

ÉVOLUTION DES PROFILS DE VITESSE LORS DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE MODÈLE THIXOTROPE

F. MOLLET, M. LÉBOUCHÉ,
A. GÉRARD & J-C. WOIMBÉE
LEMTA - CNRS URA 875, UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 160
54504 VANDOEUVRE lés NANCY

Résumé :

L'étude que nous allons présenter a pour objet de mieux connaître le comportement d'un fluide modèle thixotrope lors de son écoulement en conduite cylindrique.

Le fluide modèle que nous utilisons est une suspension d'argile dans un polymère. Ce fluide est susceptible de déstructuration et de restructuration au cours du temps.

Les propriétés optiques du fluide ne permettant pas l'étude des profils de vitesse à l'aide de la vélocimétrie LASER, il nous a paru intéressant d'utiliser la vélocimétrie Ultrasonore basée sur l'effet Doppler pulsé [1].

Nous montrerons l'évolution spatiale et temporelle des profils de vitesse après avoir décrit la veine d'essais mise en place.

Introduction.

Les fluides complexes font l'objet de très nombreuses études depuis fort longtemps, dans des domaines aussi différents que l'agro-alimentaire, les céramiques, les boues de forages pétroliers et bien d'autres. Les travaux menés jusqu'à présent ont surtout eu pour objet de définir des modèles de comportement pour ces fluides et un nombre très important d'articles nous donnent des informations rhéologiques sur un nombre non moins important de fluides complexes[2], [3].

Les fluides thixotropes [4] font l'objet d'une attention toute particulière, puisqu'ils ont des propriétés de déstructuration et de restructuration au cours du temps. Comme exemples nous pouvons donner : les peintures thixotropes, les boues de forage, les céramiques, les aliments pour nouveau nés. Pour ces fluides, de nombreuses études rhéologiques ont déjà été menées. Il n'existe pourtant, à l'heure actuelle, que très peu de travaux sur l'écoulement en situation réelle de ces fluides.

En effet, la plupart de ces fluides, pour ne pas dire tous, sont opaques et fortement chargés en particules. Il est alors difficile, voire impossible, d'utiliser les moyens d'investigation désormais classiques que sont le fil chaud et la vélocimétrie LASER. Il faut alors choisir une nouvelle technique : la vélocimétrie Ultrasonore.

I) Description du Vélocimètre Ultrasonore.

La vélocimétrie ultrasonore n'est pas nouvelle; elle est même utilisée depuis plusieurs années dans différents laboratoires, mais depuis quelques années cette technique s'est fortement développée.

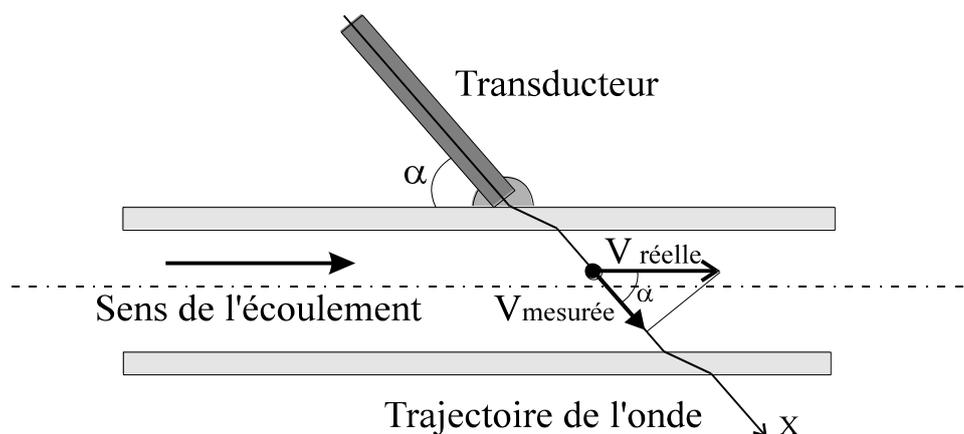


figure 1

Trajet de l'onde ultrasonore et définition des vitesses.

Cette technique, basée sur l'effet DOPPLER pulsé, nous permet désormais d'acquérir, en un temps très court, un profil de vitesse complet, alors

qu'il était fastidieux d'obtenir ces mêmes profils avec les techniques précédemment citées.

Sans entrer trop dans les détails, nous rappelons les relations fondamentales qui nous permettront de déterminer les vitesses dans l'écoulement. Comme le montre la figure 1, un transducteur (émetteur et récepteur) envoie une onde ultrasonore suivant une trajectoire X, repérée par un angle α par rapport à la direction de l'écoulement. La paroi du tube pouvant être considérée comme une lame à faces parallèles l'onde, bien que réfractée lors de son passage dans la paroi, ressort avec un angle identique à celui correspondant au positionnement du capteur. Une particule intercepte le faisceau et réfléchit une onde dont la fréquence a été modifiée en fonction de la vitesse de cette particule. On définit alors la fréquence Doppler f_D , ainsi que la vitesse de la particule dans la direction de l'onde $V_{\text{mesurée}}$, et dans la direction de l'écoulement $V_{\text{réelle}}$. La fréquence Doppler est fonction de la fréquence de base des ultrasons f_0 et de la célérité c de l'onde dans le milieu considéré.

$$(1) \quad f_D = f_0 \frac{V_{\text{mesurée}}}{c}$$

$$(2) \quad V_{\text{mesurée}} = c \frac{f_D}{f_0}$$

$$(3) \quad V_{\text{réelle}} = \frac{V_{\text{mesurée}}}{\cos\alpha}$$

Cette méthode nous renseigne également sur le signe de la vitesse et donc sur les éventuelles recirculations qui pourraient se produire au sein de l'écoulement.

Un signal de fréquence f_0 est émis par le transducteur pendant un temps ΔT . Le transducteur sert alors de récepteur et nous enregistrons l'écho du signal émis dans le temps. Un échantillonnage du signal reçu permet de définir une fréquence Doppler en chaque point de mesure (voir figure 2).

La position de la cible est alors définie par le temps de vol des ultrasons pour parcourir le chemin aller retour transducteur - cible (relation 4).

$$(4) \quad x = c \frac{n \cdot \Delta t}{2}$$

Le signal émis est pulsé à une fréquence $F_{\text{pulsation}}$ afin d'obtenir une succession de profils de vitesses.

Le temps d'acquisition d'un profil de vitesse est fonction de la fréquence de pulsation $F_{\text{pulsation}}$. La durée totale du traitement des informations est de l'ordre de 100 ms, ceci nous donne la possibilité d'observer l'évolution des profils de

vitesse dans le temps lorsque le temps caractéristique est supérieur à celui d'acquisition du signal. L'appareil que nous utilisons nous permet d'enregistrer jusqu'à 1024 profils successifs.

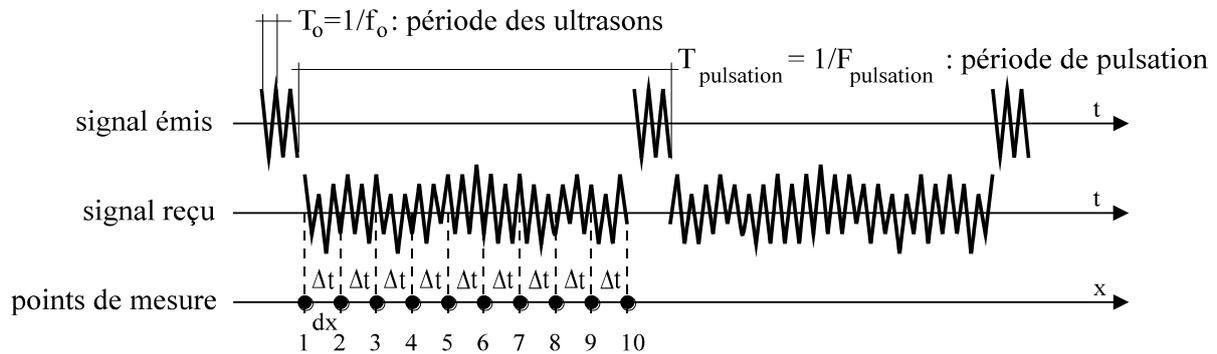


figure 2
Signal ultrasonore pulsé.

Le vélocimètre, que nous avons mis en place, a été développé par la société suisse Met Flow S.A.; il est commercialisé par la société Dantec. Les caractéristiques de cet appareil sont les suivantes : la fréquence de base des ultrasons est de 4 MHz, la résolution spatiale est de 0,74 mm et la résolution en vitesses est 0,7 mm/s. Les vitesses maximales mesurables sont de 722 mm/s. La distance entre les points de mesures peut être ajustée entre 0,74 mm et 5,18 mm. Les limites de l'appareil sont données par le critère d'échantillonnage de Nyquist :

$$(5) \quad P_{\max} = \frac{c}{2F_{\text{pulsation}}}$$

$$(6) \quad V_{\max} = \frac{c \cdot F_{\text{pulsation}}}{4f_0}$$

$$(7) \quad V_{\max} \cdot P_{\max} = \frac{c^2}{8f_0}$$

Dans ces trois relations, $F_{\text{pulsation}}$ est la fréquence de pulsation de l'onde ultrasonore, P_{\max} est la position la plus éloignée du dernier point de mesure, V_{\max} représente la vitesse maximale qui peut être mesurée. La résolution en vitesse est $V_{\max}/128$. La fréquence de base f_0 est donc essentielle.

II) Description de la veine de mesure.

Avant de passer aux résultats proprement dits, nous décrivons globalement la veine d'essais dans laquelle les profils de vitesse ont été réalisés.

La veine d'essais, dont une représentation est donnée sur la figure 3, est constituée, en amont, d'un réservoir de repos. Ce réservoir est raccordé à une

conduite cylindrique dans laquelle s'effectuent les mesures par l'intermédiaire d'un cône de rétrécissement. Cette conduite est la veine de mesures proprement dite; elle a une longueur de 4 m et un diamètre de 30 mm. En aval se trouve le réservoir de réception qui sert aussi à la fabrication du fluide modèle.

Le fluide thixotrope est laissé au repos dans le réservoir amont, pendant un temps suffisamment long pour qu'il ait le temps de se restructurer. Il est alors mis en mouvement par un piston qui se déplace à vitesse contrôlée et impose donc un débit contrôlé.

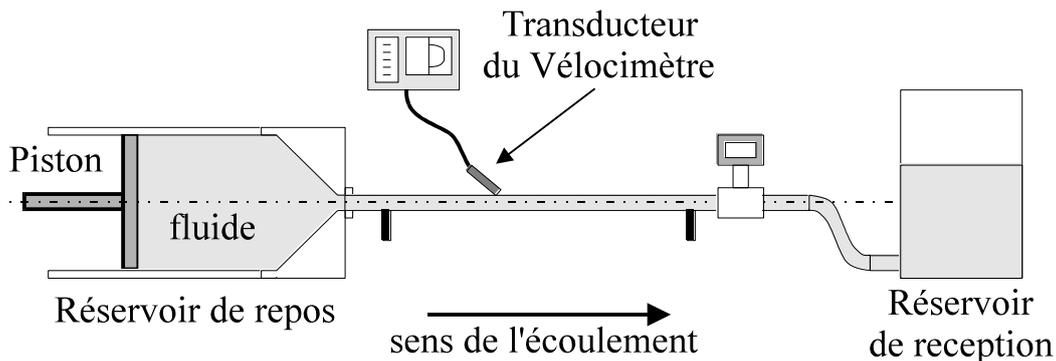


figure 3

Représentation globale de la veine d'étude des fluides thixotropes.

Nous mesurons, dans le temps et dans l'espace, l'évolution des pertes de charge mais aussi, et c'est l'objet de cette communication, l'évolution des profils de vitesse lors l'écoulement dans la veine de mesure. Pour mieux comprendre le comportement de notre fluide, nous avons également fait des mesures dans le cône de rétrécissement.

Comme le montre la figure 3, représentant la veine d'essais, la quantité de fluide est limitée, donc le temps d'acquisition des données est fonction du débit que nous étudions. C'est une raison supplémentaire pour l'utilisation de la vélocimétrie ultrasonore, technique relativement facile à mettre en oeuvre et donnant un nombre important de résultats avant que le réservoir de repos ne soit totalement vide.

III) Résultats Expérimentaux.

Dans ce paragraphe, nous allons donner les résultats expérimentaux correspondant à trois situations différentes, mais relatives à l'écoulement du même fluide thixotrope.

Nous montrerons, dans un premier temps, l'évolution des profils de vitesse le long de la conduite cylindrique. Puis, pour une position donnée du transducteur, nous observerons, au cours du temps, l'établissement de l'écoulement. Dans une troisième partie, nous nous intéresserons au champ des vitesses lors du passage du fluide dans le cône de rétrécissement.

III.1) Evolution spatiale des profils de vitesse.

Lors de l'étude de l'écoulement de notre fluide modèle thixotrope, nous avons cherché à connaître l'évolution des profils de vitesse le long de la conduite. Cette démarche nous a conduits à utiliser la vélocimétrie ultra sonore, qui nous permet d'enregistrer les profils de vitesse correspondant à des positions géométriques différentes, sans arrêter l'écoulement.

Le protocole d'expérimentation est le suivant : *Le fluide est mis en mouvement. L'enregistrement des profils se fait après un temps suffisant pour que le régime devienne quasi-stationnaire, c'est à dire sans évolution temporelle dans une section donnée. Nous enregistrons une succession d'au moins 500 profils afin de définir un profil moyen pour une position 'd' du transducteur vélocimétrique.*

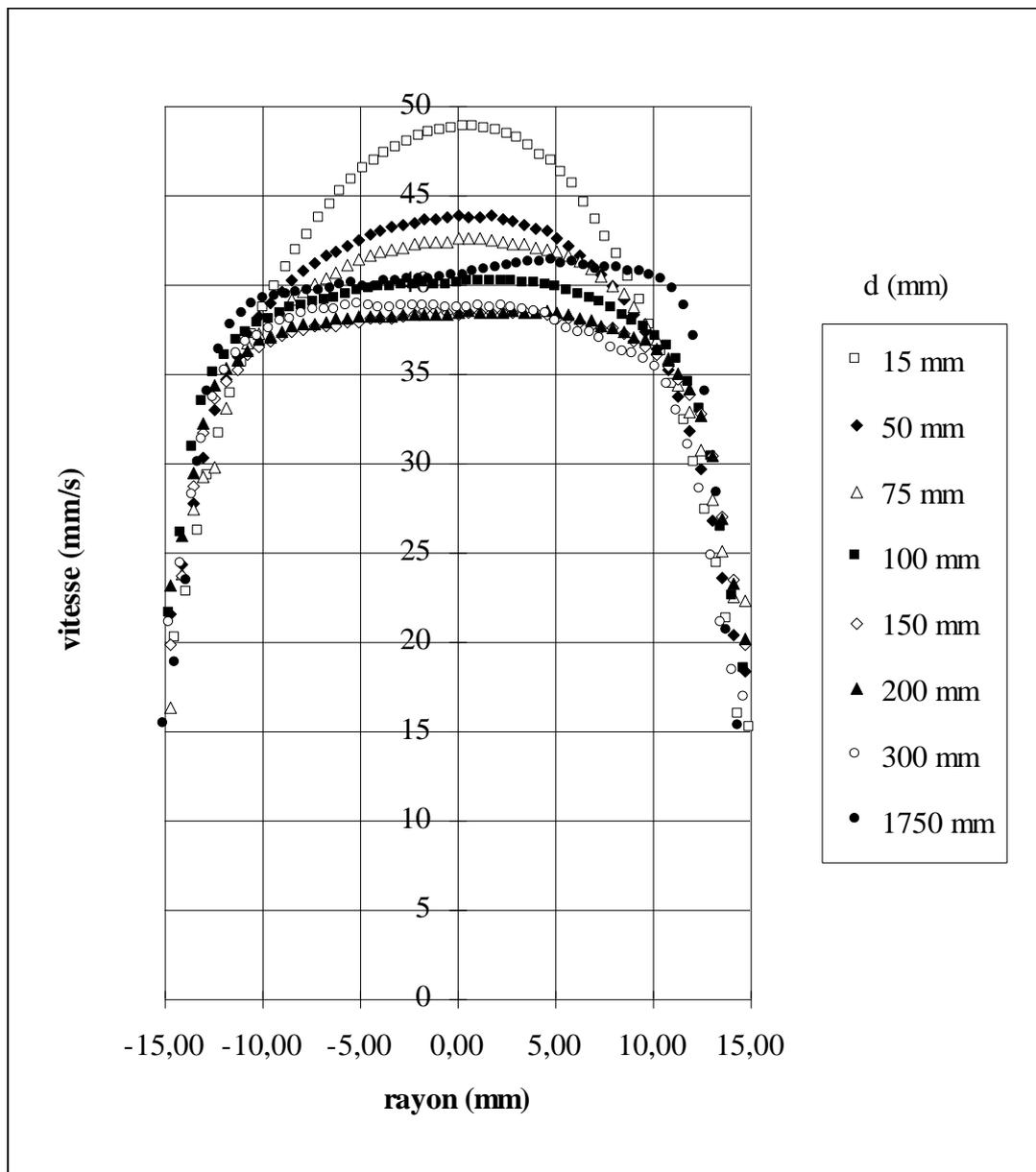


figure 4

Evolution des profils de vitesse à l'entrée de la veine de mesures.

Nous avons représenté sur la figure 4 les résultats obtenus dans une conduite de 30 mm de diamètre avec une vitesse débitante de 33,4 mm/s (c'est à dire un cisaillement nominal correspondant à un fluide newtonien de $8,9 \text{ s}^{-1}$). Le nombre de Reynolds, calculé avec une loi de comportement pour un fluide à seuil à l'équilibre ($\tau = 5,31 + 2,22\dot{\gamma}^{0,5497}$), vaut 0,5. La longueur d'établissement du régime dynamique pour un tel nombre de Reynolds est de l'ordre de 1 mm.

La figure 4 montre que les profils de vitesse évoluent dans la conduite au-delà de cette longueur d'établissement. Cette évolution, qui doit être considérée comme **une évolution dans le temps**, est due aux propriétés de restructuration du fluide thixotrope : le profil a tendance à s'aplatir. Cette restructuration s'effectue à partir du centre de la conduite où le cisaillement est nul. C'est un résultat important qui nous donne des constantes de temps relatives à la restructuration de ce fluide modèle.

Sur cette même figure nous constatons que le profil de vitesse évolue peu, au moins à coeur de l'écoulement, entre $d=150 \text{ mm}$ et $d=300 \text{ mm}$; nous sommes proches de l'équilibre structural; mais au-delà, nous voyons que la vitesse maximale du profil obtenu à 1750 mm de l'entrée est supérieure à celle pour le profil obtenu à 300 mm. C'est aussi un effet des propriétés thixotropes du fluide. Celui-ci est soumis, à la paroi, à de forts gradients de vitesse de cisaillement qui entraînent une déstructuration marquée par un "arrondissement" du profil.

III.2) Evolution temporelle des profils de vitesse dans une section donnée.

Une étude de l'évolution au cours du temps des pertes de charge, nous a permis de déterminer un ordre de grandeur du temps de déstructuration du fluide. Ce temps étant bien supérieur à 10 secondes, nous avons à l'aide du vélocimètre ultrasonore enregistré les variations des profils de vitesse lors de la mise en écoulement du fluide. Le fonctionnement du vélocimètre étant asservi à celui de l'automate commandant le déplacement du piston, nous avons pu enregistrer ces profils à partir du moment exact de démarrage du piston.

La figure 5 ne représente que 7 des 1024 profils que nous avons obtenus, mais elle montre bien l'évolution de l'écoulement et nous permet d'observer un phénomène non prévu : la non - conservation apparente du débit dans les premières secondes de l'écoulement (voir les 4 premiers graphiques de la figure 5). Il ne s'agit bien entendu pas d'une conséquence du comportement thixotrope du fluide.

Nous avons expliqué cette non - conservation du débit en positionnant des jauges de déformation sur le réservoir de repos. Ces jauges nous ont montrés que le réservoir gonflait au démarrage. En effet, le fluide à seuil que nous utilisons ne peut s'écouler que si la pression à l'intérieur du réservoir est suffisante pour vaincre les forces de frottement liées à la contrainte seuil du fluide.

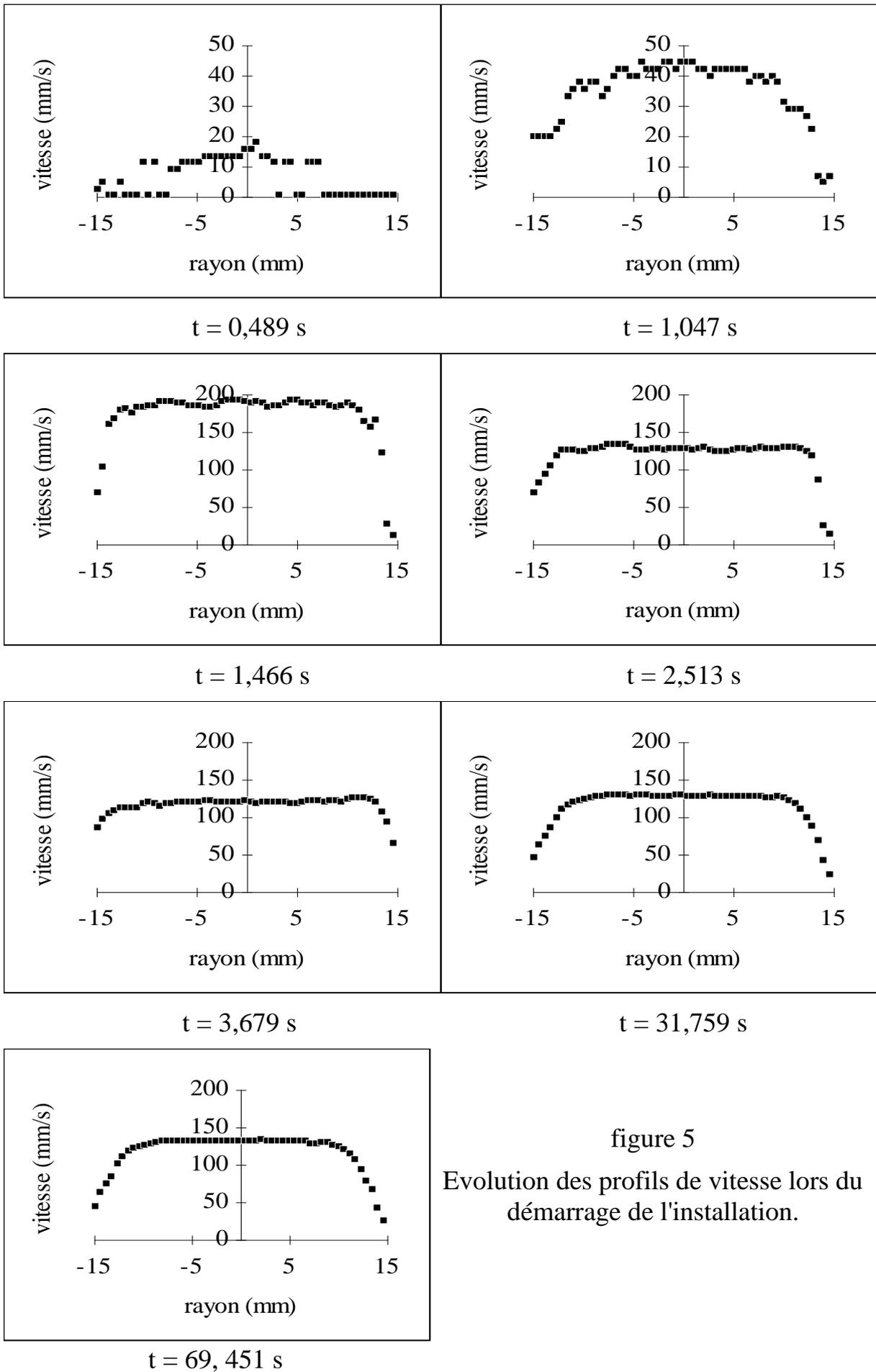


figure 5
Evolution des profils de vitesse lors du démarrage de l'installation.

Sans l'utilisation de la vélocimétrie ultrasonore, nous n'aurions pas pu observer ce phénomène, et ce défaut de la veine d'essais.

Du point de vue de la thixotropie et de l'étude que nous en faisons à partir du moment où le débit est redevenu constant, c'est à dire après 2,5 s environ, nous observons une déstructuration à partir des parois de la conduite, c'est ce que montrent les trois derniers graphiques de la figure 5.

III.3) Profil de vitesse dans le convergent.

Nous avons vu, dans la première partie de ce paragraphe, que le fluide était a priori déstructuré lorsqu'il entra dans la veine de mesure. Pour donner une explication à cette déstructuration nous avons observé le champ dynamique à l'intérieur du cône de rétrécissement qui relie le réservoir de repos à l'entrée de la veine. Les résultats correspondent à un débit de 4,5 l/mn.

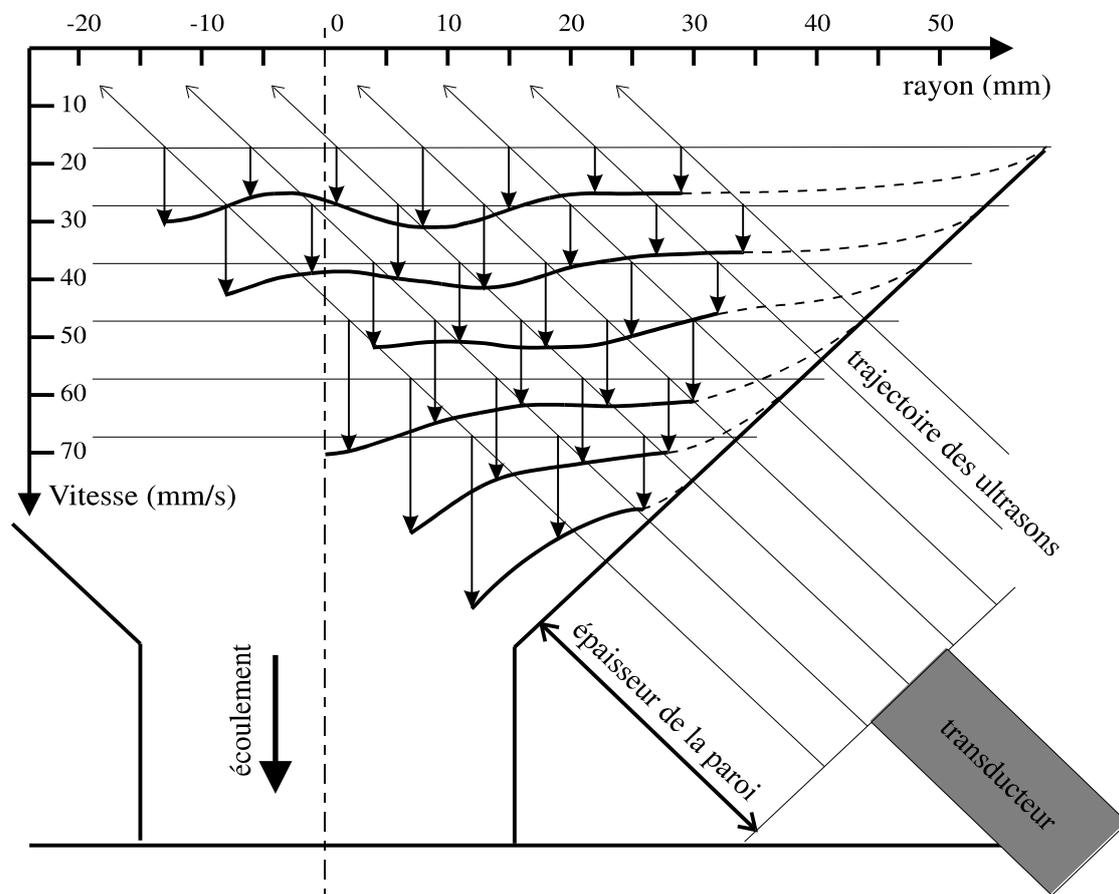


figure 6

Evolution du champ dynamique dans le cône de rétrécissement.

La possibilité d'enregistrer un grand nombre de profils par seconde nous a permis de déplacer le transducteur sans arrêter l'écoulement et de faire les mesures représentées sur la figure 6.

Cette figure montre que le passage du fluide dans le cône n'est pas sans effet sur sa structure. L'écoulement bouchon qui existe à l'intérieur du réservoir

amont ne peut être conservé lors du passage du fluide dans le cône. A l'entrée du cône la vitesse du bouchon est conservée. Pour qu'il y ait conservation du débit la vitesse proche des parois doit fortement augmenter. Cela entraîne une déstructuration du fluide qui augmente d'autant plus que le cône se rétrécit.

Les profils de vitesse, au centre du cône, ne sont pas plats comme nous l'espérons, afin de pouvoir observer la déstructuration d'un fluide au repos.

IV) Problème lié à la mise en oeuvre de la technique ultrasonore.

Avant de conclure, nous aimerions revenir sur un problème lié à la technique ultrasonore. Ce problème est relatif à la taille du volume de mesure.

Pour commencer, rappelons que l'onde est générée par un cristal excité. Cette onde se propage dans le milieu adjacent sous la forme d'un faisceau. Ce faisceau est composé de deux zones (voir figure 7) : une zone cylindrique de longueur l_n et de diamètre égal à celui du faisceau et une zone conique d'angle θ .

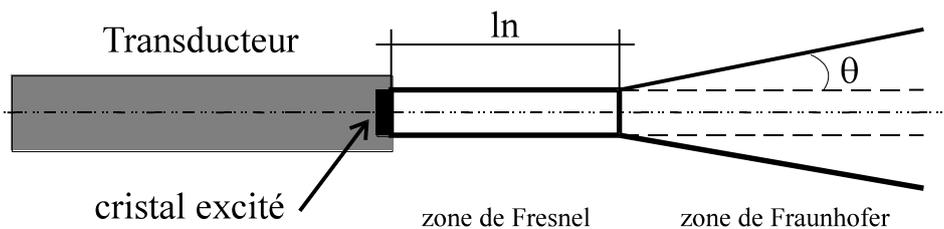


figure 7

Faisceau de l'onde ultrasonore.

La longueur l_n et l'angle θ sont donnés par les relations 8 et 9 dans lesquelles la longueur d'onde λ_{onde} est définie par la relation 10.

$$(8) \quad l_n = \frac{r^2}{\lambda_{\text{onde}}}$$

$$(9) \quad \sin(\theta) = 0,61 \frac{\lambda_{\text{onde}}}{R}$$

$$(10) \quad \lambda_{\text{onde}} = \frac{c_{\text{milieu}}}{f_0}$$

Comme le montrent ces relations, l_n et θ sont fonctions de la longueur d'onde des ultrasons et du rayon du faisceau. La longueur d'onde est fonction de la célérité de l'onde dans le milieu qu'elle traverse. Nous voyons que la zone cylindrique décroît avec le rayon r du faisceau, et que l'angle de divergence du faisceau augmente lorsque celui-ci diminue. Pour donner un exemple, dans le cas de l'eau ($c = 1480$ m/s), pour une fréquence de base de $f_0 = 4$ Mhz, et $r = 2,5$ mm, nous obtenons $l_n = 16,9$ mm et $\theta = 5,18$ °. Dans le même milieu et avec la

même fréquence de base, mais pour un rayon $r = 0,5$ mm, nous obtenons $l_n = 0,7$ mm et $\theta = 26,8^\circ$. Dans tous les cas le diamètre du volume de mesure devient vite important. Dans le cas du faisceau de rayon $r = 2,5$ mm le volume de mesure à un diamètre au moins égale à 5 mm.

Dans les cas décrits précédemment, le faisceau ultrasonore traverse un seul milieu. Mais généralement, le faisceau traverse une paroi avant d'atteindre le fluide en écoulement. Cette paroi a la propriété de réfracter l'onde émise d'après la loi de Snell - Descartes dans laquelle c_1 et c_2 sont les célérités de l'onde dans les deux milieux successifs (relation 11).

$$(11) \quad \frac{\sin i}{c_1} = \frac{\sin(r)}{c_2}$$

La figure 8 montre l'augmentation du volume de mesure dans le cas où la zone conique du faisceau débute à l'intérieur de la paroi traversée. Dans l'exemple, la paroi est en P.M.M.A¹.

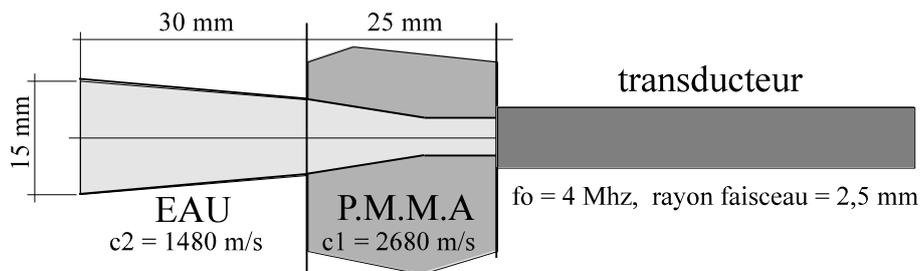


figure 8

Augmentation du volume de mesure lorsque l'ultrason traverse une paroi.

Ce problème montre la complexité du choix du transducteur, de la fréquence de base des ultrasons et du diamètre du faisceau à utiliser. Il montre aussi que l'installation sur laquelle va être implanté le transducteur vélocimétrique doit être conçue en fonction du capteur choisi. Par exemple, il est recommandé d'utiliser des parois de faible épaisseur, s'il n'est pas possible d'implanter le capteur directement dans l'écoulement.

Conclusion.

La vélocimétrie ultrasonore, nous a permis d'étudier l'écoulement d'un fluide thixotrope en conduite cylindrique, d'observer l'évolution des profils de vitesse, de comprendre la déstructuration du fluide lors de son passage dans le cône. Malgré les problèmes liés au volume de mesure, la vélocimétrie ultrasonore est, pour nous, un moyen puissant de recherche, car elle nous permet d'obtenir dans un temps limité un très grands nombres de résultats facilement exploitables.

¹ P.M.M.A : poly-méthacrylate de méthyle.

Nomenclature :

α	:	angle de positionnement du transducteur ($^{\circ}$)
λ	:	longueur l'onde (m)
θ	:	angle de divergence de l'onde ultrasonore ($^{\circ}$)
c	:	célérité de l'onde ultrasonore (m/s)
d:		distance séparant l'entrée de la veine du transducteur (m)
$F_{\text{pulsation}}$:	fréquence de pulsation (Hz)
ln	:	longueur de la zone cylindrique de l'onde ultrasonore (m)
f_o	:	fréquence de base des ultrasons (Mhz)
P_{max}	:	position du dernier point de mesure (m)
r	:	rayon du faisceau de l'onde ultrasonore (m)
V	:	vitesse (mm/s)

[1] PERONNEAU P., 1991, Vélocimétrie Doppler, Applications en pharmacologie cardio-vasculaire animal et clinique, Les Editions INSERM, Techniques en ... ISBN 2-8559-8471-8.

[2] RAO M.A., 1977, Rheology of liquid foods - A Review, Journal of texture studies, 8, 135 - 168.

[3] BARBOSA CANOVAS G.V. & PELEG M., 1982, Flow parameters of selected commercial semi - liquid food products, Journal of texture studies, 14, 213 - 234.

[4] MEWIS J., 1978, Thixotropy - A general review, Journal of non newtonians fluid mechanics, 6, 1 - 20.