiée et un congrès. L'émergence de la rhéologie était liée à l'épanouissement de l'industrie des polymères, et à des coopérations avec le *National Bureau of Standards* à Washington, ainsi qu'à l'*American Institute of Physics*. Par la suite, c'est en 1940 que fut fondé le Club des Rhéologues Britanniques, par des scientifiques qui réalisèrent la similitude entre les difficultés rencontrées par ceux d'entre eux qui voulaient mesurer les propriétés d'écoulement des sécrétions cervicales de vaches, et ceux qui étudiaient les encres d'imprimerie.

À l'issue de la Seconde Guerre mondiale, la rhéologie s'est développée rapidement au niveau international. Depuis 1948 ont été mis en place à la fois un grand Congrès international périodique et un Comité international de rhéologie formel.

Le dernier en date de ces grands congrès a été organisé à Cambridge en Angleterre en août 2000, avec 700 propositions d'articles et autant de participants. Les sociétés de rhéologie de la planète qui totalisent actuellement environ 7 000 membres actifs sont regroupées en trois zones géographiques distinctes : Amériques, Europe, Pacifique.

L'idée européenne ayant conduit à l'organisation périodique de congrès européens de rhéologie depuis 1982, la Société Européenne de Rhéologie a été créée en 1996. Elle décerne en particulier le prix Weissenberg, d'après le nom du savant illustre Karl Weissenberg (1893-1976), renommé dans le domaine des mathématiques, ainsi que pour ses études théoriques et expérimentales sur les rayons X en cristallographie et en médecine, et bien sûr pour ses travaux en rhéologie. Son nom est associé en rhéologie :

1. à l'effet Weissenberg, par lequel de nombreuses substances telles les préparations culinaires grimpent le long d'un axe en rotation malgré les forces de pesanteur et les forces centrifuges,
2. au rhéogoniomètre Weissenberg, qui permet de mesurer les différentes composantes des contraintes en écoulement de cisaillement,
3. à l'hypothèse de Weissenberg, selon laquelle l'une des différences de contraintes normales s'annule en cisaillement simple stationnaire,
4. au nombre de Weissenberg We , le nombre absolument capital de la rhéologie, qui mesure le rapport de l'échelle de temps typique du matériau à l'échelle de temps représentative de l'expérience que l'on fait avec ce matériau.

Le nombre de Weissenberg vient compléter d'autres nombres sans dimension célèbres (par exemple, les hydrodynamiciens ont le nombre de Reynolds et la turbulence inertielle). Comme eux, il se décline de multiples façons dans les

applications de l'ingénieur, ainsi bien sûr que dans les équations, ou au sujet des instabilités.

Pour prendre pied dans les activités de la Société Européenne de Rhéologie, et au-delà, il suffit de se connecter sur la toile. On trouvera alors toute une série de sites interconnectés. Les références aux travaux et aux ouvrages publiés par les rhéologues peuvent se trouver, elles aussi, avec les outils de la recherche informatisée, mais on ne peut manquer de signaler qu'il existe trois revues internationales de très haut niveau scientifique exclusivement dédiées à la rhéologie : le *Journal of Rheology*, *Rheologica Acta*, et le *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.

Comme le célèbre Monsieur Jourdain de Molière découvrit qu'il avait dit de la prose depuis plus de quarante ans sans le savoir, un grand nombre de personnes avaient pratiqué la rhéologie bien avant que le nom ne soit inventé ou que des organisations soient créées. Trois points de vue sont envisageables.

Les scientifiques qui apprécient les mathématiques aiment bien dire que les premiers travaux en rhéologie sont ceux des savants des XVII^e et XIX^e siècles qui ont largement précédé son identification, tels Newton et Hooke qui sont universellement célébrés pour leurs idées sur la viscosité et l'élasticité. Au XIX^e siècle, des Français, Cauchy, Fourier, Navier et Poisson, et un Britannique, Stokes, ont apporté des contributions essentielles à la théorie du champ. Poiseuille introduisit pour sa part un manomètre et publia ses travaux sur les écoulements capillaires. À la fin du siècle, Couette poursuivit les études de Poiseuille sur les capillaires et construisit la célèbre cellule de Couette. Mais de très nombreux autres savants ont joué un rôle majeur dans l'avancement de la connaissance des problèmes d'écoulement, y compris complexes et non linéaires, dans le champ et aux frontières, et ce dès le XIX^e siècle. L'enseignement au XX^e siècle a rapidement privilégié et isolé les formes mathématiques linéaires les plus simples, et évacué tout le reste, jusqu'à offrir parfois aux étudiants un déficit de sens physique.

Le temps joue un très grand rôle en rhéologie, comme l'atteste le nombre de Weissenberg. Or c'est aussi un thème éternel qui rend quelques dérives inévitables. On rencontre ainsi dans certains travaux des références aux textes sacrés et à des croyances variées bien étrangères à toute activité scientifique. Des détails techniques comme la proximité du r et du t sur les claviers, ou l'intervention intempestive de correcteurs typographiques qui veulent absolument remplacer rhéologie par théologie, ne font qu'accentuer le phénomène. Mais au-delà, toutes les sciences n'ont-elles pas été dans leur histoire soumises à l'épreuve des comportements humains : acharnements d'origine religieuse contre l'évolution des espèces ou la rotation de la Terre, interprétations hasardeuses des paraboles ambiguës énoncées par les philosophes anciens, voire autopersuasion des rayons N, de l'effet Jacq, ou de la mémoire de l'eau. La rhéologie ne peut faire exception.

Le troisième point de vue que je propose est relatif à la connaissance de la matière, au développement des arts et des techniques qui, le plus souvent, sont

préalables aux développements scientifiques, et se sont poursuivis continûment depuis des époques si anciennes que l'on ne sait pas les identifier. Si je dis que « Lucie faisait déjà de la rhéologie en dégustant son yaourt aux fruits », l'anachronisme et le raccourci voulus attirent l'attention sur le fait que l'homme pratique (pas exclusivement) depuis toujours la rhéologie sans le savoir dans chacune de ses trois fonctions de nutrition, de relation et de reproduction.

Les astres, le globe terrestre, les métaux qui ont permis de classer les époques successives de la préhistoire, ont impliqué et impliquent des écoulements complexes, à comprendre encore aujourd'hui.

Les différentes fabrications de pâtes thixotropes fournissent une trame historique sur au moins cinq millénaires. Elles ont donné accès aux pains, modes de conservation des céréales dans un emballage consommable, la croûte, et le geindre sentait tout à fait dans ses muscles les évolutions rhéométriques des pâtes qu'on le chargeait de pétrir. Ses plaintes étaient proportionnelles à la consistance.

Un second exemple de pâte édifiant est fourni par les argiles, utilisées depuis les temps les plus reculés pour des usages domestiques, pour la construction, ou pour l'ornement. Les briques sont probablement les premiers matériaux artificiels que l'homme ait fabriqués, et elles ont traversé tous les âges jusqu'à notre époque, aussi bien sous leur forme crue que cuites. La ville andine de Moquiegua au sud du Pérou qui vient d'être gravement endommagée par un séisme était construite en adobes, briques simplement séchées au soleil. Pour fabriquer une brique, on doit franchir tout d'abord deux phases où la rhéologie est l'élément clé incontournable. On commence par l'apprêt, c'est-à-dire un pétrissage de l'argile avec dégraissage au sable ou engraissement à la chaux, et détrempe avec le moins d'eau possible, et puis c'est l'opération de moulage et découpe, avec contrôle des interactions de paroi, en particulier par saupoudrage de sable. Au pied et à la main, on sent bien les propriétés obtenues, et les produits peuvent être de qualité. Une production mécanisée est plus rentable, à condition de prendre garde aux défauts, et de traiter le problème de rhéologie associé à l'extrusion par exemple.

En somme, la rhéologie est universelle, on la rencontre dans tous les domaines de l'activité humaine aussi bien que dans les phénomènes naturels. Ses applications vont de la mise en forme des produits industriels quel qu'en soit le matériau, aux comportements de la matière vivante, en passant par la tenue des pneumatiques ou la durabilité des constructions. Son impact économique est donc considérable.

Et de surcroît, la rhéologie est très vivante. Les rhéologues sont enthousiastes et ils aiment leur activité. Ils ont la satisfaction de contribuer à des travaux scientifiques significatifs, en prise sur des réalités. Pour tout dire en québécois, la rhéologie c'est le fun.

Jean-Michel PIAU
Grenoble, 9 juillet 2001

Sommaire

1	Des concepts aux outils	9
	Introduction	9
	1. Qu'est-ce qu'un mouvement de cisaillement ?	10
	2. Comment décrire les propriétés d'écoulement des liquides ?	11
	3. Qu'est-ce que la viscoélasticité ?	17
	4. Une analyse viscoélastique essentielle : les tests oscillatoires de faible amplitude	20
	5. Un bref aperçu du domaine non-linéaire	26
	6. Un peu de rhéométrie	31
2	De la macromolécule aux matières plastiques	35
	Introduction	35
	1. Les différents états des matériaux polymères	36
	2. Les grands procédés de mise en forme : importance de la rhéologie	41
	3. Techniques d'études usuelles de la rhéologie des polymères fondus	45
	4. Les principaux comportements des polymères fondus	59
	5. Aspects moléculaires du comportement rhéologique	77
	Conclusion	85
3	Du plasma aux globules sanguins	87
	Introduction	87
	1. Hémorhéologie	89
	2. Les trois niveaux de la circulation sanguine	100
	Conclusion	111

4	Des sauces aux émulsions alimentaires	115
	Introduction	116
	1. Propriétés de systèmes aqueux à base d'épaississants et gélifiants	116
	2. Les systèmes à base d'amidon : exemple des produits laitiers	123
	3. La stabilisation de systèmes dispersés et le rôle des polysides	128
	Conclusion	134

5	Du magma à la neige	137
	1. Les différents types d'écoulement de fluide naturel et leurs enjeux	138
	2. Les laves torrentielles	140
	3. Les laves volcaniques	147
	4. La neige et les avalanches	151

6	Des peintures au ciment	159
	1. Rhéologie des peintures	159
	2. Rhéologie des ciments	167
	3. Les fluides de forage	175
	4. Les matériaux bitumineux en technique routière	183

7	Des crèmes aux vernis à ongle	191
	Introduction	191
	1. Rhéologie des conditions d'application	192
	2. Étude des propriétés rhéologiques de produits cosmétiques modèles	196
	Conclusion	217

Des concepts aux outils

J.-L. Grossiord¹ et D. Quemada²

Ce premier chapitre définit les notions et concepts de base de la rhéologie, qui seront largement utilisés dans cet ouvrage. Sans être exhaustif, il s'efforcera de présenter les outils rhéologiques, en adoptant un point de vue simplifié et didactique, et en évitant le plus possible le recours au formalisme. Cette présentation devrait cependant être suffisamment complète pour permettre à quelqu'un qui n'aurait pas de connaissance particulière du sujet, de comprendre, au moins dans leurs grandes lignes, les différentes présentations de la suite de l'ouvrage. Les lecteurs qui souhaiteraient élargir leur connaissance des bases théoriques et expérimentales de la rhéologie sont renvoyés à l'un des articles ou ouvrages généraux dont la liste figure dans les références bibliographiques.

Ce chapitre, destiné à faciliter la lecture de l'ensemble de l'ouvrage, utilise une description unificatrice s'agissant en particulier des notations et unités. Ce sont en effet les mêmes grandeurs, notations et unités qui serviront à décrire les propriétés rhéologiques mises en jeu dans les applications extrêmement diverses abordées. Le point de vue adopté sera essentiellement descriptif et phénoménologique, réservant aux chapitres suivants les explications microscopiques et moléculaires.

Introduction

Bien que la rhéologie intègre l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides, les applications envisagées dans cet ouvrage concernent presque exclusivement les liquides. Dans ces conditions, ce chapitre se limitera à la présentation des propriétés rhéologiques des seuls liquides. Il faut cependant être bien conscient du fait que la notion de liquide, complexe, recouvre une réalité très diverse : il existe des liquides très fluides comme l'eau, les solvants organiques, les solutions et dispersions diluées, mais aussi des substances beaucoup plus

¹ Laboratoire de Physique Pharmaceutique, UFR Pharmaceutique, 5 rue J.-B. Clément, 92296 Châtenay-Malabry Cedex.

² Laboratoire de Biorhéologie et d'Hydrodynamique Physicochimique, CNRS-ESA 7057, Université Paris 7 Denis Diderot, 2 place Jussieu, 75221 Paris Cedex 05.

visqueuses et consistantes dont l'aspect peut évoquer un état pâteux, semi-solide, voire même solide. Cette différence d'appréciation est souvent due à la très large gamme des échelles de temps des différents mécanismes d'écoulement. Alors que l'écoulement sous le seul effet de la pesanteur est instantané dans le cas des liquides de faible viscosité, il n'en est plus de même pour des substances pâteuses ou semi-solides. Un polymère fondu de structure enchevêtrée, ou encore du verre, finissent par s'écouler à condition d'attendre suffisamment longtemps. Dans certains cas, on peut observer un début d'écoulement significatif seulement après quelques heures, quelques années voire même quelques siècles (exemple du verre des vitraux des cathédrales). C'est la signification des formules célèbres attribuées à Héraclite (« *Tout s'écoule* ») ou à la prêtresse Déborah (« *Même les montagnes s'écoulent devant l'Éternel* »). Il est remarquable de constater que, malgré ces différentes échelles de temps, ce sont les mêmes grandeurs et les mêmes lois de comportement qui régissent l'écoulement de ces liquides.

En plus de leurs propriétés visqueuses, qui feront l'objet d'une présentation indépendante, la plupart des liquides possèdent également des propriétés élastiques. On verra que ces propriétés sont d'autant plus marquées que le liquide possède une organisation moléculaire plus complexe. La *viscoélasticité* concerne l'étude de l'ensemble des propriétés visqueuses et élastiques des substances. Elle fera l'objet d'une présentation qui, bien que relativement sommaire devrait sensibiliser le lecteur à ce mode d'analyse extrêmement puissant, et lui permettre de suivre certains des développements des chapitres suivants.

Mais avant de définir ces différentes propriétés, il sera nécessaire d'introduire la notion de mouvement de cisaillement. Nous nous limiterons en effet à l'étude des seuls *mouvements de cisaillement* qui représentent les mouvements les plus fréquemment mis en œuvre en rhéologie.

1. Qu'est-ce qu'un mouvement de cisaillement ?

Un exemple particulièrement simple de cisaillement concerne le mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes, l'une au repos, l'autre animée d'un déplacement parallèle à elle-même. Ce mouvement peut être celui d'une peinture brossée sur un mur, d'une crème cosmétique étendue sur la peau, du beurre étalé sur une tranche de pain... (Fig. 1.1).

Sous l'effet de ce cisaillement, le matériau s'écoule en couches planes, parallèles entre elles, animées de vitesses différentes qui varient continûment entre 0 pour la couche au contact de la surface fixe et V pour la couche au contact avec la surface mobile. On admet en effet que les couches de matériau au contact avec les deux surfaces planes sont solidaires de ces surfaces ; c'est ce qu'on appelle l'hypothèse de non-glissement à la paroi.

Deux grandeurs vont permettre de caractériser quantitativement le cisaillement.

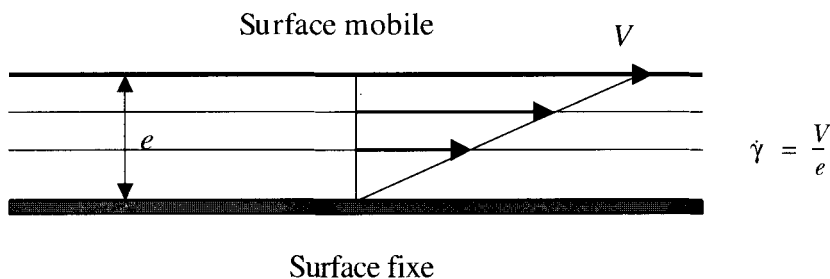


Figure 1.1 : Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes.

L'une est la *vitesse de cisaillement*, encore appelée *gradient de vitesse*³, qu'on notera $\dot{\gamma}$: elle caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse V et de l'épaisseur e de l'échantillon (Fig. 1.1). La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde (s^{-1}). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend par conséquent, non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile mais aussi, et de façon critique, de l'épaisseur e cisailée. Si cette dernière est faible, on peut atteindre des vitesses de cisaillement très élevées, même avec des vitesses de déplacement relativement faibles, et inversement.

L'autre est la *contrainte de cisaillement*. Sous l'effet du déplacement relatif des différentes couches, il apparaît en effet des forces de frottement entre les couches, forces qui s'exercent tangentiellement à la surface de ces couches. On a l'habitude de rapporter ces forces à l'unité de surface et de définir ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement qu'on notera τ , et qui s'exprime en pascal (Pa).

Il est bien évident que les mouvements de cisaillement réels ne possèdent pas toujours une symétrie plane de translation. C'est ainsi que la plupart des viscosimètres et rhéomètres sont rotatifs et présentent des symétries cylindrique coaxiale, ou cône-plateau, ou plateau-plateau. De même, ces mouvements de cisaillement ne sont pas toujours engendrés par le déplacement d'une paroi solide. Dans de nombreuses applications, le cisaillement est provoqué par une différence de pression appliquée aux extrémités de l'échantillon, ou encore par le seul effet de la pesanteur : c'est le cas des écoulements dans les tubes cylindriques, qu'il s'agisse de canalisations industrielles, de vaisseaux sanguins, de tubes capillaires...

2. Comment décrire les propriétés d'écoulement des liquides ?

Intuitivement, il est clair que la valeur de la contrainte de cisaillement va en général croître avec la vitesse de cisaillement, mais que le rapport entre ces deux

³ En toute rigueur, la vitesse de cisaillement et le gradient de vitesse sont des notions qui coïncident seulement pour des écoulements présentant des symétries particulières comme l'écoulement plan ou l'écoulement à travers un tube cylindrique.

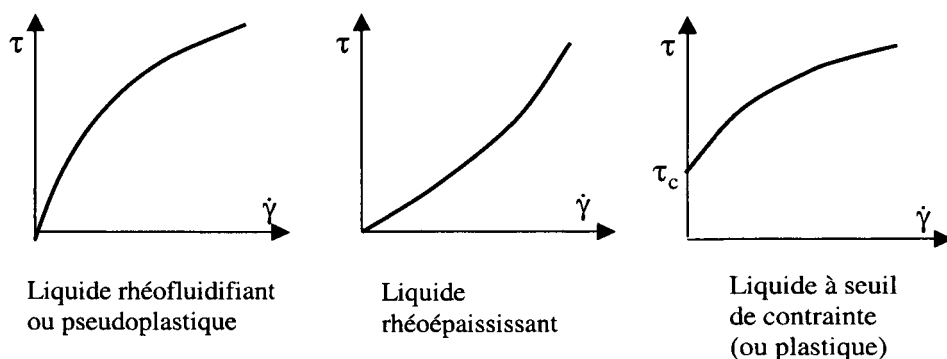


Figure 1.2 : Rhéogramme des différents comportements.

grandeurs va dépendre des propriétés du liquide considéré. Ce rapport de la contrainte à la vitesse de cisaillement est appelé coefficient de *viscosité*. Noté η , il s'exprime en pascal·seconde (Pa·s). On pourrait croire que ce coefficient suffit à caractériser les propriétés d'écoulement des échantillons, à une température donnée. C'est vrai dans le cas des *liquides newtoniens* pour lesquels il y a proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement, si bien que la viscosité est indépendante du cisaillement. Mais ce n'est plus vrai dans le cas des *liquides non newtoniens*, pour lesquels la relation de proportionnalité n'est plus vérifiée, et qui présentent un comportement en écoulement beaucoup plus riche et complexe.

Le graphe qui représente l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement est appelé *rhéogramme*. Il résume l'ensemble des propriétés d'écoulement de l'échantillon. On a l'habitude de dresser une typologie des différents comportements selon le profil du rhéogramme représentatif. On distinguera principalement (Fig. 1.2) :

- le comportement *rhéofluidifiant* (encore appelé *pseudo-plastique*) qui est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. On en déduit facilement que la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente : le liquide devient moins visqueux et donc plus « fluide » lorsque le cisaillement croît ;
- le comportement *rhéoépaississant* (encore appelé *dilatant*) qui est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut : le liquide devient plus visqueux et donc plus « épais » lorsque le cisaillement croît ;
- le comportement à seuil de contrainte (encore appelé *plastique*), qui est défini par un rhéogramme présentant une contrainte critique appelée *seuil d'écoulement* : le matériau ne s'écoule qu'au-delà de cette contrainte critique.

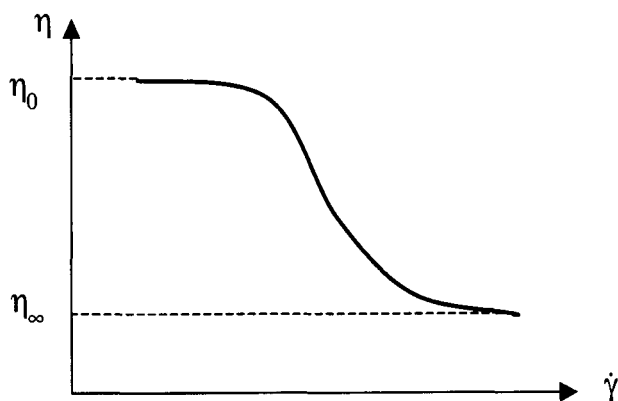


Figure 1.3 : Comportement rhéofluidifiant.

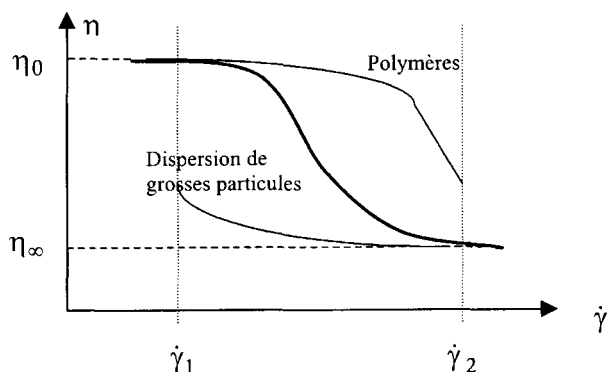


Figure 1.4 : Inflexion du rhéogramme en fonction de la taille des éléments du fluide.

Le comportement rhéofluidifiant, qui est de loin le plus fréquent est souvent défini par un graphe qui est représenté dans le système de coordonnées $(\eta, \dot{\gamma})$ et non plus $(\tau, \dot{\gamma})$. Cette nouvelle représentation (Fig. 1.3), équivalente à la précédente, permet de mettre en évidence l'existence de deux plateaux newtoniens, définis pour les faibles et hautes vitesses de cisaillement. Les valeurs correspondantes des viscosités seront notées η_0 et η_∞ .

Soulignons cependant que l'observation de ces deux plateaux newtoniens n'est pas toujours possible : cela dépendra évidemment de la position du point d'inflexion I du rhéogramme dans la fenêtre d'observation $(\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2)$, imposée par l'appareil. Par exemple, pour les polymères fondus ou en solution concentrée, seule la partie à gauche du point I est pratiquement observée (Fig. 1.4). On peut montrer que la « taille » moyenne des éléments constituant le fluide complexe est un des paramètres qui influe le plus sur la position de I .

Encadré 1.1. Un peu de modélisation mathématique

Il est utile de savoir qu'il existe des modèles mathématiques d'ajustement des rhéogrammes disponibles maintenant dans la plupart des logiciels de traitement des rhéomètres. Ces modèles s'expriment sous la forme :

$$\tau = f(\dot{\gamma})$$

la viscosité étant définie dans tous les cas par :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{f(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}}$$

Les équations suivantes sont quelques exemples de modèles mathématiques disponibles dans la plupart des logiciels de traitement actuels et adaptés aux différents comportements en écoulement, d'une part des fluides pseudo-plastiques (rhéofluidifiants) et, d'autre part des fluides plastiques (à seuil d'écoulement).

• *Fluides rhéofluidifiants (pseudo-plastiques)*

Loi de puissance : $\tau = K\dot{\gamma}^n$ $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$

Loi de Cross : $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ $\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (C\dot{\gamma})^n}$

• *Fluides plastiques*

Loi de Casson : $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\beta\dot{\gamma}}$ $\sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\dot{\gamma}}} + \sqrt{\beta}$

Loi de Herschel-Bulkley : $\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$ $\eta = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}$

Ces modèles permettent de décrire l'ensemble du rhéogramme et d'obtenir ainsi une signature exhaustive des propriétés d'écoulement.

2.1. Quelques ordres de grandeur

Selon le liquide considéré et selon la vitesse de cisaillement appliquée, la valeur de la viscosité peut couvrir des intervalles très larges. Selon la nature des liquides, l'intervalle maximal s'étend typiquement entre 10^{-3} Pa·s (cas de l'eau) et 10^{13} Pa·s (cas du verre fondu) ; ce qui représente une variation de 16 décades. On retrouve là, au plan quantitatif, les différences déjà mentionnées entre des liquides fluides et des substances pâteuses ou semi-solides. Pour certaines substances rhéofluidifiantes par exemple, le caractère non newtonien est à ce point marqué que les viscosités η_0 et η_{∞} peuvent différer couramment de 3 ou 4 ordres de grandeur, voire davantage.

Dans ces conditions, si l'on veut prévoir la réponse rhéologique de ces liquides dans certaines applications, il est nécessaire de savoir estimer les valeurs des

Tableau 1.1 : Quelques valeurs de viscosité de substances usuelles à température ambiante (en Pa·s, ordres de grandeur).

Air	10^{-5}
Eau	10^{-3}
Huile d'olive	10^{-1}
Glycérine	10^0
Miel	10^1
Polymères fondus	10^3
Bitume	10^8

vitesse de cisaillement mises en œuvre. Il existe une formule très générale, directement déduite de la relation de définition, et s'appliquant à n'importe quel liquide, qu'il soit newtonien ou non newtonien, qui fournit un ordre de grandeur approximatif de la vitesse de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{\text{vitesse maximale}}{\text{Épaisseur de la zone cisailée}}.$$

Dans le cas d'un écoulement à travers un tube cylindrique, écoulement qui est caractérisé par un gradient de vitesse hétérogène, on préfère utiliser la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}.$$

Cette relation n'est valable en toute rigueur que pour un liquide newtonien. En effet, directement déduite de la loi de Poiseuille, elle permet d'obtenir la vitesse de cisaillement maximale dans le tube (valeur à la paroi du tube) en fonction du débit volumique à travers le tube Q et du rayon du tube R .

Il faut retenir que, selon les applications considérées, la vitesse de cisaillement est susceptible de varier dans des intervalles très étendus. Si l'on considère par exemple l'industrie des peintures, le gradient de vitesse peut varier de 10^{-2} s^{-1} (coulure) à 10^5 s^{-1} (pulvérisation). L'étalement de sauces de couchage sur du papier met en œuvre des cisaillements encore plus élevés qui peuvent atteindre 10^6 voire 10^7 s^{-1} . Cela pose parfois des problèmes si l'on désire simuler sur le plateau d'un rhéomètre les conditions d'application, dans la mesure où aucun rhéomètre, même très perfectionné, n'est capable à lui seul de couvrir une gamme aussi étendue. Signalons que les possibilités d'extrapolation des modèles théoriques d'ajustement sont parfois mises à profit pour prévoir la réponse rhéologique d'un liquide pour une vitesse de cisaillement inaccessible expérimentalement.

2.2. Des propriétés d'écoulement singulières : les liquides thixotropes

Jusqu'à présent, on a supposé implicitement que les comportements rhéologiques présentés étaient indépendants de l'histoire mécanique antérieure de l'échantillon, et qu'en particulier les rhéogrammes obtenus par cisaillement croissant et décroissant étaient superposables. Ce n'est pas toujours le cas : pour certains liquides, le graphe qui décrit un cycle de cisaillement montée-palier-descente (constitué par une phase de cisaillement croissant, une phase de cisaillement constant et une phase de cisaillement décroissant) présente une boucle d'hystérésis, ce qui traduit un comportement dépendant de l'histoire passée de l'échantillon.

Un cas particulier important et très connu d'un tel comportement est celui d'un liquide *thixotrope*, qui possède des propriétés très spécifiques :

- Il possède un caractère rhéofluidifiant qui se manifeste par une diminution de la viscosité lors de la montée.
- Les effets de cette fluidification ne se produisent pas en totalité dès l'application du cisaillement. Ils se produisent aussi de façon retardée dans le temps : le cisaillement induit une déstructuration qui se manifeste de façon différée ; si bien que la courbe descente est située en dessous de la courbe montée ; ce qui signifie que, pour une même valeur de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement, la viscosité est plus faible à la descente qu'à la montée.
- On ne parlera de thixotropie que si le liquide considéré ne régénère sa structure initiale qu'après un temps de repos suffisant. Comme la déstructuration, cette restructuration (qu'on appelle aussi de façon abusive « reprise de thixotropie ») ne se produit pas instantanément mais, là encore, de façon différée dans le temps. Et c'est d'ailleurs principalement en jouant sur ces temps de restructuration que les liquides thixotropes présentent de nombreuses applications (peintures, vernis à ongle...).

Détaillons un peu l'exemple des peintures thixotropes qui doivent cette propriété à l'ajout de fines particules (comme de l'argile). Ces dernières sont responsables de la formation de larges structures au repos (ainsi qu'à faible cisaillement), associée à une viscosité η_0 très élevée. Lorsque le cisaillement croît, la déstructuration progressive de ces structures conduit à une viscosité η_∞ beaucoup plus faible que η_0 . On a ainsi un produit qui répond bien à l'attente de l'utilisateur, c'est-à-dire un produit dont l'étalement sur une surface (qui se fait sous cisaillement élevé) est facilité par sa faible viscosité, tandis que sa forte viscosité au repos permet d'éviter les coulures. Mais cette dernière caractéristique ne peut intervenir que si la cinétique de restructuration (*i.e.* la viscosité élevée) est suffisamment rapide en comparaison de la mise en écoulement du film de peinture sous l'action de la pesanteur, avant le séchage du film. On voit là le rôle très important que jouent les temps caractéristiques liés aux cinétiques d'évolution

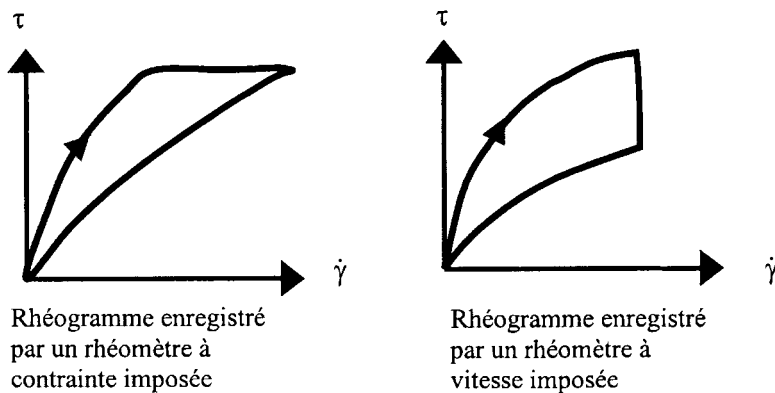


Figure 1.5 : *Rhéogrammes d'un même liquide thixotrope.*

de la structure interne du matériau, et par conséquent, l'importance de leur détermination expérimentale.

La figure 1.5 représente deux rhéogrammes complets montée-palier-descente d'un même liquide thixotrope, enregistrés sur deux rhéomètres, l'un piloté en contrainte et l'autre en vitesse. Il est clair en effet que, selon le mode de pilotage, la phase palier sera décrite par un segment horizontal ($\tau = \text{Cte}$) ou vertical ($\dot{\gamma} = \text{Cte}$).

La discussion du cas des peintures – mais cela est vrai pour tous les fluides thixotropes – montre bien le couplage entre un temps t_C , caractéristique de la déstructuration ou de la restructuration, d'une part, et la durée d'observation t_E ($\approx$ le temps de séchage pour les peintures), d'autre part. Pour caractériser ce couplage, on utilise parfois un nombre égal au rapport de t_C sur t_E , qui est appelé nombre de Déborah, De (du nom de la prêtresse dont il a été question dans l'introduction) ou encore nombre de Weissenberg. De plus, soulignons que ces changements de structure n'ont lieu que si l'amplitude de l'excitation dépasse une valeur critique. Au-dessous de cette valeur, on observe un comportement qualifié de linéaire, avec une viscosité constante (*i.e.* un comportement newtonien) puisqu'aucun changement de structure n'a eu lieu.

Mais la nature de ce comportement dépend encore de la valeur de De : comportement élastique aux temps courts ($De \gg 1$) et comportement visqueux aux temps longs ($De \ll 1$), le domaine intermédiaire ($De \approx 1$) étant celui du comportement viscoélastique. C'est ce dernier comportement qui va être discuté maintenant.

3. Qu'est-ce que la viscoélasticité ?

Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses. Mais, à condition de posséder une structure relativement complexe, ils présentent également des propriétés élastiques. Cette élasticité se manifeste en particulier par le fait que,

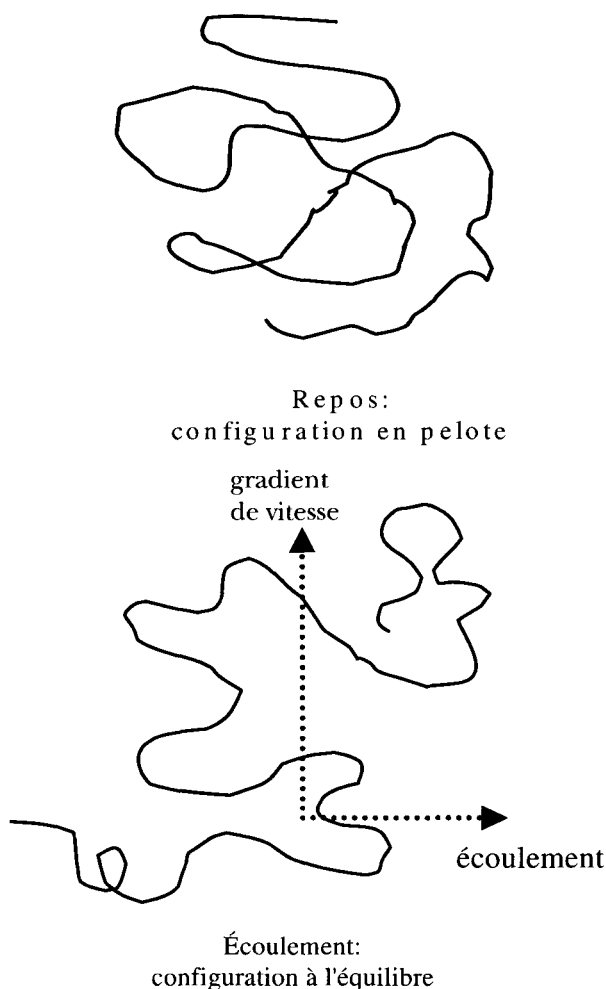


Figure 1.6 : Configurations des macromolécules en solution.

lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement, il apparaît un régime transitoire pendant lequel la structure de l'échantillon évolue avant de se stabiliser. Si l'on considère par exemple le cas d'une solution de polymère, l'application brutale d'un cisaillement va faire évoluer la conformation des macromolécules d'une configuration repliée sur elle-même (de type pelote statistique) à une configuration plus étirée (Fig. 1.6). Il est facile de comprendre qu'en passant de l'état de repos à l'état d'équilibre sous cisaillement, la macromolécule emmagasine de l'énergie élastique, qu'elle est susceptible de restituer après suppression du cisaillement: tout se passe comme si la macromolécule jouait le rôle d'un ressort.

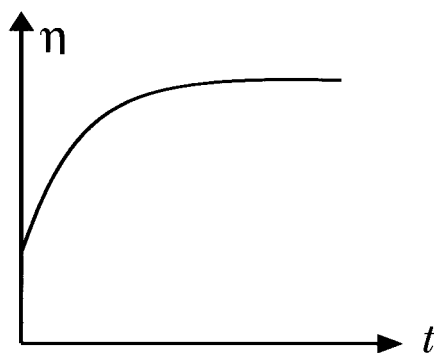


Figure 1.7 : Fluage d'un liquide viscoélastique.

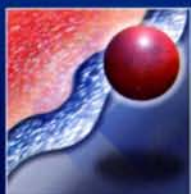
Les processus mis en jeu pour atteindre la configuration d'équilibre sont des mécanismes de réarrangement moléculaire. On imagine que, si on a affaire à une structure complexe, il y aura plusieurs processus de réarrangement moléculaire. Si on considère par exemple un polymère fondu à longue chaîne dans un état enchevêtré, il est évident que la chaîne va réagir à l'application d'un cisaillement brutal par des mécanismes différents. Certains vont faire intervenir les mouvements locaux des segments et monomères : ce sont des mouvements à petite échelle qui seront caractérisés par des temps « courts » (avec la même signification que celle adoptée lors de la définition du nombre de Déborah). Ces mouvements mettent donc en jeu l'élasticité des chaînes, d'abord une élongation brutale, qui correspond à l'*élasticité instantanée*, suivie, en général, d'une élongation ralentie par les frottements internes des chaînes, qui correspond à l'*élasticité retardée*. D'autres mécanismes vont faire intervenir des mouvements de l'ensemble de la chaîne : ce sont les mouvements à grande échelle (mouvements de reptation, par exemple) qui seront caractérisés par des temps « longs » et qui correspondront à l'écoulement du matériau. Les tests transitoires qui consistent à imposer brutalement une contrainte constante (test de *fluage*) ou une vitesse de déformation constante (test de *relaxation*), permettent théoriquement d'obtenir le spectre de ces temps de réarrangement moléculaire, et qui sont appelés respectivement temps de retard et temps de relaxation.

C'est pourquoi l'état d'équilibre sous cisaillement n'est pas atteint instantanément. Dans le cas particulier du fluage résultant de l'application brutale d'une contrainte, on observe que la viscosité augmente avec le temps jusqu'à atteindre un plateau lorsque la configuration d'équilibre est atteinte (Fig. 1.7). On parlera d'*élasticité retardée*, par opposition à l'élasticité instantanée de l'état solide.

Nous reviendrons au § 5.1, dans le cas particulier des tests de relaxation, sur ces propriétés des régimes transitoires.

Comprendre la Rhéologie

DE LA CIRCULATION DU SANG
À LA PRISE DU BÉTON



COORDINATEURS
PHILIPPE COUSSOT
JEAN-LOUIS GROSSIORD

La rhéologie est la science de la matière en écoulement. Cet ouvrage propose pour la première fois un panorama des concepts essentiels en rhéologie au travers de ses applications à des domaines aussi divers que la biologie, le génie civil, l'industrie des matières plastiques, les cosmétiques, les fluides agro-alimentaires ou encore les fluides naturels. On apprend ainsi par exemple que les polymères, qui jouent un rôle prépondérant dans notre vie moderne, peuvent être tantôt rigides, tantôt élastiques, tantôt liquides, selon la façon dont on les sollicite et que ceci provient de l'arrangement des molécules longues qui les constituent. On y découvre aussi que la peinture résulte d'une alchimie particulière qui lui permet de couler facilement lorsqu'on l'étale et de se figer instantanément juste après. On y apprend encore que le sang est un fluide très complexe constitué de globules qui peuvent s'arranger collectivement pour en augmenter sa viscosité mais sont aussi capables de s'allonger pour se faufiler dans les plus petits vaisseaux sanguins. Ces quelques exemples montrent que la rhéologie touche de nombreux domaines de l'activité humaine, et que notre compréhension des écoulements de fluides complexes passe par la mise en commun de connaissances en physique, chimie, biologie, mécanique ou mathématique.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de second cycle, aux ingénieurs et aux chercheurs de toute disciplines curieux de découvrir les diverses techniques permettant de comprendre les fluides complexes ainsi que les nombreux domaines d'application.

Les auteurs sont des universitaires ou des praticiens qui se sont attachés à rendre leurs connaissances accessibles à un large public scientifique.



9 782868 835468

ISBN : 2-86883-546-5

www.edpsciences.org

 **EDP**
SCIENCES