

## Traitement, Synthèse, Technologie et Applications

BIARRITZ - Mai 1984 -

Réf.107.

Visualisation des résultats de simulation de mécanique des fluides

Display of simulation results in fluid mechanics

François DUPRET

Unité de Mécanique Appliquée, Université Catholique de Louvain  
Bâtiment Stévin, Place du Levant 2, 1348-LOUVAIN-la-NEUVE, Belgique.

**RÉSUMÉ**

Réaliser des films scientifiques devient un des moyens de communiquer les résultats de simulations numériques.

Dans le cas de problèmes de Mécanique des Fluides, il est utile de diviser le processus en deux étapes, correspondant chacune à un programme différent. La première est l'intégration des vitesses dans le temps, pour avoir des coordonnées. La seconde est l'assemblage des résultats en une image animée et le contrôle de la prise de vues. Cette façon de faire peut être adaptée à un matériel très divers.

Le cas particulier des écoulements polymériques est celui qui a fait l'objet du travail présenté ici. Il fallait mettre en évidence l'existence de recirculations importantes dans les contractions et l'accroissement du taux de gonflement des jets sortant de filières. Ce dernier effet peut également être dû à l'action de la capillarité.

Le résultat obtenu est extrêmement satisfaisant. La qualité esthétique du film est en relation directe avec la souplesse de la procédure suivie et a une forte influence sur l'impact final de la réalisation.

Il est clair qu'on peut s'attendre à un grand développement de produits de ce genre, rendu possible par l'usage de programmes souples s'adaptant à un matériel varié.

**SUMMARY**

Production of scientific films is fast becoming one of the means of communicating results of numerical simulations.

In the case of Fluid Mechanics problems, it is advisable to divide the process into two steps, each corresponding to a different program. The first one is the integration of the velocities, in order to obtain the coordinates. The second one is the assembly of the results into a movie and control of the shooting. Such a methodology may be adapted to various kinds of equipment.

The particular case of polymeric flows was the object of the present work. The aim was to highlight the existence of important recirculations in contractions and the increase of the swelling ratio of jets at the outlet of slit dies. The latter effect may also be due to capillarity.

The result obtained is very satisfactory. The aesthetic quality of the film is directly related to the flexibility of the procedure and has a great influence on the final impact of the production.

It is clear that one may expect a great development of such products, made possible through flexible programs which can be adapted to different kinds of equipment.



### 1. Introduction

L'Unité de Mécanique Appliquée à Louvain-la-Neuve (Belgique) a réalisé récemment un film d'une durée d'environ 15 minutes, afin de visualiser divers effets dans des écoulements polymériques, à partir de résultats chiffrés entièrement obtenus par simulation numérique sur ordinateur. Notre communication porte sur cette expérience dont on peut trouver ici une analyse des points les plus importants.

Il faut noter au préalable que pour les unités de recherche, la réalisation de films scientifiques est rarement un objectif principal; c'est plutôt un moyen de communiquer les résultats de travaux plus importants dans un but didactique ou commercial; c'est plus rarement un outil de compréhension approfondie des phénomènes.

De là résulte souvent la nécessité de travailler avec des moyens relativement restreints, du point de vue cinématographique proprement dit.

Pourtant le développement accéléré de l'infographie montre qu'il s'agit d'un domaine appelé à une grande expansion, d'où l'intérêt d'écrire des logiciels de plus en plus efficaces.

L'étude mathématique puis numérique de l'écoulement d'un fluide fournit généralement des vitesses, des contraintes et éventuellement des températures, en un certain nombre de points formant un réseau.

D'un autre côté, les effets les plus importants (et les plus saisissants) dans une animation sont obtenus en reconstituant le mouvement des points matériels, tel qu'une expérience réelle aurait pu le montrer. Le fluide peut par exemple être marqué en un grand nombre de points (un nuage) dont on observe le mouvement. On peut aussi tracer une ligne de colorant dont on étudie la déformation dans le temps. On peut également émettre du colorant à partir de points fixes et analyser où les lignes d'émission qui en sont issues passent.

La simulation de telles expériences, à partir des valeurs chiffrées des vitesses sur un réseau, requiert donc d'abord la constitution d'un programme (lagrangien) d'intégration de ces vitesses pour avoir le mouvement des points matériels, sous forme de familles de paires coordonnées à différents instants.

A partir de cette masse d'informations, il faut ensuite obtenir une séquence d'images. On peut faire en sorte que celles-ci se succèdent directement sur l'écran, à cadence rapide (avec la possibilité de filmer en continu à ce moment). On peut également exposer les images une à une, en faisant contrôler le temps d'exposition et le déclenchement de la caméra par l'ordinateur (travail image par image).

De toute façon, ce choix (ainsi que beaucoup d'autres) est dicté par des contraintes techniques liées au matériel utilisé.

Le paragraphe suivant est consacré à une description de celui dont notre unité de recherche disposait. La méthode de travail qui a été choisie de ce fait est ensuite exposée. Enfin, les différentes séquences constituant le film réalisé sont brièvement décrites et commentées.

### 2. Description du matériel utilisé

La fig.1 montre le schéma général de l'installation à l'époque où le film a été fait.

Afin d'avoir une idée rapide des limites imposées par chacune des composantes du système, il est utile de définir une unité de vue. C'est un ensemble de 500 points matériels en mouvement pendant une séquence de 21 secondes environ projetée à la cadence de 24 images par seconde, soit un total de 500 segments d'image.

La position de chaque point est décrite par deux coordonnées qu'on code chacune en virgule fixe, dans

2 octets. En fait, 12 bits sont consacrés à la coordonnée proprement dite et les 4 bits restants sont utilisés pour transmettre des informations de contrôle; il faut en effet indiquer si le spot doit être seulement positionné à l'endroit indiqué, s'il faut tirer un trait jusque là à partir de la position précédente ou y dessiner un point. Un meilleur choix serait peut-être de consacrer 15 bits à la coordonnée et seulement un bit au contrôle. Des possibilités d'agrandissements beaucoup plus importants seraient ainsi préservées.

Une unité de vue correspond donc à un volume global d'information de 1 Moctets, et à un volume d'information par image de 2 Koctets.

L'ordinateur était capable de traiter des programmes ne dépassant pas 64 Koctets (avec des possibilités d'extension par "overlay"). Il lui était adjoint 4 contrôleurs de disques magnétiques de 2,5 Moctets chacun, leur vitesse de transfert de données étant de 1,5 Mbauds, plus un délai de 10 à 100 msec. pour le positionnement de la tête de lecture sur le disque. Il faut ajouter à cela 1 lecteur de bandes magnétiques 800 BPI, celles-ci ayant une capacité d'environ 15 Moctets.

D'autre part, l'écran graphique était un écran interactif à images régénérées 30 fois par seconde, avec accès direct à la mémoire centrale de l'ordinateur. Deux points importants doivent être notés : l'ensemble des instructions graphiques d'un programme ne pouvait dépasser 16 Koctets, soit 8 unités de vue (compte non tenu des rotations et translations éventuelles permettant de multiplier les vues d'un même segment). De plus, quand le nombre de points effectivement visibles (en incluant cette fois ceux qui sont ajoutés par rotation ou translation) dépassait environ 2000, soit 4 unités de vue, un phénomène de scintillement apparaissait sur l'écran, à cause d'une régénération trop lente de l'image.

Enfin, la caméra était une 16mm utilisée en marche image par image avec déclenchement pneumatique contrôlé par le programme, un temps d'exposition de 2 à 4 secondes étant chaque fois requis. Les films produits étaient normalement en blanc sur fond noir, avec une possibilité de copie sur vidéo offerte par le centre audiovisuel de l'UCL.

### 3. Méthode de travail

Le processus menant à l'obtention d'un film à partir de résultats de simulations numériques a été divisé par nous en deux phases.

La première (fig.2) est l'utilisation un certain nombre de fois du programme lagrangien, afin de créer la séquence des familles de coordonnées correspondant à chacun des segments de l'image finale.

La seconde (fig.3) est l'assemblage de ces segments, en modifiant éventuellement leurs attributs, afin de créer l'image définitive, instant par instant. C'est pendant cette phase que se fait la prise de vues.

Les avantages d'une telle procédure sont multiples. La première phase est réservée à des calculs plutôt longs, ce qui permet de réduire la durée de la seconde, qui est techniquement bien plus délicate. D'autre part, le programme d'assemblage des segments peut être écrit de manière tout à fait indépendante de leur provenance, ce qui permet d'y inclure des éléments obtenus par des programmes différents.

Notre programme lagrangien est adapté à des résultats provenant de simulations faites par la méthode des éléments finis. Sa partie la plus importante est la recherche de l'élément d'appartenance d'un point matériel, pour l'intégration dans le temps du champ de



vitesse en une suite de paires de coordonnées (par une méthode de Runge-Kutta d'ordre 2). Etant donné que les points matériels bougent peu entre deux images successives, on peut admettre qu'il y a une très forte présomption pour qu'un point ne change pas d'élément. On a donc construit l'algorithme de recherche en testant d'abord le dernier élément occupé par le point matériel, ensuite les éléments adjacents par un côté ou un sommet, enfin les autres, afin de réduire les calculs. Le test d'appartenance proprement dit est construit en cherchant les coordonnées locales dans l'élément envisagé, par une méthode de Newton (pour tout élément autre qu'un triangle à côtés rectilignes).

Une autre composante du programme lagrangien est le module de génération des points matériels, celle-ci pouvant être faite de manière régulière (aux noeuds d'une grille) ou aléatoire. Il est intéressant de noter que si des points matériels sont générés de manière aléatoire dans un domaine, avec une densité de probabilité constante, leur configuration évoluera dans le temps mais le caractère homogène de leur distribution sera conservé, s'il s'agit d'un écoulement de fluide incompressible. Il faut éventuellement prévoir un module de génération continue de points matériels aux sections d'entrée de l'écoulement.

On ajoutera que l'extension de ce programme à des résultats de problèmes transitoires ou de certains problèmes tridimensionnels (comprenant une composante tangentielle de la vitesse, outre les composantes axiale et radiale) ne pose aucun problème.

Le programme d'assemblage des segments en une image et de contrôle de la prise de vues possède différentes propriétés.

Tout d'abord les attributs des segments (taille, position, orientation, couleurs dans le futur) peuvent être modifiés afin de permettre une réelle mise en scène.

D'un autre côté, il est possible de se faire une idée préliminaire du résultat final en faisant succéder rapidement les images sur l'écran; la technique consiste à préparer une image (lecture des segments et utilisation des routines graphiques) pendant que l'image précédente est visible, afin d'avoir une vue continue du phénomène. Bien que cette méthode soit particulièrement appropriée au cas d'un écran avec accès direct à la mémoire de l'ordinateur, les films n'ont pu être effectués de cette manière parce que le temps de régénération des images était trop long, que la mémoire qu'elles occupaient dans l'ordinateur central était doublée et qu'enfin le phénomène de scintillement de l'écran apparaissait fréquemment. Cependant de tels tests sont très utiles pour des démonstrations ainsi que pour permettre une mise au point du produit final avant de passer à la prise de vues.

Celle-ci est effectuée par l'intermédiaire du même module, mais le temps d'exposition de chaque segment est contrôlé par le programme. Il est possible de plus de les exposer en groupes, afin de ne pas aboutir à un temps de prise de vues excessif.

#### 4. Résumé du film et commentaire

Le but était la visualisation de phénomènes particuliers aux écoulements de polymères. Ceux-ci ont un caractère élastique - ce sont des fluides à mémoire - et leur comportement diffère de celui des fluides Newtoniens habituels. Le film est divisé en 4 parties, chacune correspondant à une question différente.

La première partie est consacrée à l'étude comparative du comportement d'un fluide Newtonien et d'un fluide très élastique dans une contraction brusque axisymétrique, le rapport des diamètres étant de 4 à 1. Un fait important (et néfaste du point de vue technique) est l'apparition, dans le cas du fluide élastique, d'une recirculation importante dans le

coin rentrant.

La première séquence montre les évolutions différentes de deux lignes de colorant tracées verticalement dans le fluide au temps initial (fig.4). On peut observer l'influence de la zone de recirculation sur le comportement du fluide élastique (en bas). Le calcul de chaque ligne a demandé un passage du programme lagrangien, portant sur le mouvement de 500 points matériels, soit une unité de vue. Les images sont faites de 4 unités de vues (8 si on tient compte de ce que chaque ligne a été obtenue par réflexion d'une demi-ligne autour de l'axe).

La seconde séquence (2 unités de vue) montre l'évolution d'une ligne tracée plus près de la contraction (fig.5). Cette fois, la zone de recirculation dans le fluide élastique est traversée par la ligne de colorant, dont la partie correspondante s'enroule sur elle-même sans quitter le domaine étudié.

La troisième séquence (3 unités de vue) est une étude de détail de cette recirculation (fig.6). Un nuage de points matériels marqués au temps initial se divisera en deux parties dont l'une quittera le domaine après un certain temps et l'autre (la recirculation) tournera indéfiniment sur elle-même.

La deuxième partie du film est une comparaison de même type que la précédente, mais cette fois dans le cas d'écoulements au sortir d'une filière plane. Le phénomène connu de gonflement du jet s'amplifie fortement dans le cas d'un fluide élastique.

La première séquence (1/4 unités de vue) montre l'évolution de lignes de colorant émises à partir d'une quarantaine de points différents du domaine (fig.7).

La seconde séquence (1 unité de vue) est consacrée à une étude de détail du comportement du fluide élastique au voisinage du coin d'où le jet se détache (fig.8). L'usage d'un nuage de points matériels, cette fois régulièrement disposés au temps initial, permet de mieux appréhender la déformation dans le fluide.

La troisième partie du film met en évidence l'influence de la capillarité sur le gonflement du jet : le point de détachement remonte sur la paroi au-delà du coin et l'épaisseur finale du jet est accrue.

La première séquence (2 unités de vue) montre l'évolution de deux lignes de colorant tracées verticalement dans le fluide au temps initial (fig.9).

La seconde séquence (4 unités de vue) est un agrandi de la région du coin (fig.10). L'évolution d'un nuage de points entouré de trois lignes de colorant donne une image saisissante du comportement du fluide.

La quatrième partie est de nouveau une comparaison du comportement d'un fluide Newtonien et d'un fluide élastique dans le cas de l'étirage de fibres.

La première séquence (1/4 unités de vue) montre de nouveau des lignes d'émission (fig.11).

La seconde séquence (1/2 unité de vue) montre, sur une certaine masse de points marqués au temps initial dans le fluide élastique, l'influence de l'étirage : allongement dans la direction axiale, rétrécissement dans la direction radiale et accélération progressive (fig.12).

#### 5. Conclusions

Les exemples traités illustrent des comportements variés en Mécanique des Fluides. Ils mettent aussi en évidence la qualité des solutions numériques obtenues. Ce résultat (souhaité) a été atteint par un travail comportant une réelle mise en scène, rendue possible par la procédure utilisée.

Bien que de nombreux choix aient été liés au matériel disponible, cette dépendance est appelée à se résorber dans le futur par l'usage de programmes



généraux capables de s'adapter à des situations diverses.

La réalisation du film n'a été possible que grâce à la collaboration importante de M.L. Vanderschuren. La mise au point du programme lagrangien a été faite par MM. J.M. Fabry et S. de Pierpont. Enfin, l'assistance technique de M. G. Donders s'est avérée bien utile.

Les études numériques ont été faites par MM. M.J. Crochet, F. Dupret et R. Keunings.

6. Figures

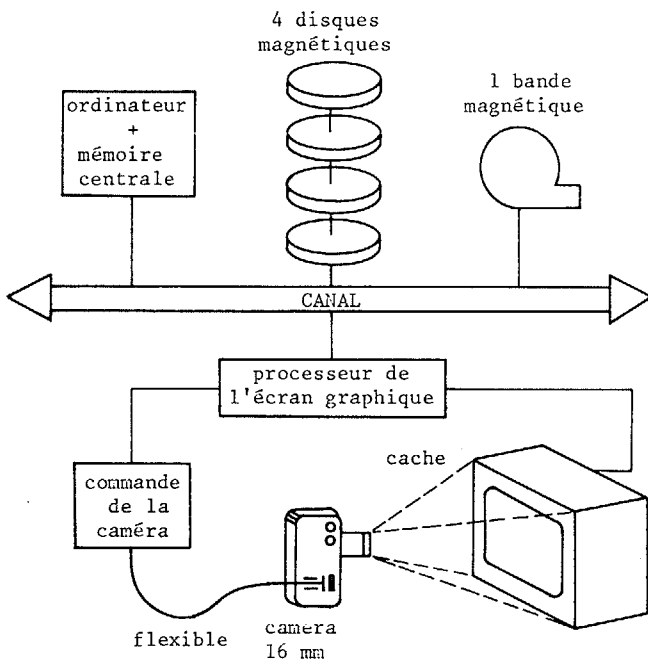


Figure 1.

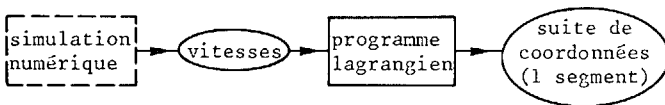


Figure 2.

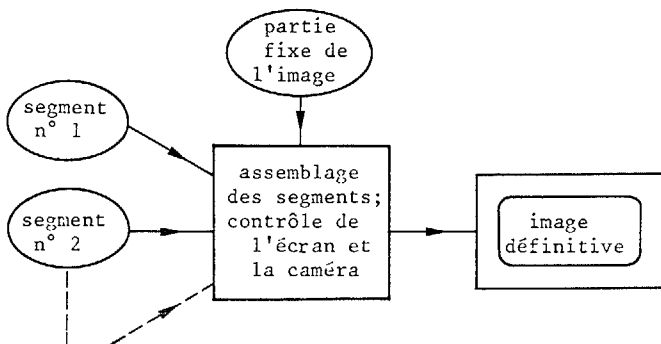


Figure 3.

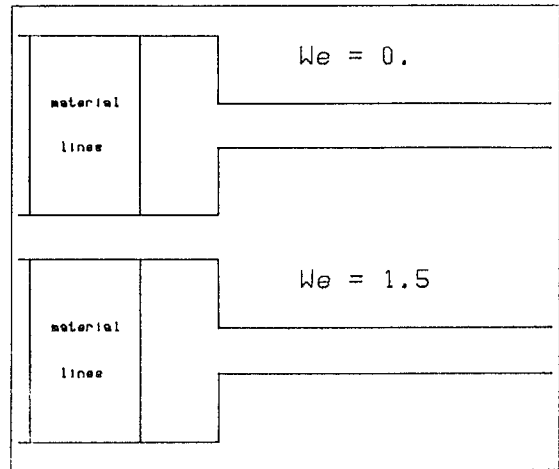


Fig.4.a Contraction 4/1, 1<sup>e</sup> séquence. Lignes matérielles au temps initial. Fluide newtonien en haut, non-newtonien en bas.

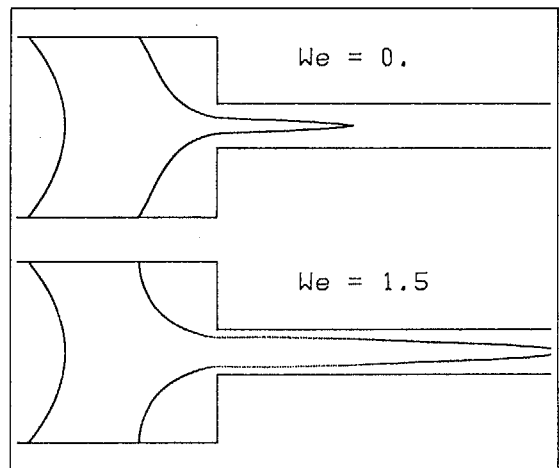


Fig.4.b Contraction 4/1, 1<sup>e</sup> séquence. Lignes matérielles de la Fig.4.a aux 2/3 de la séquence.

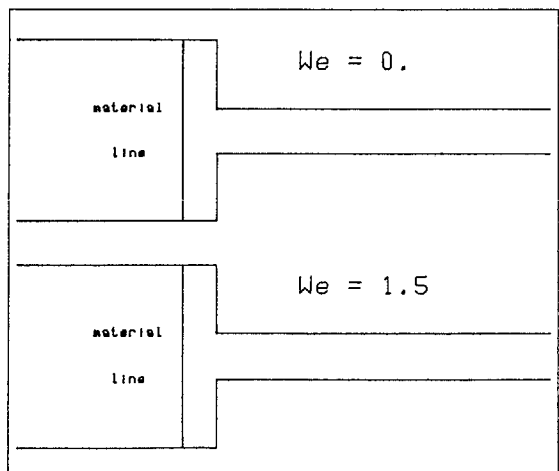


Fig.5.a Contraction 4/1, 2<sup>e</sup> séquence. Ligne matérielle au temps initial. Fluide newtonien en haut, non-newtonien en bas.

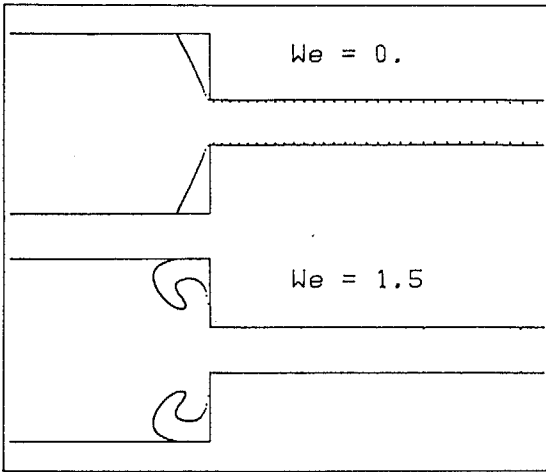


Fig.5.b Contraction 4/1, 2<sup>e</sup> séquence.  
Ligne matérielle de la Fig.5.a, à la fin de la séquence.

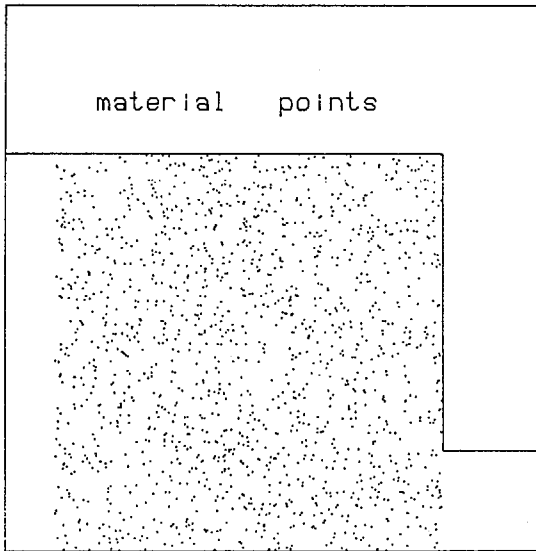


Fig.6.a. Contraction 4/1, 3<sup>e</sup> séquence.  
Fluide non-newtonien, agrandi de la région du coin.  
Points matériels au temps initial.

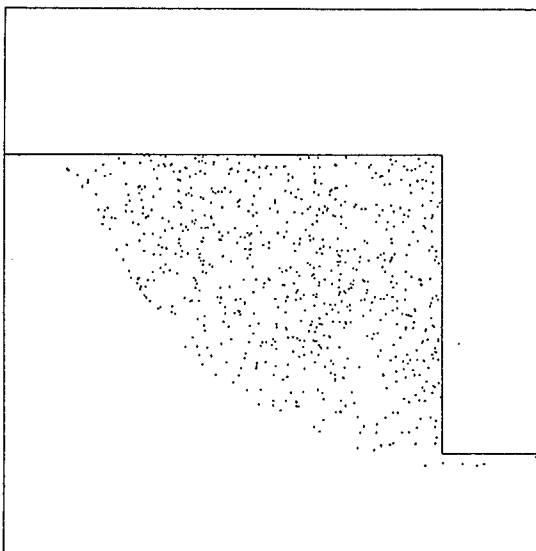


Fig.6.b Contraction 4/1, 3<sup>e</sup> séquence.  
Points matériels de la Fig.6.a, à la fin de la séquence.

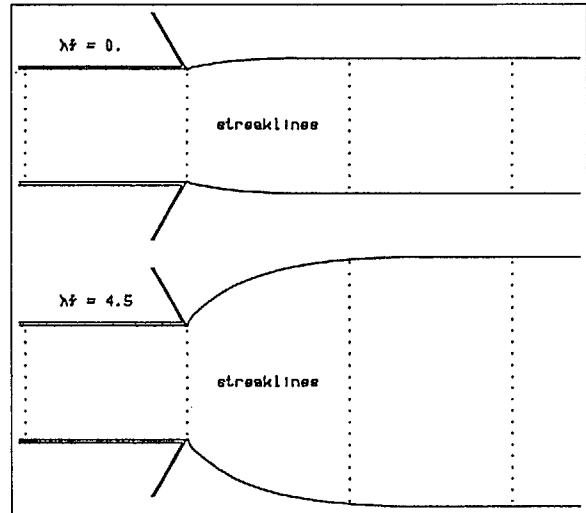


Fig.7.a Sortie d'une filière plane, 1<sup>e</sup> séquence.  
Points de départ des lignes d'émission.  
Fluide newtonien en haut, non-newtonien en bas.

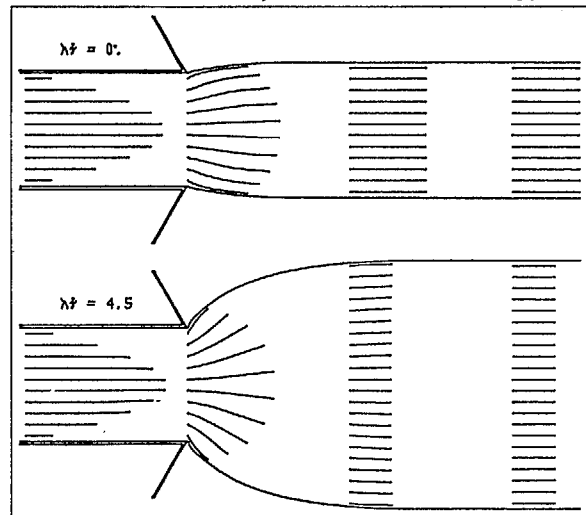


Fig.7.b Sortie d'une filière plane, 1<sup>e</sup> séquence.  
Lignes d'émission à la fin de la séquence.

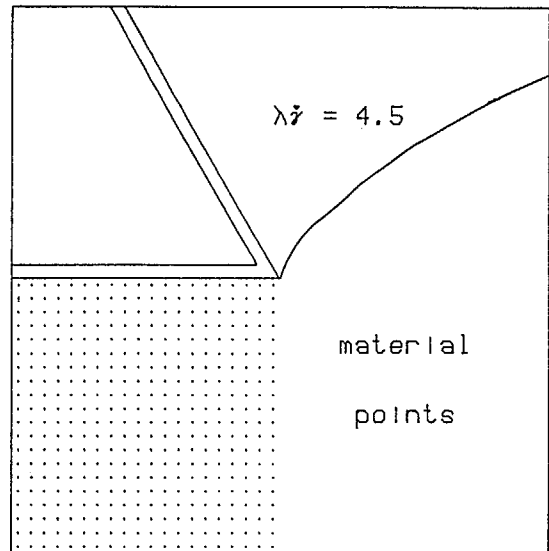


Fig.8.a Sortie d'une filière plane, 2<sup>e</sup> séquence.  
Fluide non-newtonien, agrandi de la région de sortie.  
Points matériels au temps initial.



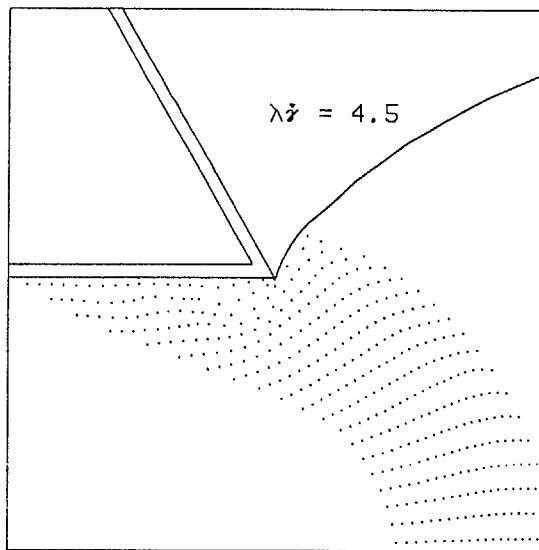


Fig.8.b Sortie d'une filière plane, 2<sup>e</sup> séquence. Points matériels de la Fig.8.a à la moitié de la séquence.

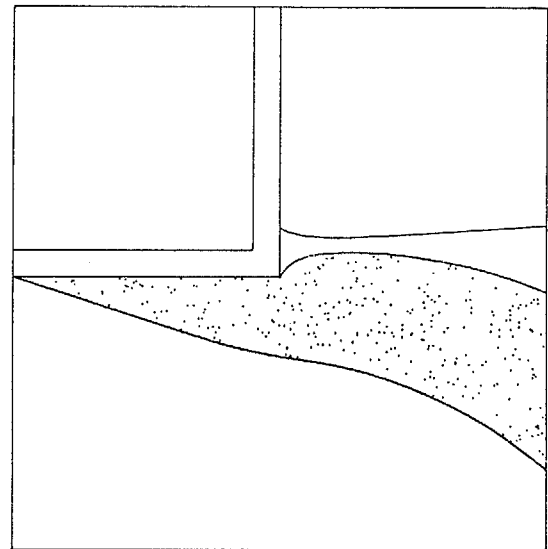


Fig.10.b Effets capillaires à la sortie d'une filière plane, 2<sup>e</sup> séquence. Lignes et points matériels de la Fig.10.a aux 2/3 de la séquence.

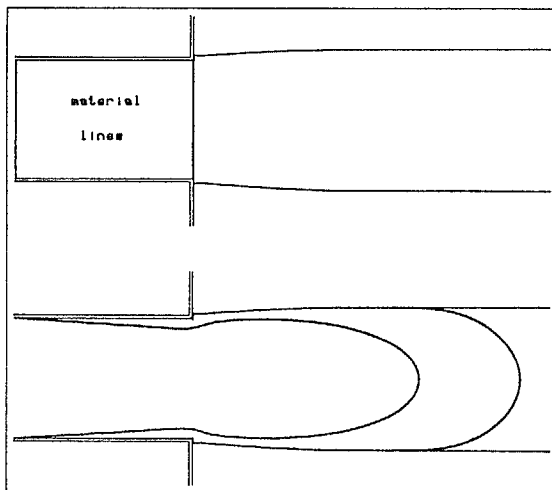


Fig.9 Effets capillaires à la sortie d'une filière plane, 1<sup>e</sup> séquence. Lignes matérielles au temps initial (en haut) et à la fin de la séquence (en bas).

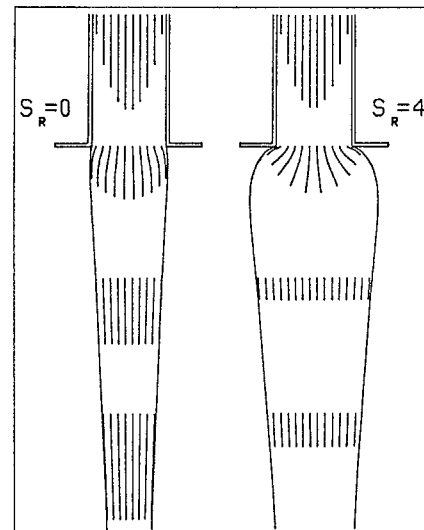


Fig.11 Etirage de fibres, 1<sup>e</sup> séquence. Lignes d'émission à la fin de la séquence.

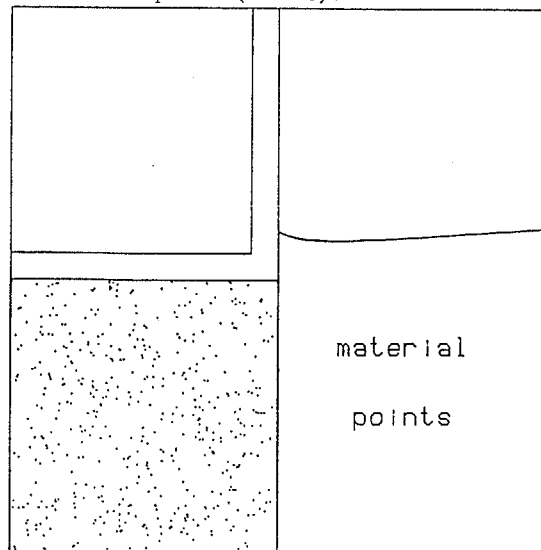


Fig.10.a Effets capillaires à la sortie d'une filière plane, 2<sup>e</sup> séquence. Agrandi de la région de sortie. Lignes et points matériels au temps initial.

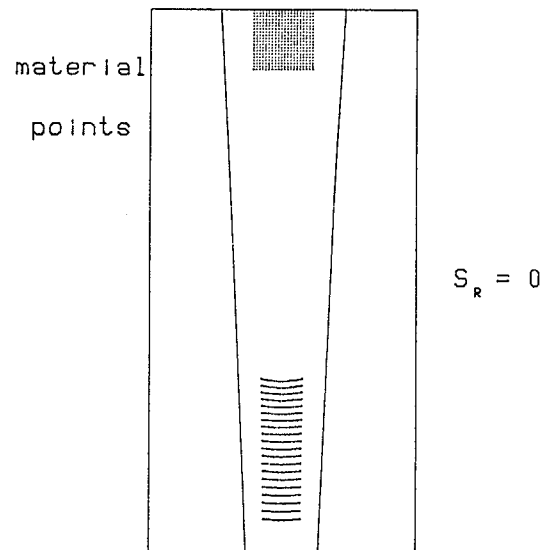


Fig.12 Etirage de fibres, 2<sup>e</sup> séquence. Points matériels au début et à la fin de la séquence.