



**HAL**  
open science

## **Génération et maturation d'un anneau tourbillonnaire en fluide non newtonien**

Omar Bentata, Dominique Anne-Archard, Pierre Brancher

► **To cite this version:**

Omar Bentata, Dominique Anne-Archard, Pierre Brancher. Génération et maturation d'un anneau tourbillonnaire en fluide non newtonien. 46ème Congrès Annuel du Groupe Français de Rhéologie, Oct 2011, Nancy, France. pp.0. <hal-04087476>

**HAL Id: hal-04087476**

**<https://hal.science/hal-04087476v1>**

Submitted on 3 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 5221

To cite this version :

Bentata, O. and Brancher, P. and Anne-Archard, Dominique  
*Génération et maturation d'un anneau tourbillonnaire en fluide non newtonien.* (2011) In: 46ème Congrès Annuel du Groupe Français de Rhéologie, 19-21 oct. 2011, Nancy, France.  
(Unpublished)

# Génération et maturation d'un anneau tourbillonnaire en fluide non newtonien

O. Bentata<sup>1,2</sup>, D. Anne-Archard<sup>1,2</sup>, P. Brancher<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulouse ; INPT, UPS ; IMFT, Allée Camille Soula, F-31400 Toulouse, France

<sup>2</sup> CNRS ; IMFT, Allée Camille Soula, F-31400 Toulouse, France

**Résumé :** On présente ici l'étude de la formation et de la maturation d'un anneau tourbillonnaire en fluide rhéofluidifiant. Le dispositif expérimental consiste en un système tube cylindrique-piston dont la partie basse est immergée dans une cuve. Une méthode de vélocimétrie par images de particules (PIV) est utilisée pour analyser l'écoulement. Une première étude a permis de valider le dispositif en fluide newtonien puis d'explorer le domaine des faibles nombres de Reynolds, montrant ainsi l'existence d'un anneau tourbillonnaire pour des Reynolds aussi faibles que 10. Ce travail a été étendu aux fluides non newtoniens et on présente ici les résultats obtenus sur des fluides rhéofluidifiants ayant des indices de comportement compris entre 0.5 et 1. Les résultats obtenus sont analysés en terme de champs de vorticités et de caractéristiques de l'anneau (vitesse de propagation et diamètre) et on examine l'évolution de ces variables en fonction des caractéristiques des fluides. On s'intéresse également au régime d'enroulement/détachement de l'anneau pour les plus grands nombres de Reynolds ainsi qu'à la dynamique plus complexe qui se met en place pour les faibles nombres de Reynolds et on examine l'influence du caractère rhéofluidifiant sur cette dynamique.

**Mots-clé :** anneau tourbillonnaire, vorticités, fluide rhéofluidifiant.

## 1. Introduction

Les anneaux tourbillonnaires sont des structures cohérentes qui dominent la dynamique de nombreux écoulements. On les retrouve dans les systèmes d'agitation industriels au voisinage de pales de mobiles d'agitation [1], mais également en milieu naturel au niveau par exemple des éjections de gaz volcanique ou des sillages derrière certains insectes, poissons ou oiseaux, dont les mouvements propulsifs ou sustentatoires d'aile ou de nageoire produisent un lâcher périodique d'anneaux tourbillonnaires. En outre, il s'agit historiquement d'un des premiers écoulements tourbillonnaires étudiés théoriquement et expérimentalement, pour ses caractéristiques dynamiques et topologiques [2, 3, 4]. Les anneaux tourbillonnaires constituent ainsi un écoulement prototypique, académique mais générique, qui présente en outre l'avantage d'un contrôle expérimental relativement aisé, ce qui explique la très grande quantité de travaux de recherche sur le sujet. Les études se sont intéressées à la caractérisation des anneaux tourbillonnaires en terme de diamètre, de circulation, de taille de cœur et de vitesse auto-induite, ainsi qu'aux mécanismes de génération de ces structures tourbillonnaires [5, 6, 7, 8, 9, 10]. La stabilité des anneaux tourbillonnaires est un axe de recherche actif depuis une quarantaine d'années (voir par exemple [6, 11, 12]). Il a en particulier été montré que les anneaux tourbillonnaires étaient instables pour des nombres de Reynolds suffisamment élevés ( $Re = UD/\nu > 600$ ,

où  $U$  et  $D$  désignent respectivement la vitesse de propagation et le diamètre de l'anneau et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide). Par comparaison, peu de travaux existent sur la génération et l'évolution des anneaux tourbillonnaires en fluide non newtonien et/ou à faibles nombres de Reynolds. Dans ce contexte, l'objectif du travail présenté ici est d'étudier expérimentalement la formation et la maturation d'anneaux tourbillonnaires en fluide non newtonien à l'aide d'une méthode de vélocimétrie par image de particules.

## 2. Matériels et méthode

Une vue d'ensemble du dispositif expérimental est présentée sur la figure 1. Les anneaux tourbillonnaires sont générés par un système de piston coulissant dans un tube vertical dont la partie basse est immergée dans une cuve. Le piston est solidaire d'un vérin commandé par un moteur pas à pas, lui-même piloté par ordinateur. Le diamètre intérieur du tube est  $D_p = 21$  mm et son diamètre extérieur 25 mm. Les bords du tube sont usinés en biseau à  $45^\circ$  sur la paroi externe. Les dimensions de la cuve de section carrée sont  $L \times l \times h = 24 \times 24 \times 60$  cm<sup>3</sup>. L'extrémité basse du tube est placée à environ  $4D_p$  sous la surface libre.

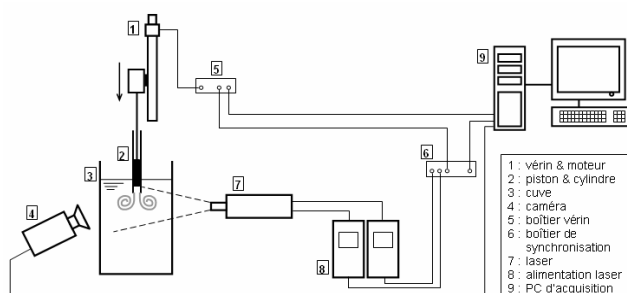


Figure 1 – Dispositif expérimental.

Le principal paramètre de contrôle de l'expérience est le nombre de Reynolds. On utilisera, pour les fluides non newtoniens, un nombre de Reynolds généralisé [13] calculé à partir de la consistance  $k$  et de l'indice de comportement  $n$  par la relation :

$$Re_g = 8^{1-n} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n \rho \frac{V_p^{2-n} D^n}{k} \quad (1)$$

où  $V_p$  est la vitesse du piston. Celle-ci peut varier entre 0.15 et 300 cm/s. Le rapport  $L_p/D_p$  (course sur diamètre du piston) a été fixé à 3 pour toutes les expériences. Sur toute la gamme de vitesse utilisée, les durées des phases d'accélération et de décélération du piston sont négligeables et la vitesse peut être considérée comme constante. En fin de course, la base du piston affleure la base du cylindre

Les expériences ont été effectuées avec de l'eau ou avec une huile de viscosité 0.030 Pa.s à 20°C (Marcol82, Exxon Mobil) pour les fluides newtoniens. Les fluides non newtoniens utilisés sont des solutions d'un polyacrylamide de poids moyen (Zetag 7587) dont les caractéristiques sont présentées dans la table 1.

	Huile H1	Zetag	
		Z1	Z2
C	-	0.008%	0.04%
k	0.030	0.00923	0.0705
n	1	0.70	0.54

Table 1 – Caractéristiques rhéologiques.

La solution de Zetag à 0.008% peut être considérée comme purement visqueuse alors que la solution à 0.04% a une faible composante élastique.

Les longueurs et les vitesses sont respectivement adimensionnalisées par  $D_p$  et  $V_p$  (les quantités adimensionnalisées sont par la suite identifiées par l'exposant \*). Le temps adimensionnel  $t^*$  est ainsi construit à l'aide de l'échelle de temps  $D_p/V_p$ . L'instant initial  $t^* = 0$  coïncide avec le démarrage du mouvement du piston et la position verticale  $Z^* = 0$  correspond à la section de sortie du cylindre.

Le dispositif utilisé pour la vélocimétrie par images de particules (PIV) est constitué d'une source laser Nd-YAG double cavité (Quantel, Twin Ultra 30, 30

mJ) générant une nappe verticale positionnée dans un plan diamétral du piston, et d'une caméra CCD (PCO 2000, 2048 × 2048 pixels). Le laser et la caméra sont pilotés via un boîtier de synchronisation conçu au laboratoire. Ce boîtier reçoit un signal de déclenchement donné par le vérin pour permettre la réalisation de séquences synchronisées. Les champs de vitesse sont calculés à l'aide du logiciel PIVIS développé au laboratoire [14]. Le cœur et le diamètre de l'anneau sont repérés, dans le travail présenté ici, par la position du minimum de vitesse sur les champs PIV. Les champs de vorticités sont ensuite calculés à partir des champs de vitesse.

### 3. Résultats

#### 3.1 Anneau tourbillonnaire en fluide newtonien

Le dispositif expérimental a été validé par une première série de mesures réalisées dans l'eau. Quelques visualisations à l'aide d'un colorant (fluorescéine) ont été effectuées et des exemples de réalisation sont présentés sur la figure 2.

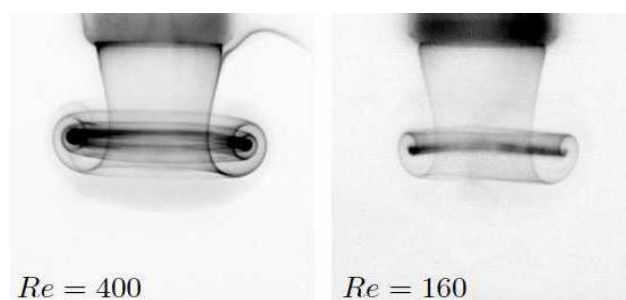


Figure 2 – Visualisation des anneaux tourbillonnaires par colorant dans l'eau.

Les phases classiques d'enroulement de la nappe tourbillonnaire en sortie de piston et de détachement de l'anneau sont bien visibles. On a notamment observé que le degré d'enroulement diminue avec le nombre de Reynolds. L'exploration du comportement aux faibles nombres de Reynolds a été menée à l'aide de la PIV et réalisée avec de l'huile dans le cas newtonien [15].

La trajectoire verticale de l'anneau tourbillonnaire pour différents nombres de Reynolds est présentée sur la figure 3. On observe une vitesse initiale de propagation identique aux temps courts quel que soit le nombre de Reynolds  $Re$ . Cette vitesse est proche de la moitié de la vitesse de translation du piston, comme mentionné dans d'autres travaux [7, 10]. On observe que la vitesse de propagation reste quasiment constante pour  $Re = 90$  dans la gamme de déplacement explorée. Par contre, à faibles nombres de Reynolds, on observe un ralentissement d'autant plus important que  $Re$  est petit jusqu'à ce que l'anneau tourbillonnaire atteigne une position limite.

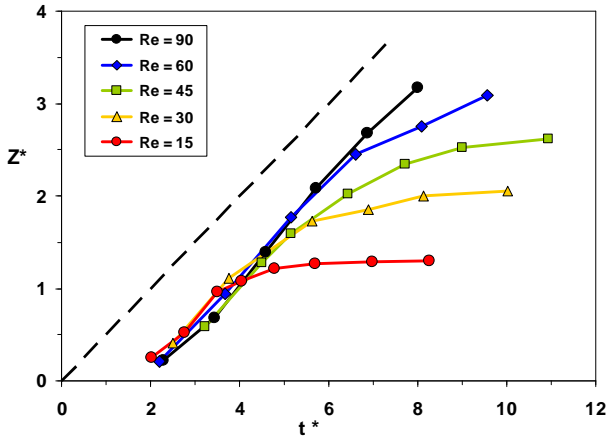


Figure 3 – Déplacement de l'anneau tourbillonnaire en fluide newtonien pour différents nombres de Reynolds.

L'évolution temporelle du diamètre de l'anneau est représentée sur la figure 4 pour différents Reynolds. Pour la plus grande valeur du Reynolds ( $Re = 90$ ), le diamètre adimensionné reste à peu près constant, proche de 1.5 après une faible croissance transitoire. On observe par contre une tendance à une augmentation progressive du diamètre de l'anneau pour les plus faibles  $Re$ . On observe conjointement une diminution du niveau de vorticité [15].

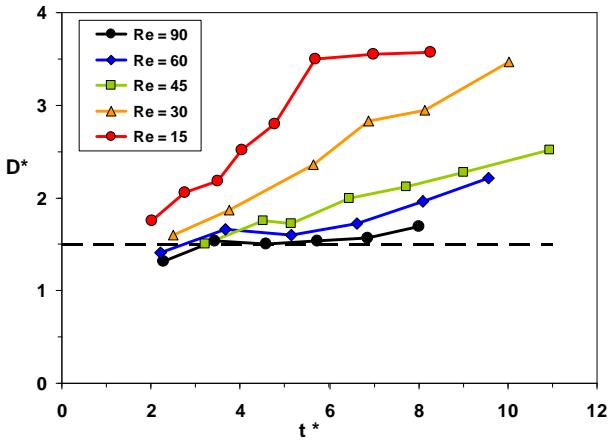


Figure 4 – Diamètre de l'anneau tourbillonnaire en fluide newtonien pour différents nombres de Reynolds.

### 3.2 Anneau tourbillonnaire en fluide non newtonien

La trajectoire verticale de l'anneau tourbillonnaire dans le cas newtonien (fluide H1) et non newtonien (Z1) est représentée sur la figure 5 pour deux nombres de Reynolds. On observe une vitesse initiale de propagation identique pour les deux fluides, avec un développement de l'anneau plus précoce dans le cas non newtonien. Cette vitesse est proche de la moitié de la vitesse de translation du piston, comme mentionné dans d'autres travaux [7, 10, 15]. Sur la durée d'observation reportée ici, la vitesse de propagation et le déplacement de l'anneau diminuent avec l'indice de comportement pour des conditions hydrodynamiques similaires. Dans le cas

non newtonien, on observe que l'anneau ne dépasse pas la côte  $Z^* \sim 1.7$  atteinte à  $t^* = 8$ . Cette stabilisation s'observe plus tardivement en newtonien (environ  $t^* = 11$  pour un nombre de Reynolds similaire).

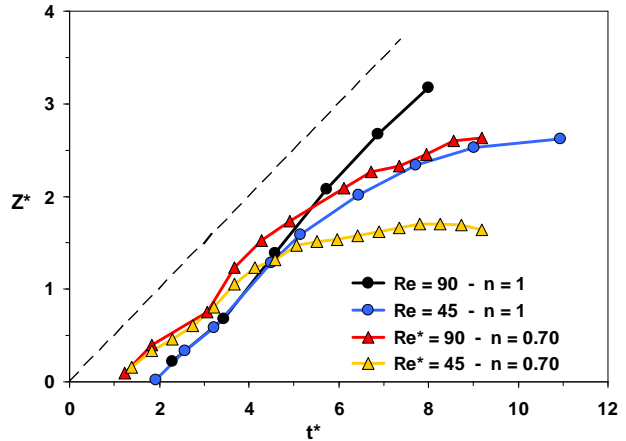


Figure 5 – Déplacement de l'anneau en fluide newtonien (H1,  $n=1$ ) et non newtonien (Z1,  $n=0.70$ )

Dans le cas non newtonien, et à la différence du newtonien, on observe une rupture de pente à  $t^* = 3$ , qui correspond à la fin de course du piston.

La figure 6 est similaire à la figure 5 mais présente l'évolution temporelle du diamètre adimensionné de l'anneau tourbillonnaire. La différence de comportement observée en fluide newtonien entre les Reynolds 45 et 90 (cf. Fig. 4) est pratiquement effacée en fluide rhéofluidifiant et on n'observe pas de zone de diamètre constant pour la plus grande valeur du Reynolds généralisé  $Re^*$ , soit 90.

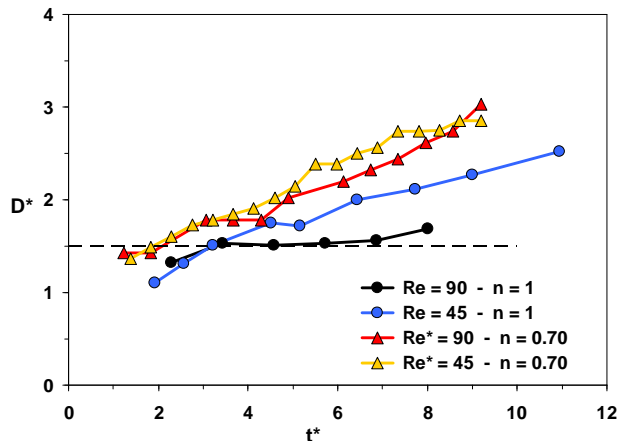


Figure 6 – Evolution du diamètre de l'anneau en fluide newtonien (H1,  $n=1$ ) et non newtonien (Z1,  $n=0.70$ )

La figure 7 présente les champs de vorticité calculés à partir des champs de vitesse. La vorticité est adimensionnée par le temps de référence  $D_p/V_p$  et les champs sont représentés au même instant adimensionné  $t^* = 5.85$ , pour les fluides H1, Z1 et Z2. Les résultats obtenus montrent que l'anneau tourbillonnaire est toujours détecté, y compris pour les faibles valeurs d'indice de comportement  $n$ . Par

contre, on observe que le niveau de vorticité diminue notablement lorsque la rhéofluidification augmente. On remarque également que la structure de l'anneau évolue et adopte une forme en « ailes de papillon » pour le fluide Z1 (Fig. 7.b). Comparés aux fluides H1 et Z1, les résultats obtenus avec le fluide Z2 (Fig. 7.c) diff  rent significativement, le plus remarquable étant que l'anneau perd sa convexité ( $Re^*=90$ , Fig 7.b et 7.c). Pour  $Re^*=90$ , il conserve une branche pointant vers la section de sortie du cylindre, et pour  $Re^*=45$  on observe un anneau secondaire et un anneau tertiaire. Sur la même installation expérimentale, un anneau secondaire avait également été observé en newtonien, mais pour des nombres de Reynolds plus faibles ( $Re=15$ ) et avec un rapport  $L_p/D_p$  plus grand ( $L_p/D_p=4.5$ ) [15].

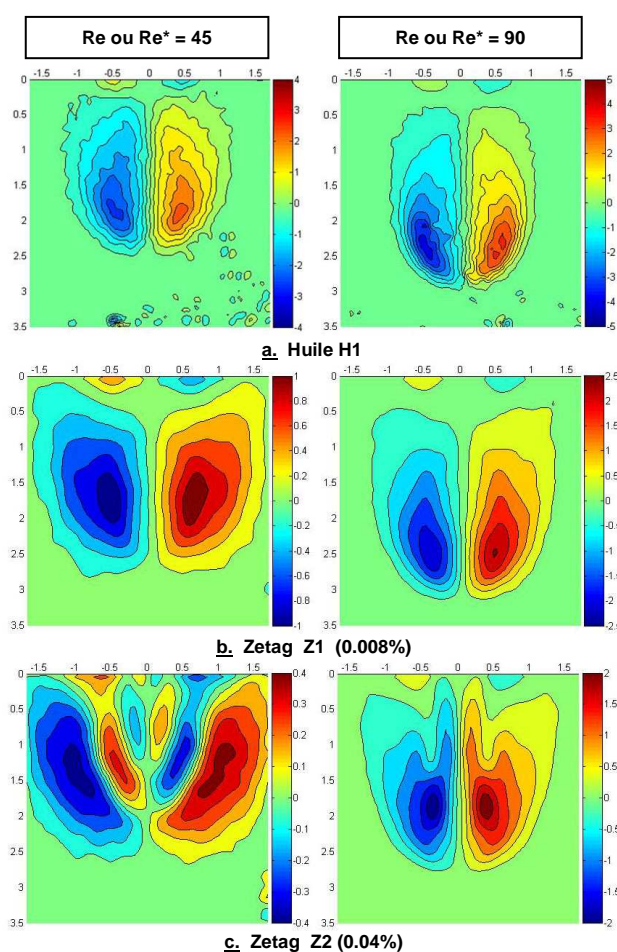


Figure 7 – Champs de vorticité à  $t^*=5.85$ .

La seule différence d'indice de comportement entre les deux fluides Z1 et Z2 peut sembler insuffisante pour expliquer les profondes modifications observées et celles-ci sont vraisemblablement dues à l'élasticité du fluide Z2, plus importante que celle de Z1. A cela s'ajoute le fait que, la viscosité de Z2 étant plus élevée, la condition  $Re^*=90$  est réalisée pour une vitesse de piston plus importante. Le temps de descente du piston, qui est un temps caractéristique de l'écoulement, devient faible (0.79s

pour Z2 et  $Re^*=90$ ) et permet une expression plus importante de l'élasticité.

## 5. Conclusion

Une étude expérimentale de la dynamique d'anneaux tourbillonnaires a été menée et a permis d'analyser la formation et l'évolution de ces structures tourbillonnaires en fluides newtonien et non newtonien. Des mesures quantitatives par PIV montrent l'influence de l'indice de comportement du fluide sur la géométrie et la dynamique globale de l'anneau tourbillonnaire. Enfin, l'influence de l'élasticité est également mise en évidence.

## Références

- [1] Bouremel, Y. 2010 *On the circulation, strain, dynamics and scalar mixing in vortical flows*. PhD thesis, University of London, 2010.
- [2] Helmholtz, H., *Uber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen*. *J. Reine Angew. Math.*, 55, 25–55, (1858).
- [3] Thomson (Lord Kelvin), W., *The translatory velocity of a circular vortex ring*. *Phil. Mag.* 33, 511–512 (1867).
- [4] Thomson, J. J. *A treatise on the motion of vortex rings*. Macmillan, London, 1883.
- [5] Taylor, G. I., *Formation of a vortex ring by giving an impulse to a circular disk and then dissolving it away*. *J. Appl. Phys.* 24 (1), 104–105 (1953).
- [6] Maxworthy, T., *The structure and stability of vortex rings*. *J. Fluid Mech.* 51, 15–32 (1972).
- [7] Baird, M. H. I., Wairegi, T., Loo, H. J., *Velocity and momentum of vortex rings in relation to formation parameters*. *Can. J. Chem. Engng* 55, 19–26 (1977)
- [8] Didden, N., *On the formation of vortex rings: rolling-up and production of circulation*. *J. Appl. Maths Phys.* 30, 101–116 (1979).
- [9] Shariff, K., Leonard, A., *Vortex Rings*. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24, 235–279 (1992).
- [10] Sullivan, I. S., Niemela, J. J., Hershberger, R. E., Bolster, D., Donnelly, R. J., *Dynamics of thin vortex rings*. *J. Fluid Mech.* 609, 319–347 (2008).
- [11] Dazin., A., Dupont, P., Stanislas, M., *Experimental characterization of the instability of the vortex ring. Part I: Linear phase*. *Exp. Fluids*, 40, 383-399 (2006)
- [12] Dazin., A., Dupont, P., Stanislas, M., *Experimental characterization of the instability of the vortex ring. Part II: Non-Linear phase*. *Exp. Fluids*, 41, 401–413 (2006).
- [13] Tanner, R. I. *Engineering Rheology*, Clarendon Press, Oxford, 1988.
- [14] Maurel, S., *Etude par imagerie laser de la génération et de la rupture d'un écoulement tourbillonnaire compressé. Situation modèle pour la validation de simulations aux grandes échelles dans les moteurs*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2000.
- [15] O. Bentata, D. Anne-Archard, P. Brancher, *Génération et maturation d'un anneau tourbillonnaire à faible nombre de Reynolds*. *Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, 2011.