


# NOTICE SIMPLIFIEE

## VISCOSIMETRE BROOKFIELD DV2T

### IL FAUT PREVOIR ENVIRON 500mL de solution

**L'appareil étant très couteux (environ 4000 euros), la mise en place doit être faite par un professeur ou une technicienne**

Mettre en marche (bouton à l'arrière)

Mettre la clé USB à l'arrière de l'appareil : l'icone  apparait sur l'écran en haut à gauche

Régler le niveau (regarder le niveau à bulle sur le devant de l'instrument, régler les pieds) Essentiel au bon fonctionnement

Fixer l'étrier.

Fixer la sonde de température sur l'étrier

Faire la mise à zéro automatique :  
s'affiche alors : "CONFIGURER TEST VISCOSITE"

Choisir un mobile et REPERER SON NUMERO (sur le haut de la tige)

Mettre en place le Becher contenant la solution à étudier : Descendre le viscosimètre avec la MOLETTE DE DROITE : le mobile doit être immergé jusqu'au niveau de l'étranglement sur sa tige.

**FIXER LE MOBILE : ATTENTION, ETAPE DELICATE AVEC RISQUE D'ENDOMMAGEMENT DU MATERIEL CETTE ETAPE DOIT ETRE REALISEE PAR UN PROFESSEUR**



Le moteur doit être éteint !

Enlever le bouchon gris, fixer le mobile choisi :

Pour ne pas créer d'efforts, pour des produits très visqueux le manuel conseille de mettre d'abord le mobile dans le Becher contenant le produit et visser ensuite le mobile, et de même dévisser d'abord le mobile, avant de sortir le Becher.

Les mobiles sont fixés au viscosimètre par vissage sur l'écrou d'accouplement sur l'axe inférieur (voir la figure)

Notez que c'est un **filetage à gauche**.

Maintenez et soulevez légèrement l'axe inférieur d'une main, et vissez le mobile de l'autre main vers la gauche

Le filet du mobile et celui de l'axe inférieur doivent être propres pour éviter une rotation excentrique du mobile

**ATTENTION A NE PAS FORCER ET TORDRE L'AXE DU MOBILE, TRES FRAGILE**

## La suite du protocole peut être réalisée par les étudiants

### Configurer l'écran avec le stylo tactile

- Introduire le numéro du mobile
- Point unique
- Condition finale = durée du test : commencer avec 30 s
- Choisir la vitesse en RPM ( tours par minutes) .- commencer toujours par les vitesses faibles –
- On voit alors s'afficher la viscosité maximale correspondante  $\eta$  ( en cP= centipoise = mPa.s) . la vitesse va donc être choisie par tâtonnement , en fonction de la valeur présumée de la viscosité du produit à étudier ( voir tableau en annexe, ou toute autre littérature).

### Lancer l'essai en cliquant sur EXECUTER

### Attendre la fin de l'essai, puis valider votre mesure :

#### **le choix de la vitesse est correct :**

- Lorsque la viscosité ne varie plus au cours du temps (sinon, augmenter la durée du test.)
- Lorsque les mesures se situent entre 10 et 100% sur l'échelle "couple de torsion" de l'instrument. La précision est d'autant meilleure que l'on est vers le " haut de l'échelle"

#### Noter que **la plage de viscosité est**

- **Inversement proportionnelle à la vitesse de rotation :** Il conviendra donc probablement de refaire des essais en modifiant la vitesse de rotation (RPM)
- **Inversement proportionnelle à la taille du mobile :** si vous ne parvenez pas à obtenir des mesures, il faut peut-être changer de mobile : APPELER UN PROFESSEUR .

Si votre mesure est correcte, donc si le couple de torsion est compris entre 10 et 100%, la viscosité s'affiche.

#### **Pour sauvegarder sur la clé USB :**

Type de fichier = .csv

Chemin = USB

Le nom du fichier est : anneemoisjournumero

OK, puis SAUVEGARDER : vous devez entendre un bip et voir s'afficher un écran

Retirer la clé, ouvrir le fichier avec EXCEL

Sélectionner la colonne A, puis Données/Convertir/Suivant/Séparateur= virgule/Terminer

L'ensemble des données sauvegardées pour votre essai s'affiche lisiblement.

- **A la fin de l'expérience, demander de l'aide éventuellement pour sortir le mobile de votre fluide : ATTENTION A NE PAS FORCER ET TORDRE L'AXE DU MOBILE.**
- **Bien nettoyer et ranger l'ensemble des accessoires.**

## ANNEXE 1 QUELQUES ÉLÉMENTS DE RHÉOLOGIE

La mesure de la viscosité d'un fluide fait partie de la rhéologie, science des écoulements de la matière. Dans la suite, on notera :

-la viscosité dynamique d'un liquide  $\eta$ . L'unité S.I. est le Pa.s, parfois appelé Poiseuille ( $1\text{Pl}=1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), une autre unité commune est le Poise ou le centiPoise  $1\text{cP}=1\text{mPa}\cdot\text{s}$

-la viscosité cinématique  $\nu=\eta/\rho$  où  $\rho$  est la masse volumique du liquide (l'unité S.I. est le  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , une autre unité commune est le Stokes avec  $1\text{St}=1\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}=10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ).

On remarquera que la viscosité cinématique  $\nu$  a la dimension d'un coefficient de transport : c'est le coefficient de diffusion de la quantité de mouvement à travers le fluide.

Considérons un fluide de viscosité  $\eta$  compris entre deux plaques solides parallèles de surface  $S$  séparées par une petite épaisseur  $e$ . La plaque inférieure est fixe tandis que la plaque supérieure est mobile. Appliquons une force  $F$  à la plaque supérieure dans la direction  $x$  : chaque élément de fluide est alors soumis à la **contrainte tangentielle**  $\tau = F/S$ . Sous l'effet de cette contrainte le fluide est mis en mouvement ; en régime stationnaire, c'est-à-dire quand le gradient de vitesse à la paroi supérieure a eu le temps de diffuser vers la paroi inférieure en envahissant tout le fluide, le profil de vitesse  $v(z)$  est linéaire ("écoulement de Couette plan") : la vitesse à la paroi supérieure est la vitesse  $V$  de la plaque, et la vitesse à la paroi inférieure est nulle, car en général il y a non glissement aux parois.

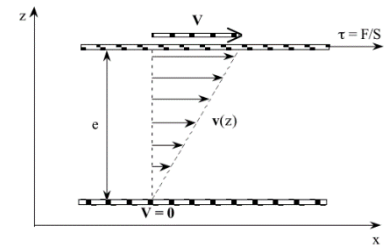


Figure 1.

Le gradient de vitesse, encore appelé "**taux de cisaillement**"  $\dot{\gamma}$  est  $\dot{\gamma} = V/e = dv/dz$

**La viscosité  $\eta$  est égale au rapport**  $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$

$\eta$  = force par unité de surface / variation de vitesse par unité de longueur

**LE VISCOSIMETRE DONNE  $\eta$  et  $\dot{\gamma}$**

Un fluide est dit "newtonien" si sa viscosité est constante en fonction du taux de cisaillement C'est le cas de nombreux liquides simples, tels que l'eau ou le glycérol.

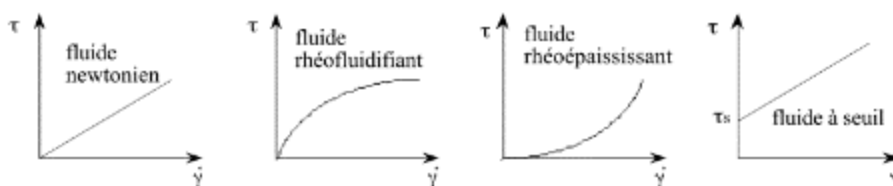
Un fluide est dit "rhéofluidifiant" si sa viscosité diminue lorsque le taux de cisaillement augmente C'est le cas par exemple des bonnes peintures qui sont fluides à l'étalement mais plus visqueuses sur le mur, évitant ainsi les "coulores".

Un fluide est dit "rhéoépaississant" si sa viscosité augmente lorsque le taux de cisaillement augmente . C'est le cas par exemple d'une suspension concentrée de maïzéna.

Un fluide est dit à seuil s'il faut dépasser un seuil en contrainte  $\tau_s$  avant qu'il ne puisse s'écouler . C'est le cas par exemple du fluide injecté au niveau du train de tige dans un forage pétrolier.

Il existe évidemment des fluides présentant des mélanges de ces différents comportements, ainsi que des fluides dont le comportement en écoulement dépend de leur histoire, ce qui se manifeste par exemple par un hystérésis dans le rhéogramme (les courbes correspondant à une montée et à une descente en taux de cisaillement ne se superposent pas).

**ON TROUVE CLASSIQUEMENT DANS LA LITTÉRATURE LES RHEOGRAMMES CI-DESSOUS . LE VISCOSIMETRE DONNE  $\eta$  et  $\dot{\gamma}$  . IL VOUS APPARTIENT DE TRACER  $\tau=\eta\dot{\gamma}$  pour comparer avec les courbes ci-dessous**



## II. VISCOSIMETRE A CYLINDRES ROTATIFS (COUETTE CYLINDRIQUE)

Le principe de ce viscosimètre est dû à Couette (1890) et c'est la raison pour laquelle il est communément appelé viscosimètre de Couette.

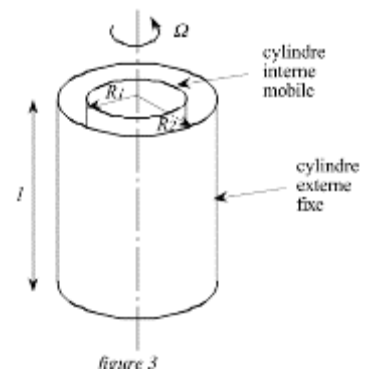
Ce type de viscosimètre est très employé dans la recherche fondamentale mais aussi dans de nombreux secteurs industriels : polymères, peintures, ciments, agroalimentaire (rhéologie de la sauce tomate, du nectar de pêche ou du chocolat fondu,...).

Le liquide de viscosité  $\eta$  à étudier est placé entre deux cylindres coaxiaux verticaux (figure 3). Le cylindre extérieur (rayon  $R_2$ ) est en général fixe tandis que le cylindre intérieur (rayon  $R_1$ ) est animé d'un mouvement de rotation qui peut être à vitesse de rotation constante  $\Omega$  imposée (on mesure alors la contrainte  $\tau$ ) ou bien à contrainte  $\tau$  imposée (on mesure alors la vitesse de rotation  $\Omega$ ).

On montre que la contrainte  $\tau$  à laquelle est soumis le cylindre intérieur lorsqu'il tourne à la vitesse  $\Omega$  est proportionnelle à la viscosité  $\eta$  et à la vitesse de rotation  $\Omega$  via un coefficient prenant en compte les caractéristiques géométriques de l'appareil (rayons et longueur des deux cylindres, effets d'extrémités).

Le couple qu'il est nécessaire d'exercer sur le cylindre intérieur pour le faire tourner à la vitesse de rotation  $\Omega$  est

$$\Gamma = \frac{4\pi\eta\Omega R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} l$$



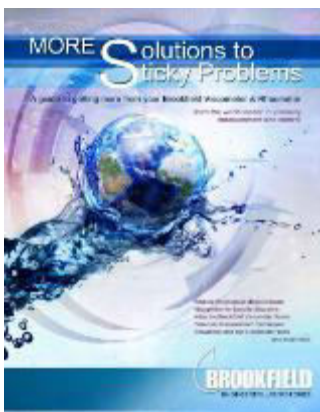
**Le viscosimètre BROOKFIELD fonctionne selon ce principe :**

Le viscosimètre Brookfield détermine la viscosité d'un fluide à partir de la mesure du couple (déformation exercée sur un ressort) créé par la rotation d'un disque dans ce fluide.

La plage de mesure du viscosimètre est déterminée par la vitesse de rotation du disque, la dimension et la forme du disque, le contenant dans lequel le disque tourne et le couple du ressort.

Le liquide à étudier est placé dans un bécier. Le cylindre extérieur est constitué par un cavalier fixe qui trempe dans le liquide. Le rotor est un cylindre (Spindle) qui plonge dans le liquide et est relié au moteur.

\*\*\*\*\*



Le manuel fourni par Brookfield, intitulé « More solutions to sticky problems » contient en particulier

- Des éléments complémentaires sur la rhéologie ( en particulier, Chapitre 4 , page 15 et seq. fluides non-newtoniens)
- Des protocoles ( page 25 et seq.)

Version numérique du document disponible

[http://www.brookfieldengineering.com/download/files/more\\_solutions.pdf](http://www.brookfieldengineering.com/download/files/more_solutions.pdf)

Le manuel du viscosimètre est aussi disponible en version numérique

Vitesses possibles : 0.1 à 200 RPM

Mobiles disponibles : numéros 2 à 6 (avec un disque) et 7 (tige)

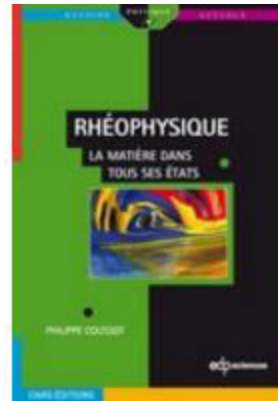
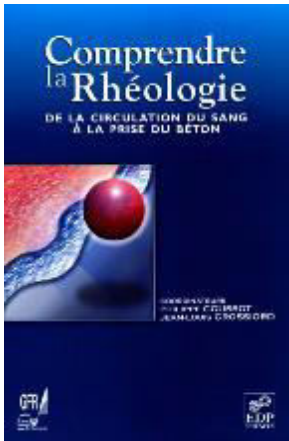
### ANNEXE 3

#### Références bibliographiques

Comprendre la Rhéologie Coussot-Grossiord EDP SCIENCES au CDI cote : 539.5 COU

Rhéophysique ou comment coule la matière Oswald Belin au CDI cote 539.5 OSW

Rhéophysique : La matière dans tous ses états P. Coussot EDP Sciences – au CDI cote ?



Disponible en ebook

( me demander)

## ANNEXE 4 VALEURS DE VISCOSITES ( document Flux)

Produit	Viscosité	Température
Acide oléique	40 mPas	20 °C
Agent adhésif pour dents	30.000 mPas	20 °C
Beurre	30.000 mPas	40 °C
Beurre de cacao	50 mPas	60 °C
Caprinate de polyglycérine	6.000 – 7.000 mPas	15 °C
Cire liquide	500 mPas	90 °C
Compote de pommes	1.500 mPas	20 °C
Concentré de jus de fruits	1.500 mPas	20 °C
Concentré de tomate	195 mPas	20 °C
Confiture	8.500 mPas	20 °C
Confiture de chocolat	2.600 mPas	40 °C
Couleur d'imprimerie	550 – 2.200 mPas	40 °C
Crème 30 à 50 % MG	15 – 115 mPas	20 °C
Crème de beurre amère	550 mPas	20 °C
Crème dermatologique	8.000 mPas	20 °C
Dentifrice	70.000 mPas	40 °C
Dipropylenglycol	107 mPas	20 °C
Emulsion de latex	200 mPas	20 °C
Emulsion de nettoyage	1.500 mPas	70 °C
Emulsion de paraffine	3.000 mPas	20 °C
Extrait de malt	9.500 mPas	20 °C
Fromage fondant	30.000 mPas	60 °C
Fuel léger	150 mPas	20 °C
Fuel lourd	600 mPas	20 °C
Gélatine	1.200 mPas	45 °C
Glucose	4.300 – 6.800 mPas	25 – 30 °C
Glycérine 100 %	4.500 mPas	10 °C
Glycérine 100 %	12.100 mPas	20 °C
Glycol	20 mPas	20 °C
Graisse de beurre	45 mPas	40 °C
Graisse de porc	65 mPas	40 °C
Huile alimentaire	65 mPas	20 °C
Huile d'arachides	40 mPas	40 °C
Huile de baleine	100 mPas	20 °C
Huile de colza	160 mPas	20 °C
Huile de coton	60 mPas	20 °C
Huile de foie	35 mPas	40 °C
Huile de graissage	60 – 200 mPas	20 °C
Huile de lin	55 mPas	20 °C
Huile de maïs	30 mPas	60 °C
Huile de noix de coco	80 mPas	20 °C
Huile de palme	130 mPas	20 °C
Huile de ricin	2.420 mPas	10 °C
Huile de ricin	1.000 – 1.500 mPas	20 °C
Huile de soja	80 mPas	20 °C
Huile de soja traitée	600 – 800 mPas	20 °C
Huile de transformateur	30 mPas	20 °C
Huile de transformateur	75 mPas	10 °C
Huile de turbine	300 – 1.100 mPas	20 °C

Produit	Viscosité	Température
Huile de vitamine	4.500 mPas	10 °C
Huile d'olive	85 mPas	20 °C
Huile d'os	300 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 5 W	50 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 10 W	100 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 20 W	160 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 30	380 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 40	600 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 50	900 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 90	700 mPas	20 °C
Huile moteur SAE 140	2.300 mPas	20 °C
Hydroxyde de potassium	67 mPas	20 °C
Jus de fruit	50 mPas	20 °C
Ketchup de tomate	1.000 mPas	30 °C
Lait concentré	80 mPas	40 °C
Lait concentré sucré	6.100 mPas	20 °C
Laque (25 % de pigments)	3.000 mPas	20 °C
Lessive de soude 50 %	45 mPas	20 °C
Levure de bière	370 mPas	20 °C
Liqueur	10 – 100 mPas	20 °C
Mayonnaise	2.000 mPas	20 °C
Mélasse 80 °Bx	10.000 mPas	20 °C
Mélasse 83 °Bx	50.000 mPas	20 °C
Mélasse 85 °Bx	100.000 mPas	20 °C
Miel	2.000 mPas	40 °C
Mousse alimentaire	1.500 mPas	40 °C
Moût de fruits	600 mPas	20 °C
Nourriture pour nourrissons	1.400 mPas	40 °C
Oeufs liquides	150 mPas	45 °C
Pâte de cacao	4.000 mPas	20 °C
Peinture à l'eau	900 mPas	20 °C
Petit-lait	800 – 1.500 mPas	40 °C
Polyol (composante A)	85.000 mPas	10 °C
Polyol, non-pigmenté	500 – 5.000 mPas	20 °C
Pouding	1.000 mPas	40 °C
Résine en solution	7.100 mPas	20 °C
Résine polyester	3.000 mPas	30 °C
Résines alkydes	500 – 3.000 mPas	20 °C
Sauce de chocolat	280 mPas	50 °C
Sauce de rôt	110 mPas	80 °C
Savon liquide	85 mPas	60 °C
Shampooing	3.000 mPas	20 °C
Solution d'amidon 25 °Baumé	300 mPas	20 °C
Solution de polymère	20.000 mPas	20 °C
Solution sucrée 65 °Bx	120 mPas	20 °C
Solution sucrée 70 °Bx	400 mPas	20 °C
Soupe de légumes	430 mPas	20 °C
Vinaigrette pour salade	1.300 – 2.600 mPas	20 °C
Yaourt	150 mPas	40 °C

Les indications concernant ces fluides ne sont données qu'à titre d'exemples, d'autres mélanges ou températures peuvent donner lieu à des modifications non négligeables. La meilleure manière de s'assurer du choix de la bonne pompe reste toujours la réalisation d'un essai sur site. Ceci tout particulièrement pour les fluides «non-Newtonique» pour lesquels la viscosité ne peut être définie avec exactitude, ceci en raison d'une variation considérable des caractéristiques en cours de pompage (viscosité structurelle). Notre service commercial reste pour cela à votre entière disposition pour une démonstration personnalisée.

## ANNEXE 5 Exercice sur le viscosimètre de Couette

Un fluide incompressible de masse volumique  $\mu$  et de viscosité absolue  $\eta$  est introduit dans l'interstice entre deux longs cylindres coaxiaux d'axe Oz de rayons R1 et R2 ( $R_2 > R_1$ ) et de hauteur h ( $h \gg R_1, R_2$ ). Le cylindre extérieur est immobile et on impose au cylindre intérieur un mouvement de rotation uniforme à raison de N tours/seconde.

On négligera l'action de la pesanteur et on admettra que le régime d'écoulement est stationnaire.

1. Montrer que le champ de vitesses du fluide en M est orthoradial et ne dépend que de la distance r de M à l'axe Oz des cylindres.
2. Montrer que le champ de vitesses du fluide obéit à l'équation différentielle :  

$$dv(r)/dr + v(r)/r = \text{constante}.$$
3. Exprimer la vitesse angulaire  $\omega(r)$  du fluide en rotation en fonction de r, et des données N, R1 et R2.
4. Pour maintenir la vitesse de rotation du cylindre extérieur constante ( $N = 90 \text{ t.mn}$ ), il faut appliquer un couple  $\Gamma = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}$ . On donne  $R_1 = 8,0 \text{ cm}$ ,  $R_2 = 8.4 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ,  $\mu = 860 \text{ kg.m}^{-3}$ . Calculer la viscosité  $\eta$  du fluide.
5. Calculer le nombre de Reynolds de l'écoulement étudié. Cet écoulement est-il laminaire ?

On donne les opérateurs en coordonnées cylindriques ( $\mathbf{A} = \text{vecteur}$ )

$$\text{div } \vec{a} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r a_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial a_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$$

$$\Delta \mathbf{A} = + \left( \frac{\partial^2 A^r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A^r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A^r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A^r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial A^\theta}{\partial \theta} - \frac{A^r}{r^2} \right) \mathbf{u}_r$$

$$+ \left( \frac{\partial^2 A^\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A^\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A^\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A^\theta}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial A^r}{\partial \theta} - \frac{A^\theta}{r^2} \right) \mathbf{u}_\theta$$

$$+ \left( \frac{\partial^2 A^z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A^z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A^z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A^z}{\partial r} \right) \mathbf{u}_z$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{a} = \begin{pmatrix} \frac{1}{r} \left( \frac{\partial a_z}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial z} (r a_\theta) \right) \\ \left( \frac{\partial a_r}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial r} \right) \\ \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r a_\theta) - \frac{\partial a_r}{\partial \theta} \right) \end{pmatrix}$$

1) Invariance par rotation  $\Rightarrow v$  indt de  $\theta$  et P indépendant de  $\theta$

et invariance par translation selon Oz  $\Rightarrow v$  indt de z et  $v_z = 0$

$$\text{fluide incompressible} \Rightarrow 0 = \text{div } \vec{v} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} \Rightarrow r v_r(r) = \text{constante}$$

$$\text{or en } r = R_1, v(R_1) = 0 \Rightarrow \text{constante} = 0 \Rightarrow v_r(r) = 0 \quad \text{donc } \boxed{v = v_\theta(r) \vec{u}_\theta}$$

$$2) \text{Equation de NS} \Rightarrow \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = - \frac{\text{grad} P}{\mu} + \nu \Delta \vec{v}$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \quad \text{Et stationnaire, et On calcule : } (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = \text{rot } \vec{v} \wedge \vec{v} = \frac{-v^2}{r} \vec{e}_r \quad \boxed{- \frac{\text{grad} P}{\mu} + \nu \Delta \vec{v} = \frac{-v^2}{r} \vec{e}_r}$$

$$\text{Donc, en projection sur } \vec{e}_r \quad 0 = -\eta \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} \right) \quad \text{avec } \eta = \mu \nu$$

On remarque que les deux derniers termes peuvent se regrouper en  $\frac{1}{r} \frac{dv_\theta}{dr} - \frac{v_\theta}{r^2} = \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\theta}{r} \right)$

L'équation est donc  $0 = \frac{d^2 v_\theta}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{d}{dr} \left( \frac{dv_\theta}{dr} + \frac{v_\theta}{r} \right)$

Qui s'intègre en  $\left( \frac{dv_\theta}{dr} + \frac{v_\theta}{r} \right) = \text{constante} = A$ ,

Puis  $\text{SGESSM} \frac{dv_\theta}{dr} = -\frac{v_\theta}{r} \Rightarrow \frac{dv_\theta}{v_\theta} = -\frac{dr}{r} \Rightarrow \ln v_\theta = -\ln r + \text{cste} \Rightarrow v_\theta = \frac{A'}{r}$

(On peut aussi remarquer que  $\left( \frac{dv_\theta}{dr} + \frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv_\theta) = 0$

Et Solution particulière  $v_\theta = \frac{A}{2} r$

Donc la solution générale est  $v_\theta = \frac{A}{2} r + \frac{A'}{r}$

Avec les CLIM  $v(R_2) = 0$  et  $v(R_1) = \Omega R_1$  avec  $\Omega \approx 2\pi \frac{N}{60}$  (N en tours/min (= RPM),  $\Omega$  en rad/s)

On obtient donc

$$0 = \frac{A}{2} R_2 + \frac{A'}{R_2} \quad A' = -\frac{A}{2} R_2^2$$

$$2\pi R_1 N = \frac{A}{2} R_1 + \frac{A'}{R_1} \quad \Omega R_1 = \frac{A}{2} \left( R_1 - \frac{R_2^2}{R_1} \right) \Rightarrow A = 2\Omega \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \text{ et } A' = -\Omega \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2}$$

Le profil de vitesses est donc  $v_\theta(r) = \Omega \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left( \frac{r^2 - R_2^2}{r} \right)$

La force de frottement par unité de surface exercée sur le cylindre extérieur vaut

$$F = \eta \frac{dv}{dr} (r = R_2) = \eta \Omega \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 + \frac{R_2^2}{R_2^2} \right] = \eta 2\Omega \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2}$$

Donc, sur la surface totale du cylindre  $F^* (2\pi R_2 h)$

Ceci correspond donc à un couple résistant  $\Gamma = F(2\pi R_2 h) R_2 = \eta 4\pi h \Omega \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2}$

C'est donc ce couple qu'il faut compenser pour faire tourner le cylindre intérieur

**De la mesure de ce couple, on peut donc déduire la viscosité du fluide**