

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
Département gisement miniers et pétroliers



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Hydrocarbures.

Option : Forage des puits d'hydrocarbure.

Présenté Par : AMRANE Walid

RAHMANI Oussama

Thème

**Simulation Numérique de l'écoulement d'un fluide de forage
dans un espace annulaire**

Devant le jury :

Mme. Yahi Fatma	MCB	UMBB	Président.
Mr. Boubekur Zineelabidine	MCB	UMBB	Examineur.
Mme. Azril Nadjat	MAA	UMBB	Encadreur.

Boumerdès 2022

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier **notre Dieu**, notre créateur, pour le courage et la patience qu'il nous a donnée pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier aussi très chaleureusement notre encadreur, **Mme AZRIL Nadjjet** pour nous avoir dirigé notre travail, pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité, pour son aide et ses prodigieux conseils pour développer le présent mémoire avec succès. Merci madame pour votre volonté, votre conscience professionnelle et votre sérieux.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous le **personnel PED Hydra**, pour leurs coups de main. A tous les **professeurs et le personnel du département gisement et minier Pétroliers**, Faculté des Hydrocarbures et de la chimie, Université M'hamed bougara - Boumerdès. Ainsi qu'à nos collègues et amis et toutes les personnes qui ont participées de près ou de loin à l'exécution de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me Guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

Et vos encouragements durant ces années d'études ont été une incitation morale

À poursuivre mes études et à atteindre ce que j'ai atteint maintenant.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

A mes frères Adel, Bilal, Islam, Oussama

A ma sœur Fatíha

A mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi

Tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes *proches* et à ceux qui me donnent de l'amour et la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, surtout *Oussama*,

Et à qui je souhaite plus de succès.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon binôme

RAHMANI Oussama.

AMRANE Walid

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :

- Ceux qui ont consacré toute leur vie pour la réussite de leur fils ;

Ma très chère *mère*, Mon très cher *père*.

- Aux êtres les plus chers de ma vie,

- A Mon *frère* et Mes *sœurs*.

- A Mon binôme *AMRANE Walid*.

- Et Je remercie également tous ceux qui ont contribué à mon succès,
même si avec un mot d'encouragement.

RAHMANI Oussama

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'un fluide de forage en écoulement dans un espace annulaire (perte de pression et profil de vitesse), pour le faire, plusieurs paramètres ont été pris en considération (paramètres rhéologiques du fluide, vitesse d'entrée du fluide ainsi que la rotation de la tige et enfin la position de la tige, concentrique ou excentrique).

Le modèle rhéologique adapté dans cette étude est celui de Herschel Bulkley jugé plus significatif pour les boues à base d'eau, dont notre fluide fait partie.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS-Fluent 2020 R₂ en résolvant les équations du mouvement, les résultats obtenus montrent que les paramètres rhéologiques (notamment le « n ») affectent directement les pertes de pression dans l'annulaire pour les deux cas concentrique et excentrique, et la rotation de la tige améliore l'écoulement dans l'annulaire et ceci en augmentant la vitesse.

Mots clés : Paramètres rhéologiques, Fluide de forage, Herschel Bulkley, Perte de pression, Concentrique et excentrique.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة سلوك مائع الحفر أثناء تدفقه في فراغ حلقي (فقدان الضغط ومنحنيات السرعة) ، للقيام بذلك ، تم أخذ العديد من العوامل بعين الاعتبار (متغيرات الانسيابية للسائل ، وسرعة دخوله بالإضافة الى دوران ماسورة الحفر وأخيراً موضع ماسورة الحفر في الحالة المركزية أو اللامركزية).

النموذج الانسيابي الذي تم تكيفه في هذه الدراسة هو نموذج 'Herschel Bulkley' الذي يعبر بشكل أكبر في حالة موائع الحفر ذات الأساس المائي، والذي ينطبق على السائل الذي سنقوم بدراسته.

تم إجراء المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج ANSYS-Fluent 2020 R2 من خلال حل معادلات الحركة، وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن متغيرات الانسيابية (على وجه الخصوص الـ « n ») تؤثر بشكل مباشر على فقدان الضغط في الفراغ الحلقي لكلا الحالتين سواء كانت ماسورة الحفر في وضعية مركزية أو لامركزية ، و دوران ماسورة الحفر يحسن التدفق في الفراغ الحلقي وهذا عن طريق زيادة السرعة.

الكلمات المفتاحية: متغيرات الانسيابية، مائع الحفر، فقدان الضغط، المركزية واللامركزية.

Abstract

The objective of this work is to study the behavior of a drilling fluid flow in the annular space (pressure drop and velocity profile), to do so, several parameters were taken into consideration (rheological parameters of the fluid, inlet velocity of the fluid and the rotation of the drill pipe and finally the position of the pipe, concentric or eccentric.)

The rheological model adapted in this study is Herschel Bulkley model where is considered more significant for water-based muds, which our fluid is a part.

The numerical simulation was carried out using the ANSYS-Fluent 2020 R2 software by solving the equations of motion, the results obtained show that the rheological parameters (in particular the "n") directly effect on the pressure drop in the annular for both concentric and eccentric cases, and the rotation of the pipe improves the flow in the annular and this by increasing his speed.

keywords: Rheological parameters, Drilling fluid, Herschel Bulkley model, Pressure drop, Concentric and Eccentric.

Table de matières	
Introduction générale	1
Chapitre I Etude Bibliographique	2
Chapitre II Généralités sur les boues de forage	6
Introduction	6
II.1 Circuit de la boue	7
II.2 Principales fonctions de la boue	8
II.3 Les différents types de boues et constituants principaux	8
II.3.1 Les boues dont la phase continue est l'eau	8
II.3.2 Les boues dont la phase continue est l'huile	9
II.4 Constituants principaux de la boue	10
II.4.1 L'eau de fabrication	10
II.4.2 Les argiles	10
II.4.3 Les solides inertes	11
II.5 Action du forage sur la boue	11
II.5.1 Interaction physique ou contamination physique de la boue	11
II.5.2 Interaction chimique ou contamination chimique de la boue	12
II.6 Fluides spéciaux	12
II.6.1 Forage à l'air	12
II.6.2 Forage à la mousse	13
II.6.3 Forage à la boue aérée	13
II.7 Avantages et inconvénients des boues de forage	13
II.7.1 Avantage	13
II.7.2 Inconvénients	14
II.8 Les problèmes de formation au cours de forage	14
II.8.1 Les pertes de circulation	14
II.8.2 Les hautes températures	14
II.8.3 Les sables	14
II.9 Contamination de la boue par le gaz	15
Chapitre III Notions de Rhéologie et des fluides complexes	16
Introduction	16
III.1 Grandeurs caractéristiques de la rhéologie	16
III.1.1 La contrainte de cisaillement	16

III.1.2	La vitesse déformation	17
III.2	La viscosité	17
III.2.1	La viscosité dynamique (apparente) (η)	17
III.2.2	La viscosité cinématique (ν)	18
III.3	Rhéogramme	18
III.4	Classification des fluides	19
III.4.1	Fluides newtoniens	19
III.4.2	Fluides non-newtoniens indépendants du temps	19
III.4.2.1	Fluides rhéofluidifiants	20
III.4.2.2	Fluides rhéoépaississants	21
III.4.2.3	Fluides plastiques (fluides à seuil de contrainte)	21
III.4.3	Fluides non-newtoniens dépendants du temps	22
III.4.3.1	Fluides viscoélastiques	23
III.5	Principe des rhéomètres Et techniques de mesures	24
III.5.1	Rhéomètres de type Couette	24
III.5.2	Géométrie cône-plan	26
III.5.3	Géométrie plan-plan	27
Chapitre IV	Equations de la mécanique des fluides et méthodes de résolution	30
IV.1	Equation de la mécanique des fluides	30
IV.1.1	Les équations générales	30
IV.1.1.1	Équation de continuité	30
IV.1.1.2	Équation de bilan de la quantité de mouvement	31
IV.1.1.3	Equation de l'Energie	31
IV.1.2	Les équations de Navier-Stokes	32
IV.1.2.1.1	Les forces intérieures (ou contraintes)	33
IV.1.2.1.2	Les forces extérieures	33
IV.1.2.1.3	L'équation finale	34
IV.2	Les régimes d'écoulement	34
IV.2.1	Nombre de Reynolds	34
IV.2.2	Régime laminaire	35
IV.2.3	Régime transitoire	36
IV.2.4	Régime turbulent	36
IV.3	Répartition de profils de vitesses	36

IV.4	Perte de charge	37
IV.4.1	Définition	37
IV.4.2	Coefficient de perte de charge	38
IV.4.3	Perte de charge linéaire	38
IV.4.4	Pertes de charges singulières	40
IV.4.5	Perte totale de charges	41
IV.5	Ecoulement de poiseuille	42
IV.5.1	Profil de vitesse	43
IV.6	Ecoulement dans un espace annulaire	44
IV.7	Méthodes numériques de résolution	46
	Introduction	46
IV.7.1	Un aperçu général sur les méthodes numériques	46
IV.7.1.1	Méthode des différences finies	46
IV.7.1.2	Méthode des éléments finis	47
IV.7.1.3	Méthode des volumes finis	47
IV.7.1.3.1	Principe de la méthode des volumes finis	47
IV.7.1.3.2	Maillage	51
Chapitre V	Modélisation et simulation d'un écoulement de fluide de forage	56
	Introduction	56
V.1	Modélisation des paramètres rhéologique du fluide à différentes températures	56
V.1.1	Résultat de la caractérisation	56
V.1.2	Détermination des paramètres des modèles de Herschel-Bulkley et de Cross	57
V.1.2.1	Le modèle Herschel-Bulkely	57
V.1.2.2	Le modèle de Cross	59
V.1.3	Comparaison entre le modèle d'Herschel-Bulkely et le modèle de Cross	60
V.2	Simulation de l'écoulement du fluide de forage	60
V.2.1	Validation du travail	60
V.2.1.1	Abstract sur l'étude adaptée pour la validation	60
V.2.1.2	Simulation par fluent	60
V.2.1.3	Géométrie	61
V.2.1.4	Propriétés des fluides	61
V.2.1.5	Maillage	61
V.2.1.6	Test de maillage	62

V.2.2	Les résultats de simulation	64
V.2.2.1	Le premier cas (la tige est concentrique)	64
V.2.2.1.1	Effet de la vitesse d'entrée de fluide de forage	65
V.2.2.1.2	Effet de la vitesse de rotation de la tige	68
V.2.2.1.3	Effet des paramètres rhéologiques de fluide de forage	72
V.2.2.2	Le deuxième cas (la tige est excentrique)	74
V.2.2.2.1	Effet de vitesse d'entrée de fluide de forage	76
V.2.2.2.2	Effet de la vitesse de rotation de la tige	80
V.2.2.2.3	Effet des paramètres rhéologiques de fluide de forage	84
Conclusion générale		89
Références bibliographiques		91
Annexes		95

La liste des figures

Figure [II.1] Circuit de boue de forage	7
Figure [II.2] Classification des fluides de forage	9
Figure [III.1] Schéma représentatif d'un cisaillement de deux couches fluides	17
Figure [III.2] Rhéogramme ou courbe du comportement rhéologique d'un fluide.	18
Figure [III.3] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide Newtonien.	19
Figure [III.4] Allure générale d'une courbe d'écoulement	20
Figure [III.5] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide pseudo-plastique	20
Figure [III.6] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide dilatant	21
Figure [III.7] Rhéogramme d'un fluide plastique idéal (fluide de Bingham) et d'un fluide plastique fluidifiant.	21
Figure [III.8] Courbe rhéologique résultant d'un test de charge-décharge pour un fluide dépendant du temps.	23
Figure [III.9] Evolution de la vitesse de déformation au sein d'un fluide viscoélastique lors d'un test de fluage.	24
Figure [III.10] Géométrie de Couette cylindrique	25
Figure [III.11] Géométrie cône-plan (coupe de profil)	26
Figure [III.12] Géométrie plan-plan	28
Figure [IV.1] Les régimes d'écoulement	35
Figure [IV.2] Profil de vitesse en régime laminaire	36
Figure [IV.3] Profil de vitesse en régime turbulent	37
Figure [IV.4] Profil de vitesse en régime turbulent	37
Figure [IV.5] Perte de charge linéaire ΔH entre les sections 1 et 2	39
Figure [IV.6] Valeurs de coefficient de perte de charge singulière de quelques singularités	41
Figure [IV.7] Ecoulement de poiseuille dans une conduite cylindrique	42
Figure [IV.8] La profile parabolique des vitesses de fluide en écoulement de poiseuille.	44
Figure [IV.9] Ecoulement dans une canalisation annulaire.	44
Figure [IV.10] Discrétisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel	48
Figure [IV.11] Volume de contrôle à travers lequel se fait l'intégration	50
Figure [IV.12] Maillage non-structuré en 2D et 3D	52
Figure [IV.13] Différentes formes de cellules en 2D et 3D	52
Figure [IV.14] Trois exemples de maillages structurés : (a) une grille cartésienne, (b) curviligne, (c) cylindrique.	53
Figure [IV.15] Exemple du maillage non-structuré.	53
Figure [IV.16] Exemple de maillage hybride	54
Figure [V.1] Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures	56
Figure [V.2] Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures	57
Figure [V.3] Modélisation du comportement rhéologique de fluide à différentes températures à partir du modèle d'Herschel-Bulkely	58

Figure [V.4] Modélisation du comportement rhéologique de fluide à différentes températures à partir du modèle de Cross	59
Figure [V.5] Les différents maillages du test	62
Figure [V.6] Les résultats déjà trouvés dans l'étude de validation	63
Figure [V.7] Vue de dessus de La géométrie concentrique	64
Figure [V.8] Distribution de maillage sur la géométrie concentrique	64
Figure [V.9] Profil de vitesses dans le cas concentrique (outlet et annulaire) pour $V_{\text{entrée}}=0.3, 0.6, 1$ et 1.4 m/s avec RPM=0	66
Figure [V.10] Profil de vitesse suivant l'axe X et Z pour des différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas concentrique	67
Figure [V.11] Perte de pression aux différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas concentrique	68
Figure [V.12] Profil de vitesses dans le cas concentrique (outlet et annulaire) pour RPM= 0, 100,200 et 300 tr/min avec $V_{\text{entrée}} = 1$ m/s	70
Figure [V.13] Profil de vitesse suivant l'axe X et Z pour des différents RPM et $V_{\text{entrée}} = 0$ dans le cas concentrique	71
Figure [V.14] Perte de pression aux différentes RPM et $V_{\text{entrée}} = 1$ m/s dans le cas concentrique	72
Figure [V.15] Profil de vitesse pour ($v=1$ m/s et RPM=0 tr/min) à différentes valeurs de « n » dans le cas concentrique	73
Figure [V.16] Profil de vitesse pour ($v=1$ m/s et RPM=100 tr/min) à différentes valeurs de « n » dans le cas concentrique	73
Figure [V.17] Changement de perte de pression en fonction de la vitesse d'entrée à (RPM=0) et la vitesse de rotation à ($V_{\text{entrée}}=1$ m/s) dans le cas concentrique	74
Figure [V.18] Vue de dessus de La géométrie excentrique	75
Figure [V.19] Distribution de maillage sur la géométrie excentrique	76
Figure [V.20] Profil de vitesse dans le cas excentrique (outlet et annulaire) pour $V_{\text{entrée}}=0.3, 0.6, 1$ et 1.4 m/s avec RPM= 0 tr/min	77
Figure [V.21] Les axes de présentation de la variation de vitesse sur la géométrie excentrique	78
Figure [V.22] Profil de vitesse (outlet) pour des différentes vitesses d'entrées avec RPM=0 dans le cas excentrique	78
Figure [V.23] Développement de vitesse (annulaire) pour des différentes vitesses d'entrées avec RPM=0 dans le cas excentrique	79
Figure [V.24] Perte de pression aux différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas excentrique	80
Figure [V.25] Profil de vitesses dans le cas excentrique (outlet et annulaire) pour RPM= 0, 100,200 et 300 tr/min avec $V_{\text{entrée}} = 1$ m/s	81
Figure [V.26] Profil de vitesse (outlet) pour des différentes RPM avec $V_{\text{entrée}} =0$ dans le cas excentrique	82
Figure [V.27] Développement de vitesse (annulaire) pour des différentes RPM avec $V_{\text{entrée}} =0$ dans le cas excentrique	83

Figure [V.28] Perte de pression aux différentes RPM et $V_{\text{entrée}} = 1 \text{ m/s}$ dans le cas excentrique	83
Figure [V.29] Profil de vitesse pour ($v=1 \text{ m/s}$ et $\text{RPM}=0 \text{ tr/min}$) a différentes « n » dans le cas excentrique	84
Figure [V.30] Profil de vitesse pour ($v=1 \text{ m/s}$ et $\text{RPM}=100 \text{ tr/min}$) a différentes « n » dans le cas excentrique	85
Figure [V.31] Changement de perte de pression en fonction de la vitesse d'entrée à ($\text{RPM}=0$) et vitesse de rotation à ($V_{\text{entrée}}=1\text{m/s}$) dans le cas excentrique	85

Liste des tableaux

Tableau [III.1] Présente un certain nombre d'équations rhéologiques des fluides au comportement indépendant du temps.	22
Tableau [V.1] Les paramètres rhéologiques de modèle Herschel-Bulkely à différentes températures	58
Tableau [V.2] Les paramètres rhéologiques de modèle de Cross à différentes températures	59
Tableau [V.3] Les dimensions utilisées pour la géométrie de la validation	61
Tableau [V.4] La propriété de fluide utilisé dans la validation	61
Tableau [V.5] Les résultats de test de maillage	63
Tableau [V.6] Le maillage utilisé pour le cas concentrique	64
Tableau [V.7] Les différentes vitesses d'entrées de fluide de forage	65
Tableau [V.8] Les propriétés du fluide de forage	65
Tableau [V.9] Conditions aux limites.	65
Tableau [V.10] Les différentes vitesses de rotation de la tige	68
Tableau [V.11] Conditions aux limites cas concentrique pour différent RPM	69
Tableau [V.12] Les cas étudiés pour l'effet de la température	72
Tableau [V.13] Le maillage utilisé pour le cas concentrique	75
Tableau [V.14] Condition aux limites cas excentrique pour différentes vitesses d'entrée	76

Nomenclature

ΔP	La réduction de la pression sur le fond [bar]
de	La densité d'entrée de la boue.
ds	La densité de sortie de la boue.
p	La pression hydrostatique de la boue initiale [bars]
$\dot{\gamma}$	La vitesse de cisaillement [s^{-1}]
τ	La contrainte de cisaillement [Pa]
τ_0	La contrainte de cisaillement seuil [Pa]
k	La consistance du fluide [$kg.s.n^{-2}.m^{-1}$]
n	L'indice de rhéofluidification.
ρ	La masse volumique du fluide [kg/m]
μ	La viscosité absolue [$Pa.s$]
λ	La constante propre au fluide.
T	La température [$^{\circ}C$]
P	La pression [Pa]
v	La vitesse d'écoulement [m/s]
H	L'épaisseur du fluide [m]
η	La viscosité dynamique [$pa. s$]
F	Force [N]
S	Section [m^2]
ν	La viscosité cinématique [$m^2.s^{-1}$]
C_p	Chaleur spécifique à pression constante [$J/kg.K$]

t	Le temps [s]
R_e	Le nombre de Rynold
D	Le diamètre [m]
L	La longueur de conduite [m]
ΔH_L	Perte de charge linéaire [m]
ΔH_s	Perte de charge singulière [m]
ΔH_t	Perte de charge totale [m]
K	Coefficient de perte de charge singulière
q_v	Débit-volume [m ³ /s]
RPM	Rotation par minute [rad/s]
f	Coefficient de frottement
g	Accélération terrestre [m.s ⁻¹]
WBM	La boue à base d'eau
R^2	Coefficient de détermination
ε	Coefficient d'excentricité de la tige
δ	La distance entre les deux centres [m]
R_0	Le rayon du tubage [m]
R_i	Le rayon de la tige [m]

Introduction générale

Les boues de forage sont fréquemment utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière et désignent tout fluide de forage liquide. Ce mélange lourd et gélatineux est utilisé principalement pendant les forages pétroliers et les puits de gaz naturel ainsi que sur les plateformes de forage d'exploration.

Dans ce travail, notre étude s'est portée sur la simulation d'écoulement de fluide de forage dans l'espace annulaire par le code ANSYS Fluent sous l'influence des paramètres différent (vitesse d'entrée de fluide, vitesse de rotation de la garniture RPM, Paramètres Rhéologiques) dans le cas concentrique et le cas excentrique.

Pour comprendre le changement des pertes de pression et la variation des profils des vitesses, une simulation numérique de l'écoulement de fluide forage va nous permettre de mettre en valeur le comportement rhéologique de la boue de forage sur l'écoulement sous l'influence des paramètres de forage très varié.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

Chapitre 1 sera consacré aux études qu'ont été déjà faites sur le thème de notre mémoire et les résultats trouvés pendant les années passées.

Chapitre 2 est dédié à la description et type des fluides de forage et leurs fonctionnalité primaire et secondaire et les problèmes rencontrés pendant le forage qui influent sur la boue.

Chapitre 3 sera consacré à la rhéologie des fluides ainsi que les écoulements de la boue dans une conduite poiseuille et l'espace annulaire.

Chapitre 4 sera consacré aux équations de la mécanique des fluides et les méthodes Numérique utilisées pour la résolution de ces équations.

Chapitre 5 sera consacré à la simulation par le code ANSYS fluent, pour étudier les profils de vitesse et perte de pression du fluide dans le cas concentrique et excentrique en étudiant l'influence de la vitesse d'entrée de fluide, la vitesse de rotation de la garniture RPM, et les paramètres rhéologiques.

Enfin le mémoire se termine par une conclusion générale dans laquelle une synthèse du travail réalisé sera présentée.

Chapitre 1

Etude Bibliographique

I Etude Bibliographique

Une attention particulière a été accordée au problème de l'écoulement laminaire des fluides non-newtonien dans les annulaires, dans les tuyaux et les fentes comme il a de nombreuses applications industrielles, un exemple typique de ces applications où l'écoulement des fluides non-newtonien à travers les annulaires sont rencontrés, est l'écoulement de boue forage dans le puits de forage. La boue de forage est pompée à l'aide des pompes vers l'outil de forage et retourne sous pression vers la surface. Les principales fonctions de la boue sont de transporter des déblais vers la surface et lubrifier l'outil de forage et le contrôle des pressions statiques de la formation.

Escudier et Gouldson (1995) [1] ont réalisé des études expérimentales de l'écoulement newtonien des fluides pseudo plastiques sous l'influence de la rotation de la garniture de forage, en utilisant LDA (Laser Doppler Anemometry) comme technique de mesure. Ils ont tracé les profils de vitesse pour différentes situations d'écoulement (débit de fluide et rotation interne de la garniture), ainsi que la mise en évidence du comportement du facteur de friction comme fonction du débit de fluide. Solutions de sirop de glucose ont été utilisées comme fluide newtonien et des solutions de carboxyméthylcellulose (CMC) comme fluide non newtonien.

Les déblais sont enlevés en pompant le fluide de forage de la surface dans le puits de forage à travers l'intérieur de la tige de forage pour lubrifier et refroidir le trépan et nettoyer la zone forée, évitant ainsi des augmentations inutiles du couple requis en raison de l'accumulation des déblais (Nouri et Whitelaw, 1997) [2]. La traînée de ces déblais est fortement liée à l'écoulement du fluide de forage, qui est déterminée par le profil vitesse dans l'espace annulaire (Escudier et al., 2000) [3].

Fang et al. (1999) [4] ont proposé des simulations numériques utilisant la technique des différences finies pour étudier l'écoulement de fluides pseudo plastiques dans un annulaire excentrique. Ils ont discuté des effets de l'excentricité et la viscosité sur le facteur de frottement associé à l'écoulement, et comparé leurs résultats avec ceux rapportés par autres auteurs (Nouri et al., 1993 [5] ; Nouri et Whitelaw, 1997 [6]).

Escudier et al. (2000) [7] ont évalué l'effet de rotation de la garniture sur l'écoulement laminaire du fluides Newtonien dans un annulaire excentrique et décrits l'effet du facteur de friction sous l'influence de conditions d'écoulement et excentricité.

Fisher et al. (2000) [8] ont intégré l'effet de la porosité à la limite du système dans leurs simulations. Leur objectif était de déterminer la dynamique des fluides de l'écoulement pour prédire le comportement de perte du fluide de forage et l'épaisseur du cake formé sur la paroi du puits de forage, compte tenu de l'influence de l'excentricité et de la rotation interne de la garniture. Ils ont présenté des résultats conformes aux informations disponibles dans la littérature, mais n'ont pas comparé leurs résultats numériques avec des données expérimentales.

Ali (2002) [9] estime les écoulements annulaires concentriques des fluides newtoniens dans les puits verticaux et horizontaux basés sur des simulations CFD, mais n'a pas quantifié les effets de la rotation interne de la garniture.

Escudier et al. (2002) [10] a étendu l'étude aux fluides non newtoniens, en comparant les résultats de simulation expérimentale et numérique et en mettant en évidence les profils de vitesse, par rapport à celles obtenues dans d'autres études rapportées dans la littérature (Nouar et al., 1987 [11] ; Nouri et Whitelaw, 1997 [12]).

Duan et al. (2008) [13] ont expliqué que la rotation de la tige de forage diminue la perte de pression par frottement.

Ahmed et al. (2010) [14] ont montré que l'écoulement dans l'espace annulaire est compliqué et dépend de plusieurs facteurs, par exemple, la vitesse de rotation de la garniture de forage et la vitesse d'entrée et la rhéologie de la boue de forage.

Subramanian et al. et Anifowoshe et al. (2012,2000) [15] [16] ont conclu que les pertes de pression annulaires pour les fluides non newtoniens dépendent de la vitesse de rotation de la tige de forage, et les propriétés rhéologiques du fluide, et le régime d'écoulement, et le rapport de diamètre et de l'excentricité de l'annulaire.

Ofei et al. (2014) [17] ont utilisé la méthode de volume finis pour expliquer les effets de la vitesse du fluide et de la rotation de la tige de forage sur la prédiction des pertes de pression dans les géométries d'annulaires horizontales excentriques.

Aujourd'hui, avec l'amélioration rapide des ressources de calcul, les études de simulation numérique utilisant la technique de Dynamique des fluides Computationnelle (CFD) est une technique utile qui peut aider à visualiser un problème complexe d'écoulement de fluide d'une manière plus simpliste F.ahmmad et S.mahmud et S.zahid (2019) [18] (Vieira et al., 2005 [19]; Vieira Neto et al., 2008 [20]; Cunha et al., 2009 [21]; Barrozo et al., 2010 [22], Santos et al., 2009 [23], Oliveira et al., 2009 [24], Pereira et al., 2007 [25]), aidant à comprendre le comportement dynamique des fluides dans les écoulements annulaires.

Fedia Bekiri et Adel Benchabane (2021) [26] ont étudié l'effet de la rotation de la garniture de forage, ils ont utilisé la méthode CFD et le modèle rhéologique de herschel-bulkely, Leurs résultats numériques montrent que les pertes de charge diminuent avec l'augmentation de la rotation de la garniture, et dans les conditions de vitesse de rotation de 300 tr/min et de vitesse d'entrée de 1,2 m/s, la perte de charge présente une diminution considérable et une distribution uniforme de la vitesse dans la garniture et l'espace annulaire, il est indiqué qu'on peut considérer ces conditions de vitesse de rotation et de vitesse d'entrée comme des conditions optimales.

Les études susmentionnées indiquent qu'il est intéressant de combiner des travaux expérimentaux et des simulations CFD pour étudier les gradients de pression, en annulaire concentriques et excentriques, des écoulements de différents fluides non newtoniens, évaluant leurs effets sur l'hydrodynamique de ces systèmes. De plus, il est également important d'évaluer les champs de vitesse afin d'identifier les zones de flux préférentiels et les zones d'accumulation, car elles affectent directement l'écoulement de fluide de forage dans des situations de forage du puits réels.

Dans l'heure actuelle, des simulations CFD et des études expérimentales ont été réalisées pour analyser la chute de pression dans les annulaires concentriques et excentriques, avec et sans rotation du tube intérieur, à l'aide de solutions de deux polymères (gomme de Xanthane à 0,2% et 0,2% de carboxyméthylcellulose) pour évaluer les différents comportements non newtoniens de ces fluides et leur effet sur l'hydrodynamique de ces systèmes annulaires.

Ce travail a également impliqué des simulations CFD pour déterminer les profils de vitesse et identifier la présence d'écoulements préférentiels et de zones de stagnation, en particulier dans l'annulaire excentrique.

Chapitre II

Généralités sur les

boues de forage

II Généralités sur les boues de forage

Introduction

D'après Khodja (2008), la boue de forage, appelé aussi fluide de forage, est un mélange composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...).

La boue est un outil indispensable au forage, ses rôles sont multiples et son maniement délicat. Au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit, la boue est un paramètre de forage.

Il est donc indispensable d'apporter aux boues tous les soins nécessaires à leur fabrication, leur contrôle et à leur entretien en cours d'utilisation.

Les fluides de forage doivent avoir des propriétés telles qu'ils facilitent, accélèrent le forage, favorisent ou tout au moins ne réduisent pas d'une manière sensible et permanente les possibilités de production des sondages.

Le rôle du technicien ou de l'ingénieur des fluides de forage est par conséquent de connaître les propriétés, les fonctions de la boue, de déterminer par des mesures adéquates et normalisées si elle est apte à remplir chacun de ses rôles, si elle a les caractéristiques souhaitées et de maintenir ou d'obtenir ces caractéristiques au moyen des traitements appropriés les plus économiques.

La mise en œuvre des boues nécessite un personnel hautement qualifié, ayant une formation générale assez étendue lui permettant de connaître et d'expliquer les réactions physiques et physico-chimiques des fluides de forage.

A ces qualités, il faut ajouter l'expérience de chantier indispensable à la compréhension des techniques de forage et de complétion.

A aucun moment le technicien ou l'ingénieur des fluides de forage ne doit perdre de vue qu'il doit réaliser au moindre prix le fluide qui permettra d'atteindre les objectifs du sondage, dans les meilleurs délais et avec le maximum de sécurité.

II.1 Circuit de la boue

Le départ de ce cycle, quand le foreur démarre les pompes à boue, ces pompes aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à la tête d'injection, cette dernière reliant la tige carrée au moufle, on injecte la boue de forage à l'intérieur des tiges.

La figure [II.1] schématise le circuit de boue de forage selon les étapes suivantes :

1. Dans le bassin de décantation la boue est mélangée et conservée.
2. Une pompe triplex ou duplex assure la circulation de la boue dans l'intérieur de la tige de forage jusqu'au fond du puits.
3. La boue sort de l'extrémité de la tige de forage et tombe au fond du puits où le trépan est en train de forer la formation rocheuse.
4. Au niveau de l'outil de forage la boue sort à partir des duses de trépan.
5. La boue prend ensuite le chemin inverse dans l'espace annulaire en remontant à la surface les déblais, qui ont été arrachés par le trépan.
6. À la surface, la boue circule dans la conduite d'aspiration de la boue soit une tige qui mène aux équipements de traitement.
7. La boue traitée doit être renvoyé à l'intérieur des tiges pour continuer le forage dans un circuit fermé.

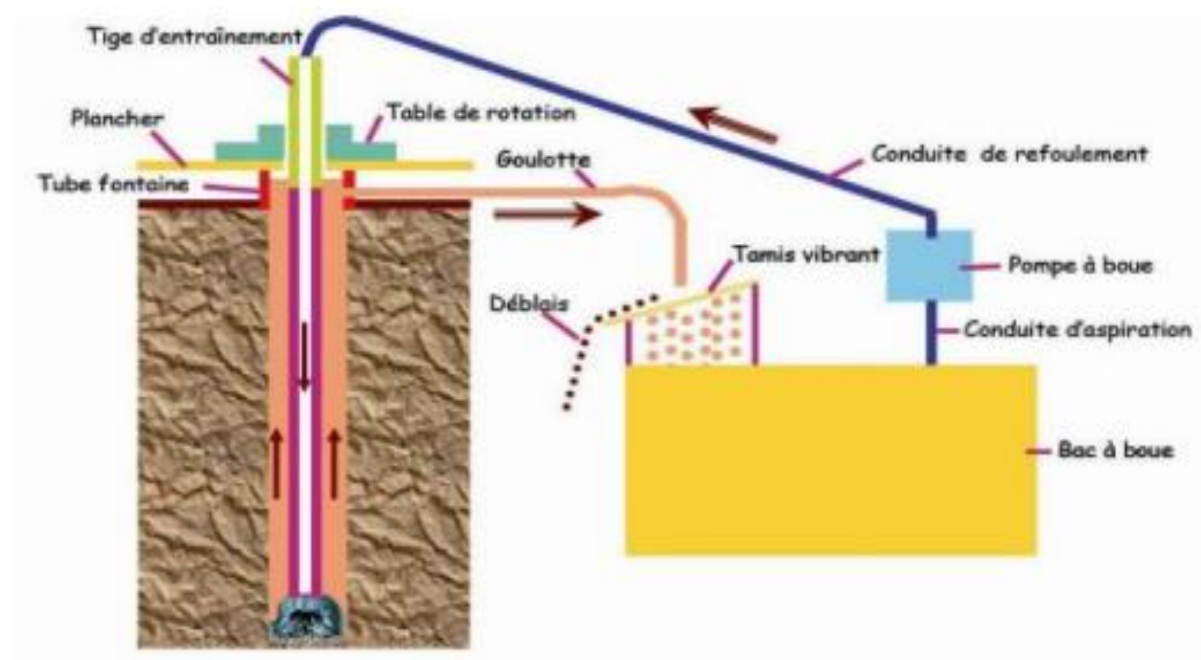


Figure [II.1] Circuit de boue de forage

II.2 Principales fonctions de la boue

Les boues de forage doivent avoir des propriétés spécifiques pour avoir les fonctions suivantes :

- Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu' à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire (nettoyage du puits).
- Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement.
- Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations traversées.
- Former un cake sur les parois de puit grâce à la différence de pression entre la pression hydrostatique et la pression des formations traversées
- Augmenter la vitesse de pénétration de l'outil.
- Assurer la prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile.

II.3 Les différents types de boues et constituants principaux

Plusieurs classifications des fluides de forage peuvent être adoptées, il est cependant habituel de présenter les fluides en fonction de la nature de leurs phases continues. Donc les boues de forage peuvent être divisées en deux groupes :

- Les fluides dont la phase continue est de l'eau.
- Les fluides dont la phase continue est de l'huile.

Remarque : il y a aussi des fluides, à base d'eau ou d'huile, dont les caractéristiques sont optimisées pour ne pas endommager le réservoir (pay zone).

II.3.1 Les boues dont la phase continue est l'eau

Ces boues sont constituées par trois groupes d'éléments distincts :

- L'eau qui est la phase la plus importante en volume et qui peut contenir de l'huile émulsifiée, en émulsion du type huile dans l'eau et des produits chimiques solubles.
- Les argiles ajoutées volontairement ou en provenance des formations forées. Les colloïdes organiques, les produits solubles mais à sursaturation.

- Les solides inertes : sables, calcaires, dolomies, barytine, etc.... Insensibles à l'action chimique (Herzhaft, 2001 ; Peysson, 2004).

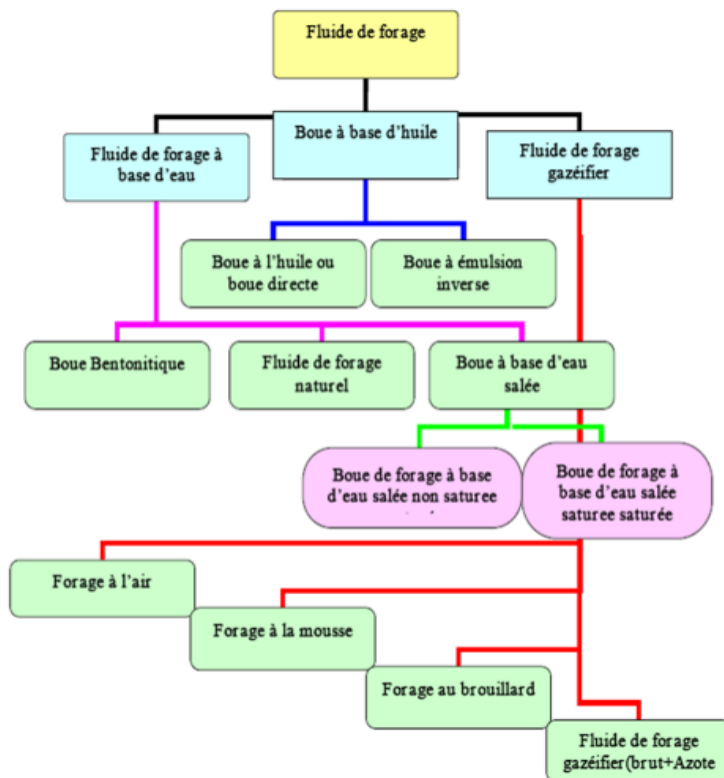
II.3.2 Les boues dont la phase continue est l'huile

On distingue les boues à l'huile contenant 5 à 15 % d'eau au maximum et les boues à émulsion inverse pouvant contenir jusqu'à plus de 50% d'eau. Pour ces deux types de boues, l'émulsion formée est toujours du type eau dans l'huile.

Tout comme les boues à base d'eau, les boues à base d'huile sont constituées par trois groupes d'éléments distincts :

- L'huile qui peut-être une huile raffinée ou du brut et l'eau d'émulsion qui peut être douce, salée ou salée saturée.
- Les savons et argiles organophiles qui confèrent de la viscosité, du corps à la boue et qui réduisent le filtrat.
- Les produits inertes : argiles (les argiles sont généralement oléophobes), barytine, carbonate de calcium, sables, dolomies, etc... (Lummus et al., 1971).

La classification des fluides est représentée dans l'organigramme suivant :



Figure[II.2] Classification des fluides de forage

II.4 Constituants principaux de la boue

II.4.1 L'eau de fabrication

L'eau de fabrication peut être de l'eau douce contenant peu ou pas de sels de sodium, calcium, magnésium et autres. Plus l'eau contiendra d'ions calcium et d'ions magnésium et plus l'eau sera dite « dure ».

Une eau dure diminue le rendement des argiles et des produits chimiques. L'addition de 1 à 2 kg de soude caustique ou de carbonate de soude par m³ d'eau permet de « l'adoucir » par précipitation du calcium et du magnésien.

L'eau de fabrication peut être aussi plus ou moins salée : de 7 à 35 g/l. Il n'est pas possible de diminuer la salinité d'une eau autrement que par dilution à l'aide d'eau douce. Il est cependant facile de fabriquer des boues à l'aide d'eau salée, mais avec un prix de revient en produits plus élevé.

L'eau de fabrication peut être aussi de l'eau salée saturée au Na Cl. Lorsque la saturation est obtenue la salinité de l'eau est comprise entre 315 et 318 g de Na Cl/L de saumure et la densité avoisine 1,20.

On peut ajouter de l'huile et former une émulsion du type huile dans l'eau.

La phase aqueuse peut contenir aussi des produits chimiques ajoutés pour traiter la boue.

II.4.2 Les argiles

Les argiles sont employées dans les boues à base d'eau pour donner de la viscosité et réduire le filtrat

Mise en suspension dans l'eau, l'argile gonfle en absorbant de grandes quantités de liquide, il en résulte une viscosité du mélange plus ou moins élevée suivant la qualité de l'argile et la composition électrolytique de l'eau.

Les argiles les plus couramment employées sont du type MONTMORILLONITE (de Montmorillon dans la Vienne) et sont plus connues des foreurs sous le nom de Bentonites (de FORT BENTON, Wyoming). Ces argiles sont extraites de gisement et subissent un traitement d'activation en usine.

Pendant le forage, l'outil traverse des formations argileuses d'épaisseur variable et, suivant le type de boue employé les — cuttings || se dispersent et gonflent en augmentant

dangereusement la viscosité de la boue. De ce point de vue, l'argile est un contaminant que l'on combat par un certain nombre de moyens : additions de produits fluidifiants, et d'inhibiteur de gonflement. Ajout d'eau, centrifugation, etc...

Toutefois, les bentonites commerciales gonflent peu ou pas en milieu salé et il faut employer dans ce cas, pour augmenter la viscosité. Des argiles spéciales, appelé attapulgites (de Attapulgis en Géorgie USA).

II.4.3 Les solides inertes

Ils sont constitués généralement par tout ce qui est insoluble dans l'eau et qui par conséquent, ne réagit pas. Ils n'agissent que par « effet de masse ». Ainsi le sulfate de Baryum ($BaSO_4$) ou Barytine, plus connu des foreurs sous le nom impropre de Baryte, est employé pour augmenter la densité. Parallèlement, la viscosité augmentera mais simplement parce qu'il faut de très grandes quantités de Barytine pour augmenter la densité d'une boue. Le sable, les calcaires, les dolomies ; etc...

II.5 Action du forage sur la boue

Au cours de son utilisation une boue de forage a toujours tendance à évoluer sous l'influence de circonstances extérieures. On est donc amené, en permanence, à effectuer un traitement permettant de maintenir les caractéristiques désirées. Dans certains cas cela est impossible ou trop coûteux et il est nécessaire de changer de type de boue pour pouvoir maintenir les caractéristiques souhaitées. Dans cette introduction nous nous Limitons à énumérer les principales conditions de forage qui affectent les caractéristiques de la boue ainsi que les problèmes posés par la nature de certaines formations. L'étude ultérieure de chaque type de boue nous nous amènera à développer ces points

II.5.1 Interaction physique ou contamination physique de la boue

- Teneur en solides inertes élevée.
- Teneur en solides colloïdaux élevée.
- Formation gonflante et / ou fluante.
- Forte pression (venue d'eau. Gaz, huile).
- Paille pression (perte de circulation).

II.5.2 Interaction chimique ou contamination chimique de la boue

- Gypse et anhydrite.
- Ciment.
- Chlorures.
- Sulfures.
- Venue d'eau, de gaz ou d'huile.
- Température élevée.

II.6 Fluides spéciaux

Par fluides spéciaux nous désignons :

- Les fluides de forage n'entrant pas dans les catégories précédentes. Ce sont les fluides aérés, l'air, la mousse.
- Les fluides étudiés pour résoudre des problèmes autres que ceux posés pour le forage proprement dit.

II.6.1 Forage à l'air

Depuis quelques années cette technique s'est développée et a notamment été mise en œuvre sur certains puits en Algérie, France, Espagne et Iran.

A l'origine le fluide en circulation est uniquement un gaz, généralement de l'air, parfois un gaz naturel produit sur le champ à développer.

Comme nous allons le voir, certains additifs deviennent rapidement indispensables.

Propriétés : L'air remplaçant la boue comme fluide de forage doit assurer les diverses fonctions de celle-ci.

Remontée des déblais : Afin de curer le puits, les vitesses de remontée doivent être élevées ce qui impose un débit d'air important. La vitesse moyenne de remontée admise dans des conditions atmosphériques normales est de l'ordre de 900 mètres par minute. Ces débits doivent être augmentés lorsque la profondeur s'accroît et que les vitesses d'avancement augmentent.

La section des déblais remontés est très faible, les déblais ont l'aspect de poussières.

II.6.2 Forage à la mousse

Lorsqu'un débit d'eau supérieur à 500 litres/heure se manifeste dans le puits, le forage à l'air sec devient impossible. Il faut faire appel au forage à la mousse.

Cette mousse est obtenue en combinant une injection d'air, de boue et d'un agent moussant.

II.6.3 Forage à la boue aérée

Lorsque le forage à l'air s'avère impossible et que des niveaux à pertes importantes ou des réservoirs à faible pression doivent être forés, il est possible d'utiliser une boue à base d'eau aérée.

Cette pratique permet de conserver une partie des avantages du forage à l'air tels que vitesse d'avancement et faible usure des outils tout en permettant de contrôler les venues.

La boue et l'air sont refoulés dans le circuit classique de surface et mélangés dans le rapport d'environ 3 à 5 volumes d'air pour un volume de boue.

Cette technique nécessite l'injection de l'air à une pression légèrement supérieure à celle de la boue (0,1 à 0,15 bar) et nécessite donc une installation importante de compression. De plus comme pour le forage à l'air, il faut prévoir un obturateur rotatif.

A la sortie du puits un dé aérateur est installé afin de séparer la phase liquide de la phase gazeuse.

II.7 Avantages et inconvénients des boues de forage

II.7.1 Avantage

Les avantages des boues sont :

- Réduction des frottements de la garniture sur les parois de puits et diminution de l'usure de la garniture.
- Contrôle aisé des caractéristiques.
- Insensibilité aux contaminants des boues à base d'eau (Na Cl, CaSo₄ , ...).
- Excellentes caractéristiques de filtration statique, cake mince insoluble dans l'eau et soluble dans le brut.
- Stabilité des caractéristiques de filtration en température.

- Réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits d'où diminution du couple de torsion, particulièrement en puits déviés. Réduction des risques de collage par pression différentielle.

II.7.2 Inconvénients

Les inconvénients des boues sont :

- Manipulation salissante, mais nettoyage d'autant plus facile que la teneur en eau est élevée.
- Risque d'incendie dans le cas de l'utilisation de brut insuffisamment débarrassé de ses éléments les plus légers.
- Détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures.
- Difficultés pour déceler la présence d'huile de formation dans les déblais.
- Prix de revient au m³ plus élevé que les boues à l'eau rendant souhaitable une récupération de la boue puits à puits.
- Pollution du milieu en cas de rejet.

II.8 Les problèmes de formation au cours de forage

II.8.1 Les pertes de circulation

Elles se manifestent par une baisse du niveau de boue dans les bassins, c'est-à-dire par un débit de boue à la sortie du puits inférieur au débit de pompage dans les tiges.

Elles peuvent être une perte partielle comme elle peut être aussi une perte totale dans le cas le plus graves lorsqu'il n'y a pas de retour à la goulotte.

Dans ce cas le puits se vide partiellement ou totalement, ce qui signifie possibilité d'éruption.

II.8.2 Les hautes températures

Les températures élevées à l'intérieur du puits ont une influence néfaste sur les boues, ce qui provoque l'augmentation du filtrat, une chute de la viscosité, et une solidification de certains types de boue (boue à la chaux).

II.8.3 Les sables

Dans la plupart des cas sont rencontrés dans les formations supérieures non consolidées. Ils sont généralement la cause d'éboulements et de coincements de la garniture.

Les sables grossiers n'ont pas d'influence sur la boue car ils décantent facilement dans les bassins.

Les sables fins, par contre accroissent la densité de la boue mais ne modifient pas les autres propriétés.

Les formations sableuses sont sensibles à l'invasion par l'eau de la boue, ce qui augmente encore leur fragilité.

La présence de sable dans la boue a un effet abrasif sur les parties mobiles des pompes, sur les duses de trépan et les événements d'outils conventionnels, ce qui a souvent pour effet de réduire leur longévité.

II.9 Contamination de la boue par le gaz

Lors du forage des formations contenant du gaz, ce dernier se mélange à la boue entraînant une réduction de la densité. Cette réduction est significative quand le gaz s'approche de la surface (LOI DE BOYLE).

La réduction de pression due à la contamination de la boue par le gaz est donnée par la formule de strong.

$$\Delta P = 2.3 \frac{de - ds}{ds} \log(p) \quad (\text{II.1})$$

ΔP : La réduction de la pression sur le fond (bars).

de : La densité d'entrée de la boue.

ds : La densité de sortie de la boue.

P : La pression hydrostatique de la boue initiale (bar)

Chapitre III

Notions de Rhéologie et des fluides complexes

III Notions de Rhéologie et des fluides complexes

Introduction

La rhéologie est une discipline qui traite de la déformation et de l'écoulement des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. La section qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides.

L'objet de la rhéologie est de déterminer l'équation rhéologique d'état d'un fluide par la mesure des paramètres rhéologiques en effectuant des mesures relatives des forces et des déplacements et en exploitant ces résultats à l'aide des équations de mouvements.

L'équation rhéologique d'état est la relation entre la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) et la contrainte de cisaillement (τ), qui représente, $\tau = f(\dot{\gamma})$ la connaissance de cette équation détermine les propriétés rhéologiques des matériaux qui sont obtenues expérimentalement à l'aide des viscosimètres ou des rhéomètres. Pour être plus réaliste, l'équation rhéologique d'état ne dépend pas seulement des caractéristiques propres du fluide comme la nature et les propriétés physiques, elle dépend aussi des paramètres extérieurs comme la température 'T' et la pression 'P', il sera donc plus correct d'écrire $\tau = f(\dot{\gamma}, T, P)$

III.1 Grandeurs caractéristiques de la rhéologie

III.1.1 La contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie. Considérons deux couches au contact l'une de l'autre, elles se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre (**figure [III.1]**), il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, ce sont les forces de cisaillement.

Ces forces dépendent de la surface considérée, on est amené à définir la contrainte de cisaillement par $\tau = \frac{dF}{dS}$

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau, elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche.

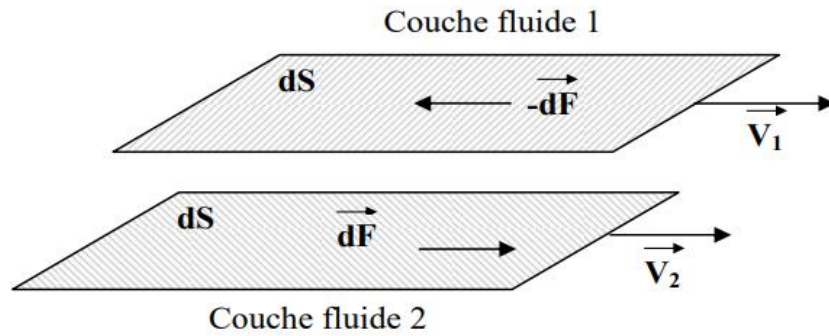


Figure [III.1] Schéma représentatif d'un cisaillement de deux couches fluides

III.1.2 La vitesse déformation

La vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (appelée aussi gradient de vitesse) est le rapport entre la vitesse d'écoulement (v) et l'épaisseur du fluide (H) qui est donnée par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{H} [s^{-1}] \quad (\text{III. 1})$$

III.2 La viscosité

C'est une propriété physique des fluides. Elle exprime l'effet de retard entre deux couches adjacentes d'un même fluide pendant son écoulement. La viscosité représente donc la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. La connaissance de cette grandeur physique est primordiale dans l'étude rhéologique d'un fluide. Il existe différents types de viscosité, parmi lesquelles :

III.2.1 La viscosité dynamique (apparente) (η)

Elle est donnée par la relation suivante (cas des fluides Newtoniens)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [pa.s] \quad (\text{III. 2})$$

Unité de (η) dans le Système international Pa.s ou Poiseuille (PI).

La viscosité apparente pour les fluides non-newtoniens, ils ne sont pas caractérisés par une seule viscosité pour n'importe quelle vitesse de cisaillement. C'est pourquoi on fait appel

à la viscosité apparente, qui est défini comme étant la viscosité du fluide à un point de cisaillement donné.

III.2.2 La viscosité cinématique (ν)

La viscosité cinématique présente un intérêt dès que la viscosité dépend de la densité (telle que les huiles).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} [m^2.s^{-1}] \quad (III.3)$$

ρ Est la masse volumique du fluide en kg/m

III.3 Rhéogramme

Pour visualiser graphiquement l'équation rhéologique d'état $\tau = f(\dot{\gamma})$, on trace son allure qu'on appelle 'Rhéogramme', qui sert à décrire les propriétés d'écoulement du matériau. Les Rhéogrammes les plus fréquemment utilisés sont les graphes ; $\tau = f(\dot{\gamma})$, à pression et température extérieures constantes **Figure [III.2]**, qui est la représentation la plus utilisée.

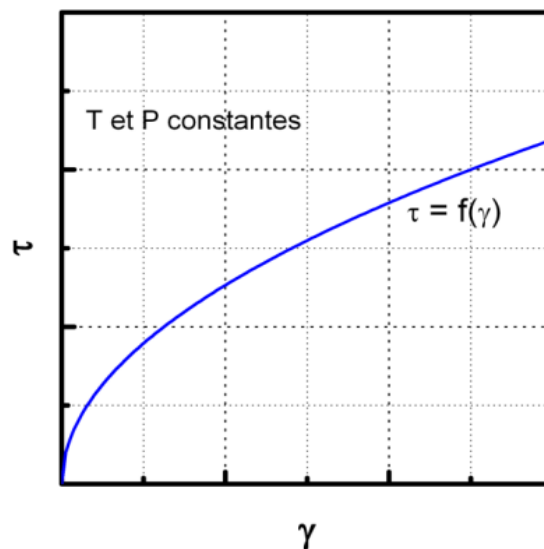


Figure [III.2] Rhéogramme ou courbe du comportement rhéologique d'un fluide.

III.4 Classification des fluides

III.4.1 Fluides newtoniens

Un fluide est dit Newtonien (ou fluide parfait), si sa viscosité (μ) est constante, quel que soit le gradient de vitesse à T et P fixés **Figure [III.3]**, et indépendante du temps, dans ce cas on parle de la viscosité absolue.

Les fluides Newtoniens sont caractérisés par un modèle linéaire et leur comportement rhéologique est proportionnel à la viscosité absolue (μ), où la tension de cisaillement (τ) est directement proportionnelle à la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$), l'équation rhéologique d'état est donnée par la relation suivante : $\tau = \mu \dot{\gamma}$.

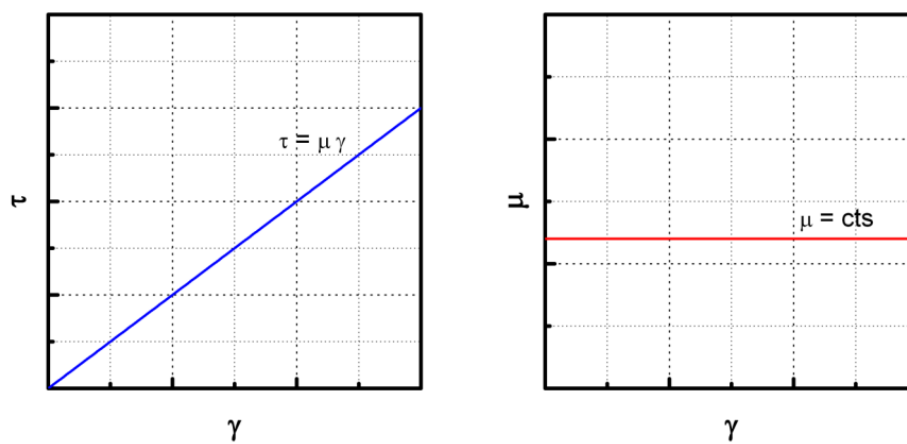


Figure [III.3] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide Newtonien.

III.4.2 Fluides non-newtoniens indépendants du temps

Dans ce cas la viscosité (μ) n'est pas constante, à chaque valeur du couple vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement ($\dot{\gamma}, \tau$) correspond une valeur de la viscosité (μ) **Figure [III.4]**, dès lors on parle de la viscosité apparente. Les fluides non-Newtoniens sont des fluides complexes comme les fluides, agro-alimentaires, les vases, les polymères, les boues de forage et les laitiers de ciment...etc.

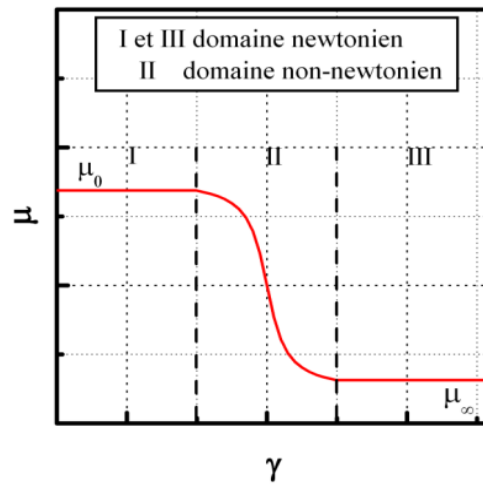


Figure [III.4] Allure générale d'une courbe d'écoulement

Les fluides non-newtoniens indépendants du temps sont subdivisés en trois groupes, qui sont caractérisés par des comportements rhéologiques distincts :

III.4.2.1 Fluides rhéofluidifiants

Appelés également pseudo-plastiques, ces fluides sont caractérisés par la diminution de leurs viscosités apparentes avec l'accroissement de la vitesse déformation **Figure [III.5]**. Ce comportement est très répandu et on peut citer en guise d'exemples : les polymères à longues chaînes en solution ou à l'état fondu, les colles, les pâtes à papier, les ciments...

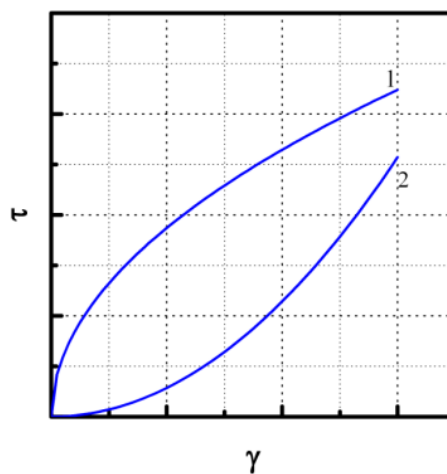


Figure [III.5] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide pseudo-plastique

III.4.2.2 Fluides rhéoépaississants

Ces fluides sont caractérisés par une viscosité apparente qui décroît avec l'accroissement de la vitesse de déformation (**Figure [III.6]**). Tel est le cas des solutions d'amidon, des sables mouillés et compactés, et certaines huiles polymériques.

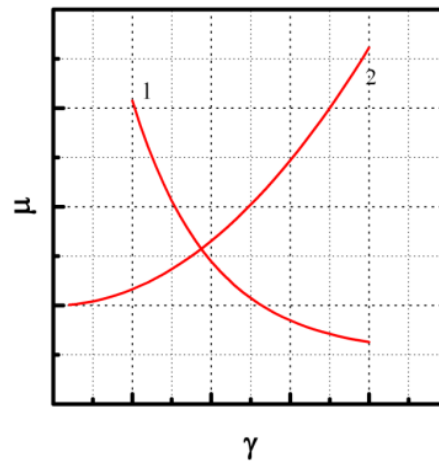


Figure [III.6] Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide dilatant

III.4.2.3 Fluides plastiques (fluides à seuil de contrainte)

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil (τ_0) ou (τ_c) en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible, autrement dit lorsqu'ils sont soumis à une contrainte très faible, leur viscosité est tellement forte qu'il ne peut pas s'écouler, leur viscosité diminue ensuite si une contrainte supérieure au seuil est appliquée (**Figure [III.7]**).

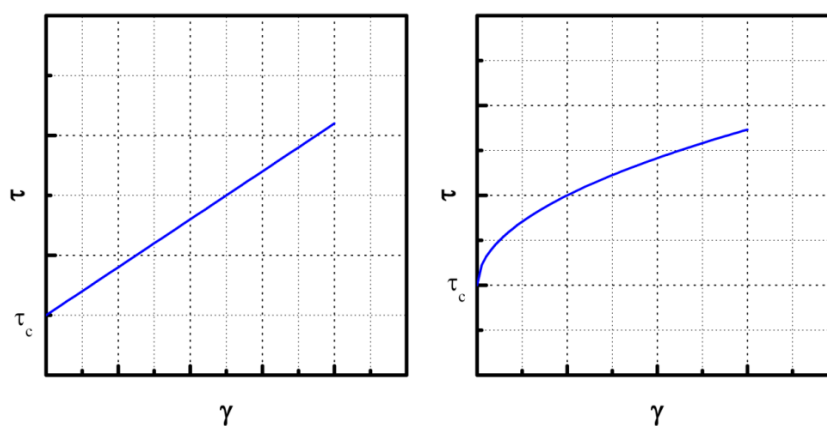


Figure [III.7] Rhéogramme d'un fluide plastique idéal (fluide de Bingham) et d'un fluide plastique fluidifiant.

Lors de l'écoulement, les fluides peuvent manifester un comportement newtonien (fluide de Bingham), ou l'un des comportements suscités. Mais il est plus fréquent de rencontrer des fluides plastiques fluidifiants tels que les boues, la pâte dentifrice, le sulfate de Zinc ou de Baryum en suspension, la pâte à pain, les matières grasses...

Tableau [III.1] Présente un certain nombre d'équations rhéologiques des fluides au comportement indépendant du temps.

Modèles	Lois Rhéologiques	Paramètres
Ostwald de Weale [1]	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	K, n
Ellis [2]	$\tau = \left(\frac{\mu_0}{1 + (\tau/\tau_{1/2})^{\alpha-1}} \right) \dot{\gamma}$	$\tau_{1/2}, \mu_0, \alpha$
Prandlt-Eyring [3]	$\tau = \tau_0 + Sh^{-1}(t_0\dot{\gamma})$	τ_0, t_0
Powell-Eyring [4]	$\tau = \mu_1\dot{\gamma} + \frac{\mu_0}{t_0} Sh^{-1}(t_0\dot{\gamma})$	μ_1, μ_0, t_0
Sisko [5]	$\tau = \mu_0\dot{\gamma} + K\dot{\gamma}^n$	μ_0, K, n
Reiner-Philipoff [6]	$\tau = \left[\mu_0 + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau/\tau_s)^2} \right] \dot{\gamma}$	$\mu_0, \mu_\infty, \tau_s$
Loi de puissance tronquée de Spriggs [7]	$\tau = \mu_0\dot{\gamma} \quad \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0$ $\tau = \mu_0\dot{\gamma}(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{n-1} \quad \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0$	$\mu_0, \dot{\gamma}_0, n$
Meter [8]	$\tau = \mu_0 \left[\frac{1 + (\tau/\tau_m)^{\alpha-1}(\mu_\infty/\mu_0)}{1 + (\tau/\tau_m)^{\alpha-1}} \right] \dot{\gamma}$	μ_0, τ_m, α
Hamersma [9]	$\tau = \mu_\infty\dot{\gamma} + \tau_0[1 - \exp(-a\tau)]$	$\mu_\infty, \tau_0, \alpha = \frac{\mu_\infty}{\mu_0\tau_0}$
Cross [10]	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^p} \right] \dot{\gamma}$	$\mu_0, \mu_\infty, \lambda, p$
Quemada [11]	$\tau = \left[\mu_\infty \left[\frac{1 + (\lambda\dot{\gamma})^p}{(\mu_\infty/\mu_0)^{1/2} + \dot{\gamma}^p} \right]^2 \right] \dot{\gamma}$	$\mu_0, \mu_\infty, \lambda, p$
Krieger-Dougherty [12]	$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = (1 + (\lambda\dot{\gamma})^p)^{-1}$	$\mu_0, \mu_\infty, \lambda, p$
Bingham [13]	$\tau = \tau_s + \mu_p\dot{\gamma}$	τ_s, μ_p
Herschel-Bulkley [14]	$\tau = \tau_s + K\dot{\gamma}^n$	τ_s, K, n
Casson [15]	$\tau^{1/2} = \tau_s^{1/2} + K_c\dot{\gamma}^{1/2}$	τ_s, K_c
Skelland [16]	$\tau = \tau_s + \frac{\mu_0\dot{\gamma}}{1 + c(\tau - \tau_s)^m}$	τ_s, μ_0, c, m
Robertson-Stiff [17]	$\tau = K(\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n$	$\tau_s = K(\dot{\gamma}_0)^n, n, K$

III.4.3 Fluides non-newtoniens dépendants du temps

Souvent le comportement des fluides non newtoniens dépend du temps car les modifications de structures microscopiques ne sont pas instantanées, on a ainsi des manifestations diverses de ces phénomènes dans les tracés de rhéogrammes.

Lorsque l'on applique un taux de cisaillement constant ou une contrainte constante à un fluide, il peut arriver que sa viscosité ne soit pas constante au cours du temps. Si la viscosité diminue au cours du temps à taux de cisaillement constant, on dit que le fluide est thixotrope ; si elle augmente, le fluide est anti-thixotrope.

Ces fluides se comportent comme si les contraintes subies dans un passé relativement récent modifiaient leurs comportements à l'écoulement présent. Les rhéogrammes résultantes de l'application d'une vitesse de déformation qui croît et décroît régulièrement (charge-décharge) sur ces derniers, présentent des cycles d'hystérésis (**Figure [III.9]**).

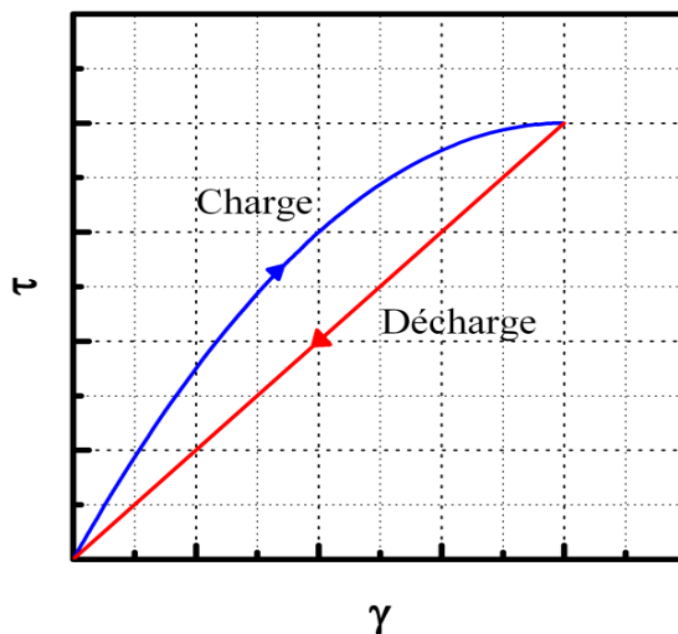


Figure [III.8] Courbe rhéologique résultant d'un test de charge-décharge pour un fluide dépendant du temps.

III.4.3.1 Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques manifestent sous l'effet d'une contrainte, un comportement qui dépend à la fois de la déformation, du taux de cisaillement et du temps.

Ces fluides possèdent simultanément des propriétés visqueuses et élastiques. Car soumis à un test de fluage (contrainte de cisaillement constante) **Figure [III.10]**, ces fluides se déforment en trois temps successifs :

1- Déformation instantané qui résulte de l'élasticité du fluide ;

2- Déformation élastique amortie par la viscosité ;

3- Déformation linéaire purement visqueuse.

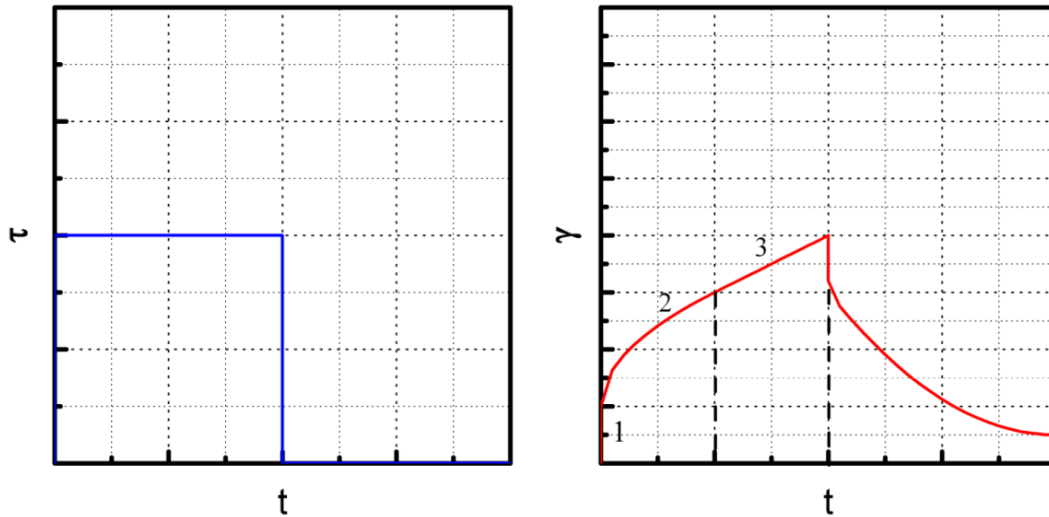


Figure [III.9] Evolution de la vitesse de déformation au sein d'un fluide viscoélastique lors d'un test de fluage.

III.5 Principe des rhéomètres Et techniques de mesures

III.5.1 Rhéomètres de type Couette

La géométrie de Couette est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative. Le rayon intérieur est noté R_i et le rayon extérieur R_e (et on a donc $R_e > R_i$). L'entrefer e est l'espace entre les deux cylindres ($e = R_e - R_i$). La hauteur du cylindre intérieur est notée h . Les géométries de Couette utilisées ont un cylindre extérieur fixe avec un fond (« cup » en anglais ; il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide) et un cylindre intérieur tournant (« bob » en anglais ; le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup »). **Figure [III.11]** représente une coupe de profil d'une géométrie de Couette cylindrique. Le rhéomètre impose un couple au cylindre tournant et mesure la vitesse de rotation de ce cylindre.

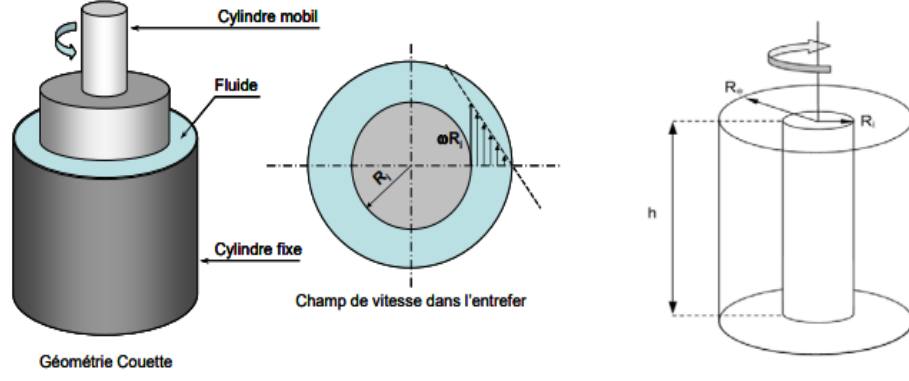


Figure [III.10] Géométrie de Couette cylindrique

Le couple C imposé par le rhéomètre sur le cylindre tournant vaut, en notant la contrainte moyenne sur le cylindre intérieur $\sigma (r = R_i) = \sigma_i$

$$C = (\text{distance}) \times (\text{force}) = R_i 2 \pi R_i h \sigma_i$$

$$\text{Soit : } \sigma_i = \frac{C}{2 \pi h R_i^2}$$

Pour un entrefer faible ($e = R_e - R_i \ll 1$), le système équivaut à un cisaillement entre deux plaques, et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, fonction de la vitesse angulaire de rotation Ω , s'écrit :

$$\dot{\gamma} = \frac{v_\theta}{e} \quad (\text{III. 4})$$

$$\text{Soit : } \dot{\gamma} = \frac{R_i \Omega}{R_e - R_i} \quad (\text{III. 5})$$

La viscosité $\eta = \frac{\dot{\gamma}}{\sigma}$ mesurée par le rhéomètre est donc une viscosité mesurée en supposant que l'entrefer est faible. En particulier, en faisant cette approximation, on a supposé un profil de vitesse linéaire dans l'expression du taux de cisaillement.

Notons d'abord que, dans le cas général de la géométrie de Couette cylindrique, la contrainte σ dépend de r la contrainte σ est donc hétérogène dans l'entrefer. Établissons cette dépendance. Par conservation du moment, on a (en notant $\sigma (r = R_i) = \sigma_i$) :

$$2 \pi R_i h \sigma_i R_i = 2 \pi r h \sigma (r) r \quad (\text{III. 6})$$

$$\sigma(r) = \frac{\sigma_i R_i^2}{r^2} \quad \text{avec} \quad \sigma_i = \frac{C}{2 \pi h R_i^2} \quad (\text{III. 7})$$

La contrainte σ décroît en $1/r^2$ dans l'entrefer. Le gradient de vitesse varie donc également dans l'entrefer, et le profil de vitesse n'est plus linéaire. Connaissant la variation de la contrainte dans l'entrefer dans un Couette cylindrique, il reste, pour calculer la viscosité du fluide, à déterminer le gradient de vitesse. Il faut pour cela connaître le profil de vitesse du fluide dans l'entrefer.

III.5.2 Géométrie cône-plan

La géométrie cône-plan est composée d'un plan fixe et d'un cône de symétrie cylindrique tronquée à sa base (pour éviter en pratique les frottements du cône sur le plan fixe, car le sommet fictif du cône est en contact avec ce plan). Le plan fixe est dans la pratique un disque coaxial avec le cône. Le fluide étudié est compris entre le cône et le plan (**Figure [III.12]**). La contrainte $\sigma(\alpha_c)$ sur le cône s'écrit :

$$\sigma(\alpha_c) = 3C / (2\pi R^3 \cos \alpha_c) \quad (\text{III. 8})$$

« α_c » étant l'angle entre le cône et le plan horizontal. σ est constante pour un angle α_c donné, et donc en particulier sur la surface du cône (située à l'angle α_c). La variation de la contrainte dans l'entrefer vaut :

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\sigma(\alpha_c) - \sigma(\alpha=0)}{\sigma(\alpha=0)} = \frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \quad (\text{III. 9})$$

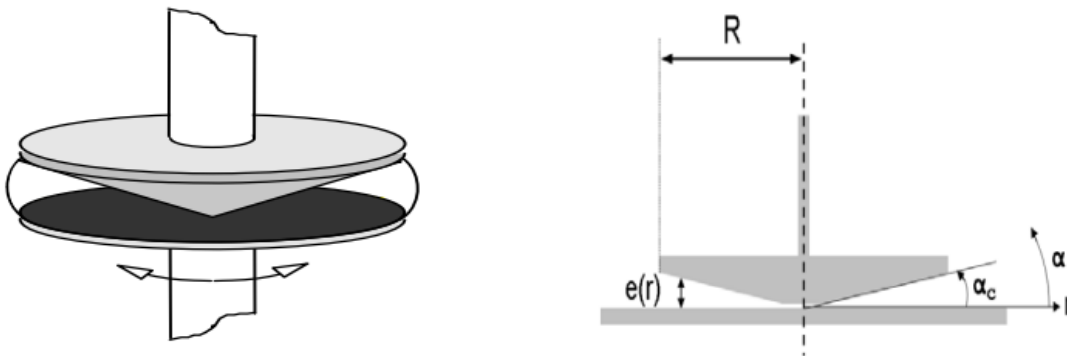


Figure [III.11] Géométrie cône-plan (coupe de profil)

La variation de la contrainte σ dans l'entrefer varie donc peu pourvu que α soit petit. Pour $\alpha = 4^\circ$ (valeur usuelle pour une géométrie cône-plan d'un rhéomètre commercial), on a $\Delta\sigma / \sigma \approx 0,25\%$. La contrainte σ est donc quasiment constante dans le fluide placé dans l'entrefer, pour α petit. Dans ce cas, la contrainte σ se réécrit :

$$\sigma = 3 C / 2\pi R^3 \quad (\text{III. 10})$$

Par ailleurs, comme l'entrefer e et la vitesse tangentielle v_θ augmentent tous deux avec la distance r à l'axe, le taux de cisaillement est constant pour tout r . En effet, on a :

$$\dot{\gamma}(r) \frac{\Omega r}{e(r)} = \frac{\Omega r}{r \tan \alpha_c} = \frac{\Omega}{\tan \alpha_c} \quad (\text{III. 11})$$

« $\dot{\gamma}$ » ne dépend donc en fait pas de r . En pratique, α_c est très petit (inférieur ou égal à 4°), et donc $\dot{\gamma} \approx \Omega / \alpha_c$. Ne dépend donc en fait pas de r . En pratique, α_c est très petit (inférieur ou égal à 4°), et donc $\dot{\gamma} \approx \Omega / \alpha_c$.

La géométrie cône-plan avec un angle α_c petit est donc une géométrie pour laquelle la contrainte est quasi-constante dans l'entrefer. On peut donc s'attendre à des profils de vitesse quasi-linéaires. De plus, le taux de cisaillement global (ici entre le cône et le plan) étant constant radialement, les profils de vitesse ont la même pente pour tout r . Près de la troncature toutefois, l'écoulement ne suit pas les équations établies précédemment. Il faut aussi apporter le plus grand soin à l'alignement horizontal du cône et du plan afin d'avoir un α effectivement constant autour de l'axe de rotation, et faire attention aux effets de bords (sur la surface libre en contact avec l'air). En effet, sur cette surface libre et en particulier pour les fluides non-newtoniens, une grande quantité de matière peut engendrer des contraintes supplémentaires dans le fluide, et au contraire un manque de matière (qui cause un « creusement », c'est-à-dire une zone incurvée vers l'échantillon) fait artificiellement baisser la viscosité mesurée.

III.5.3 Géométrie plan-plan

La géométrie plan-plan est constituée de deux plaques horizontales espacées par un entrefer donné (réglable par l'utilisateur). En pratique, les plaques sont des disques coaxiaux (**Figure [III.13]**).

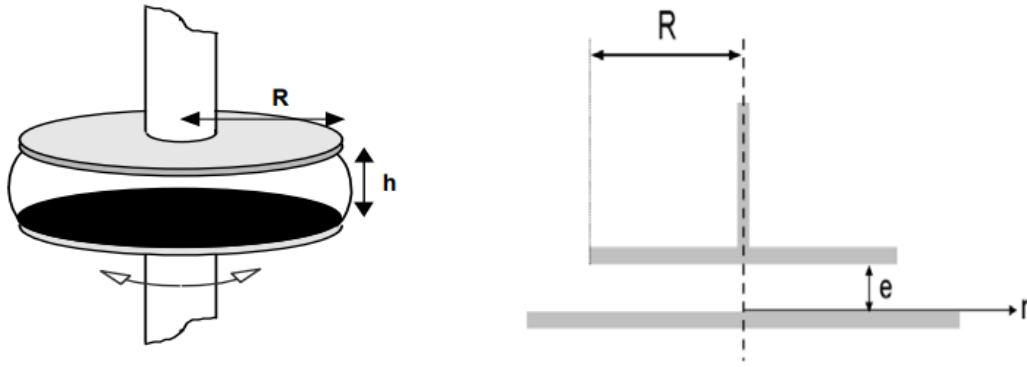


Figure [III.12] Géométrie plan-plan

Cette géométrie est privilégiée pour des pâtes granulaires car l'entrefer, constant, est ajustable. On peut donc choisir un entrefer supérieur à la taille d'une particule, ce qui évite qu'une particule ne se coince entre les deux plaques.

Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ et la contrainte σ dépend de la distance r à l'axe de rotation, et c'est l'inconvénient par rapport au cône-plan. L'entrefer h , lui, ne dépend pas de r . On a, avec Ω la vitesse de rotation :

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{\Omega r}{h} \quad \text{et} \quad \dot{\gamma}(r = R) = \frac{R\Omega}{h} \quad (\text{III. 12})$$

$\dot{\gamma}$ Varie de zéro lorsque $r = 0$ à $R\Omega / h$ lorsque $r = R$.

$\dot{\gamma}(r)$ Peut être aisément varié en modifiant l'entrefer h .

La contrainte σ est constante verticalement dans le fluide, mais varie en fonction de r . En $r = R$, elle s'écrit pour un fluide newtonien

$$\sigma(r = R) = 2 C / \pi R^3 \quad (\text{III. 13})$$

Chapitre IV
Equations de la mécanique
des fluides et méthodes de
résolution

IV Equations de la mécanique des fluides et méthodes de résolution

IV.1 Equation de la mécanique des fluides

IV.1.1 Les équations générales

L'écoulement d'un fluide est représenté par un ensemble d'équations aux dérivées partielles, l'équation de mouvement est réalisée à partir de l'application du principe de conservation de la quantité de mouvement, et l'équation de continuité obtenu par la masse sur un élément fluide infinitésimal, et pour l'équation de l'énergie, elle est basée sur l'application du principe de conservation de la quantité de chaleur comprise dans l'élément fluide.

Noter que dans une direction où il n'y a pas de composante de vitesse, le gradient de pression dans cette direction est nul, en l'absence de force extérieure. Par ailleurs, le champ de vitesse obéit à la condition d'incompressibilité $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$.

Tout le long de ce travail nous allons considérer que le domaine physique est représenté par le système des coordonnées cartésiennes ($x_1, x_2, x_3 = x, y, z$).

Les équations générales de bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie pour un modèle physique s'écrivent :

IV.1.1.1 Équation de continuité

L'équation de continuité exprime la conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{IV. 1})$$

En coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) \quad (\text{IV. 2})$$

Où :

$\mathbf{v}$: désigne la vitesse eulerienne d'une particule fluide.

v_x, v_y, v_z : les trois composants de vecteur vitesse.

ρ : la masse volumique.

IV.1.1.2 Équation de bilan de la quantité de mouvement

La loi fondamentale de la dynamique appliquée à un domaine matériel que nous suivons dans son mouvement, exprime qu'à dérivée particulaire du tenseur de quantité de mouvement est égale au tenseur des forces extérieures appliquées à ce domaine.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (\text{IV.3})$$

En coordonnées cartésiennes (x, y, z), les trois composantes de l'équation s'écrivent :

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Où :

τ : est le tenseur des contraintes visqueuses.

p : désigne la pression.

g : Accélération de la gravité.

IV.1.1.3 Equation de l'Energie

Pour déduire l'équation de l'énergie, nous appliquons le premier principe de la thermodynamique à un fluide en mouvement. Ce principe traduit que l'échange de chaleur et le travail entre le fluide et son milieu environnant entraîne une variation de l'énergie totale du système.

Cette équation en formulation incompressible et propriétés constantes.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q + \Phi \quad (\text{IV.5})$$

Où :

c_p : Chaleur massique a pression constante.

q : désigne la pression.

Φ : Accélérations de la gravité.

T : Température.

λ : Échelle intégrale.

IV.1.2 Les équations de Navier-Stokes

En mécanique des fluides, les équations de Navier Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus, c'est-à-dire le mouvement des fluides Newtoniens. Par définition, les fluides newtoniens sont des gaz et liquides visqueux ordinaires (exemple de l'eau). Lorsque des forces extérieures s'exercent sur un fluide newtonien, ce dernier garde ses propriétés de fluide.

Ces équations gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Par exemple, ces équations sont utilisées par météo France.

La résolution de l'équation de Navier Stokes est extrêmement difficile. A la complexité des équations aux dérivées partielles s'ajoute celle du non linéarité introduite par le terme d'advection de l'accélération. La plupart du temps, on essaie de résoudre une version simplifiée de l'équation en éliminant un voire plusieurs termes.

On considèrera un écoulement de fluide de masse volumique ρ , et on notera v les composantes du champ de vitesse et p la pression du fluide.

Nous ferons tout d'abord l'hypothèse que l'écoulement est permanent et que les forces de volume se réduisent à la gravité.

Tout d'abord nous partirons de l'équation de continuité qui traduit la conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (IV.6)$$

De plus, nous utiliserons l'équation de conservation de la quantité de mouvement qui se déduit de la relation fondamentale de la dynamique

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} \quad (IV.7)$$

En l'appliquant dans un milieu continu :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (IV.8)$$

Où :

$\vec{\tau}$: est le tenseur des contraintes visqueuses.

$\vec{f}$: désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

Passons à l'explication de ces termes puis à leur simplification, tout d'abord, le membre de droite fait apparaître deux types de forces :

IV.1.2.1.1 Les forces intérieures (ou contraintes)

- Liées à la pression. Elles existent même lorsque le fluide n'est pas en mouvement.
- Liées à la viscosité. Elles traduisent la résistance du fluide à la déformation avec $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ qui désigne la viscosité cinématique du fluide.

IV.1.2.1.2 Les forces extérieures

- Les forces volumiques, qui sont ici des forces de gravité ($\vec{f} = \vec{\tau}$) → Pour simplifier les équations nous omettrons ce terme.
- Les efforts surfaciques, qui correspondent la plupart du temps aux conditions aux limites imposées par un obstacle ou une paroi solide.

Le membre de gauche exprime l'accélération du fluide, on l'appelle aussi terme d'advection.

- Il est constitué de $(\vec{v}\vec{\nabla})\vec{v}$ qui est le terme de convection. Il caractérise la modification de la vitesse due à son transport.
- Il fait apparaître $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ la dérivée locale qui caractérise l'évolution temporelle de la vitesse.

Un fluide est dit incompressible quand sa masse volumique reste constante. Comme nous sommes dans ces conditions, on simplifie l'équation de la continuité avec cette propriété :

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{IV. 9})$$

On peut aussi l'écrire sous la forme en 3D :

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (\text{IV. 10})$$

IV.1.2.1.3 L'équation finale

De plus, le fait que le système soit homogène, c'est-à-dire que ρ soit invariant dans l'espace, le tenseur des contraintes $\vec{\tau} = (\tau_{i,j})_{i,j}$ se retrouve aussi réduit. Ainsi, nous arrivons donc, grâce à l'équation de la continuité ainsi que l'équation du bilan de quantité de mouvement à l'expression finale de Navier Stokes en 3 dimensions :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{array} \right. \quad (\text{IV. 11})$$

IV.2 Les régimes d'écoulement

IV.2.1 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds Re est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent). Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en adimensionnant les équations de Navier-Stokes.

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (IV.12)$$

Avec :

V : vitesse caractéristique du fluide [m/s].

L : dimension caractéristique [m].

ν : viscosité cinématique du fluide [m/s²].

Le nombre de Reynolds critique $Re_c \approx 2000$, en deçà de laquelle l'écoulement est assurément laminaire. Au-delà de cette valeur seuil, le régime d'écoulement devient turbulent.

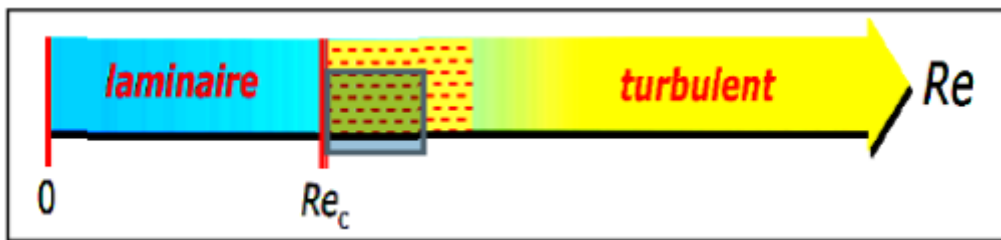


Figure [IV.1] Les régimes d'écoulement

IV.2.2 Régime laminaire

L'écoulement laminaire se produit lorsqu'un fluide s'écoule en couches parallèles, sans interruption entre les couches. À de faibles vitesses, le fluide tend à s'écouler sans mélange latéral, et les couches adjacentes glissent l'une après l'autre comme des cartes à jouer. Il n'y a pas de courants transversaux perpendiculaires à la direction d'écoulement, ni les tourbillons de fluides. Dans l'écoulement laminaire, le mouvement des particules du fluide est très ordonné avec des particules proches d'une surface solide se déplaçant en lignes droites parallèles à cette surface. Le flux laminaire est un régime d'écoulement caractérisé par une forte diffusion d'impulsion et une faible convection de quantité de mouvement.

Pour un écoulement laminaire le nombre de Reynolds est : $Re < 2000$

IV.2.3 Régime transitoire

C'est une transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. En physique, un régime transitoire est le régime d'évolution d'un système qui n'a pas encore atteint un état stable ou le régime établi. Un régime transitoire peut apparaître lors d'une modification d'un système.

IV.2.4 Régime turbulent

L'écoulement turbulent est un régime d'écoulement dans la dynamique des fluides caractérisé par des changements chaotiques de la pression et de la vitesse d'écoulement. Il est contraire à un régime d'écoulement laminaire, qui se produit lorsqu'un fluide s'écoule en couches parallèles, sans interruption entre ces couches.

Pour un écoulement turbulent le nombre de Reynolds est : $Re > 2000$

IV.3 Répartition de profils de vitesses

En régime laminaire : en écoulement laminaire la vitesse des particules est faible et que les lignes de courant sont régulières, parallèles aux parois du contenant. Le profil de vitesse se répartit de manière hyperbolique dans la section du conduit. Dans cette configuration, les forces visqueuses de cisaillement sont supérieures aux forces de frottement.

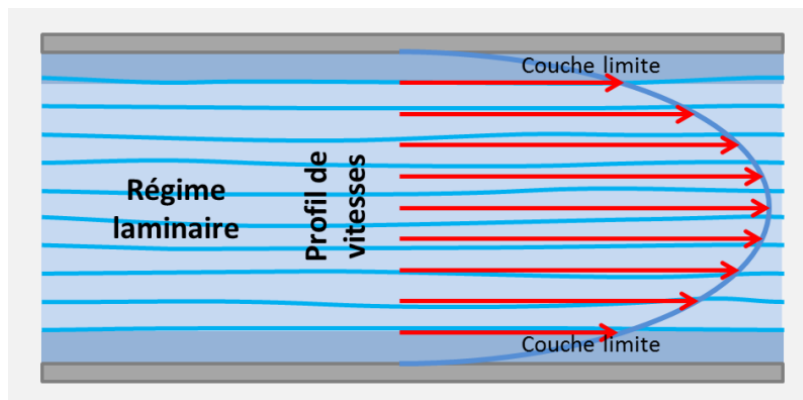


Figure [IV.2] Profil de vitesse en régime laminaire

En régime Turbulent : dans un écoulement turbulent les directions des particules se déplacent en tourbillons, dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment, de manière désordonnée. Ils apparaissent lorsque la vitesse est importante par rapport aux forces de viscosité. La dissipation des énergies génère finalement un profil des vitesses plutôt régulier. Dans cette configuration, la vitesse décroît de manière brutale au plus près des parois.

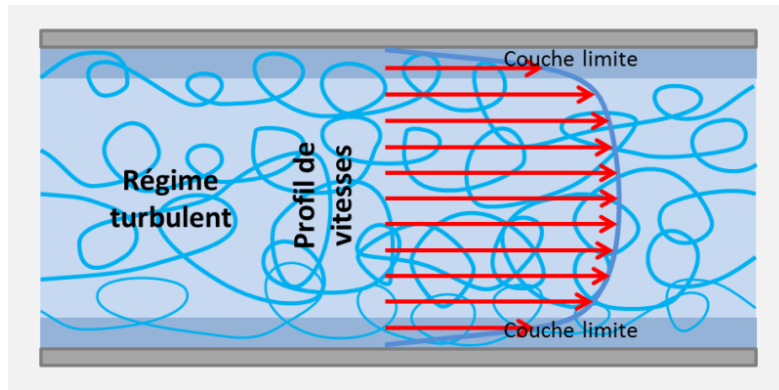


Figure [IV.3] Profil de vitesse en régime turbulent

IV.4 Perte de charge

IV.4.1 Définition

Lorsqu'un liquide se déplace dans les conduites, les canaux, les oueds, les fleuves et d'autres voies, on observe les dépenses énergétiques du courant pour vaincre la résistance au mouvement « perte de charge ». Ces pertes de charge peuvent être divisées en deux types :

- Pertes de charge linéaires ΔH_L qui sont observées sur toute la longueur du courant, sont proportionnelles à la longueur des tronçons des conduites (lits et sont engendrées par les forces de frottement).
- Pertes de charge « singulières ΔH_S qui sont dues aux différents éléments de construction et aux obstacles dans le courant (virage, coude, dérivation, té, croix, rétrécissement ou élargissement des lits, robinet, vanne, ...etc.).

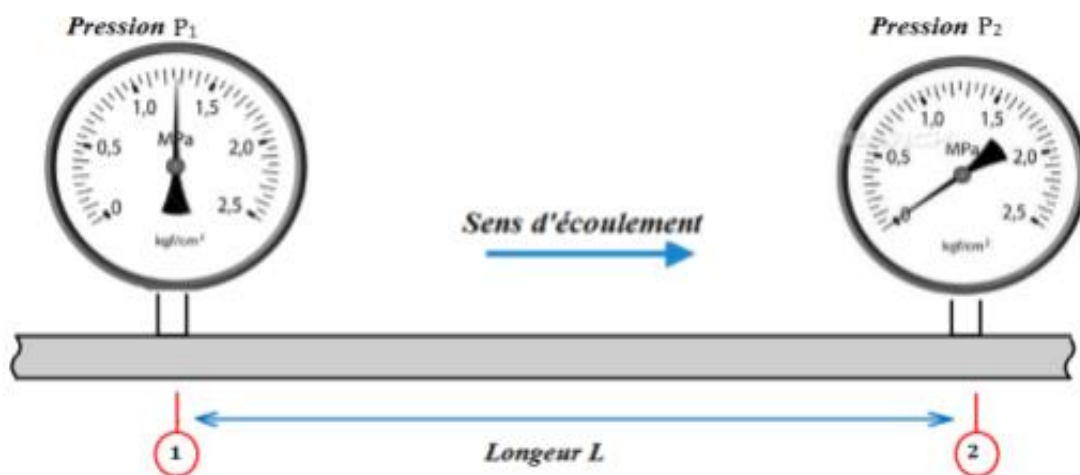


Figure [IV.4] Profil de vitesse en régime turbulent

IV.4.2 Coefficient de perte de charge

Il est d'usage d'exprimer une perte de charge en fonction de la pression cinétique de l'écoulement dans la conduite. La pression cinétique est générée par le mouvement (elle correspond à l'énergie cinétique par unité de volume, et s'exprime : $\frac{1}{2}\rho v^2$). La vitesse v peut être considérée comme la vitesse moyenne « μ » dans la conduite dans la mesure où la pression cinétique exprimée est aussi une valeur moyenne. Dans ces conditions, on peut formuler la perte de charge sur une longueur L d'une conduite de rayon $R=D/2$ comme :

$$\Delta P_t = 8\mu \frac{v}{(D/2)^2} L = \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) \left(\frac{1}{\frac{1}{2}\rho v^2} 32\mu \frac{v}{D^2} L\right) = \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) \left(\frac{64\mu}{\rho v D}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \quad (\text{IV. 13})$$

Où apparaît le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (\text{IV. 14})$$

Ainsi, la perte de charge s'exprime

$$\Delta P_t = \frac{1}{2}\rho v^2 \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \quad (\text{IV. 15})$$

Où le rapport $\frac{64}{Re} = \lambda$ est un nombre sans dimension qui prend le nom de coefficient de perte de charge régulière. À partir de résultat, on peut généraliser cette formulation en exprimant toute perte de charge sur une longueur L de conduite de diamètre D comme :

$$\Delta P_t = \frac{1}{2}\rho v^2 \lambda \frac{L}{D} \quad (\text{IV. 16})$$

On met ainsi en évidence que les pertes de charge régulières sont proportionnelles à la pression cinétique, à une grandeur sans dimension L/D caractérisant la conduite, et au coefficient de perte de charge régulière λ caractérisant l'écoulement et qui, lorsqu'il est laminaire ($Re < 2000$), se formule comme $\lambda = 64/Re$.

IV.4.3 Perte de charge linéaire

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides ; il se rencontre dans les tuyaux lisses aussi bien que dans les tuyaux rugueux. Entre deux points séparés par une longueur L , dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de charge ΔH_{1-2} .

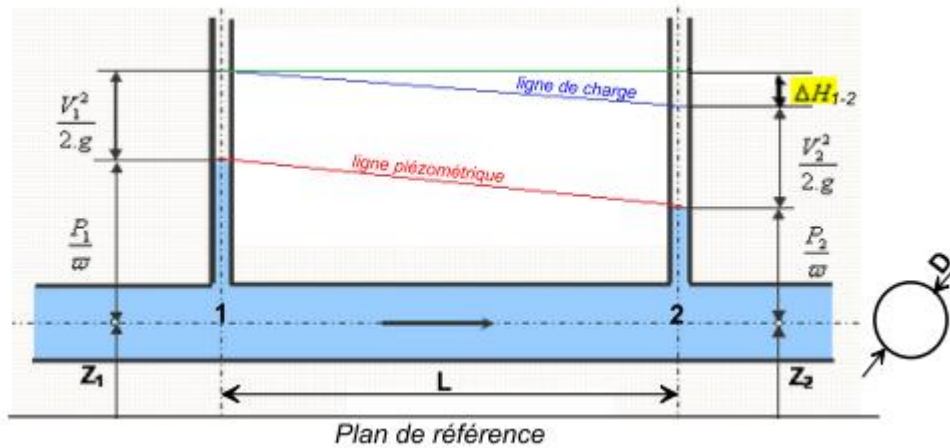


Figure [IV.5] Perte de charge linéaire ΔH entre les sections 1 et 2

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites.

En chaque point d'un écoulement permanent, les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps. La vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont parallèles.

Les chercheurs Weisbach et Darcy qui poursuivaient des recherches sur les écoulements, ont démontré que pour un écoulement donné les pertes de charge linéaires :

- Sont proportionnelles à la longueur L de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre D , proportionnelle au carré de la vitesse débitante V du fluide.
- Dépendent de la rugosité de la paroi ϵ , de la viscosité μ et de la masse volumique ρ du liquide.

Ils donnent la relation suivante :

$$\Delta H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{IV. 17})$$

ΔH_L : Perte de charge linéaire (m).

λ : représente le coefficient de frottement (coefficient de perte de charge).

L : Longueur de la conduite (m).

D : Diamètre hydraulique (m) (diamètre hydraulique = $4 \times \text{Section} / \text{Périmètre}$).

V : vitesse moyenne d'écoulement (m/s).

Les nombreuses formules de calcul mettent en jeu l'effet de la viscosité (au travers du nombre de Reynolds Re) et celui de la rugosité (au travers de l'indice de rugosité absolue ε) et ce, plus ou moins selon le régime d'écoulement. Les formules sont adaptées selon le régime d'écoulement : laminaire $Re \leq 2000$, transitoire, ou bien turbulent lisse ou rugueux avec $Re > 2000$. Face à la difficulté des calculs, une représentation graphique par le diagramme de Moody, permet d'approximer le coefficient de frottement λ .

IV.4.4 Pertes de charges singulières

Les pertes de charge singulières (ou locales) se produisent en présence d'obstacles, lorsque au moins une partie des lignes de courant s'écartent de la direction principale de l'écoulement. Il y a alors décollement de la paroi ou formation de zones de recirculation, par exemple au niveau des changements de direction (coudes, raccords en Y ou en T, grilles...), ou de sections (jonctions, clapets, vannes, à l'entrée ou en sortie de conduite...). Ces accessoires produisent une chute d'énergie rapide ; vitesse et pression diminuent sur une distance plus ou moins importante.

Chaque accessoire est affecté d'un coefficient de perte de charge singulière « K », déterminé expérimentalement ; sa valeur peut varier selon le constructeur. Le coefficient « K » est destiné à soustraire une partie de l'énergie cinétique, il est donc toujours compris entre 0 et 1.

La perte de charge singulière est le produit du coefficient de perte de charge « K » de l'obstacle par la représentation de l'énergie cinétique.

$$\Delta H_s = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{IV. 18})$$

Avec :

ΔH_s : Perte de charge singulière.

K : Coefficient de perte de charge singulière de l'accessoire (de la singularité).

V : vitesse moyenne dans la section (m/s).

g : Accélération de pesanteur = 9.81 m/s².

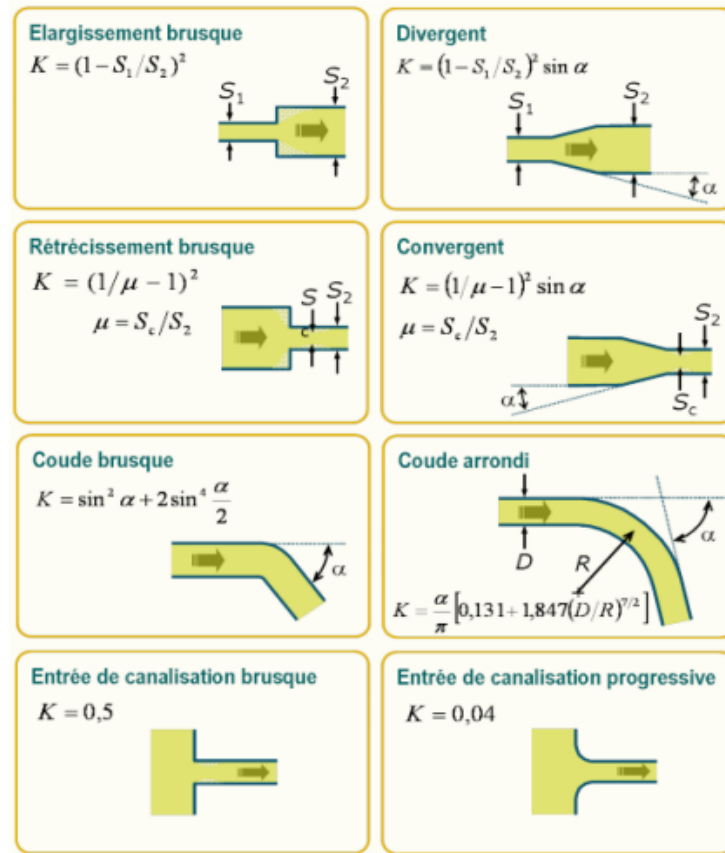


Figure [IV.6] Valeurs de coefficient de perte de charge singulière de quelques singularités

IV.4.5 Perte totale de charges

Dans un circuit en ligne, la perte de charge totale « ΔH_t » du circuit est, la somme des pertes de charges linéaires et singulières.

$$\Delta H_t = \Delta H_L + \sum \Delta H_S \text{ (m)} \quad (\text{IV. 19})$$

ΔH_L : Perte de charge linéaire (m).

$\sum \Delta H_S$: La somme des pertes de charges singulières (m).

Dans la pratique, la perte de charge linéaire est majorée de 10 à 15 % pour compenser les approximations liées à la détermination des coefficients de pertes de charges singulières « K ».

IV.5 Ecoulement de poiseuille

Un écoulement de Poiseuille est un écoulement laminaire stationnaire limité par des parois immobiles. On considère ici l'écoulement stationnaire, homogène, d'un fluide visqueux à l'intérieur d'une conduite cylindrique horizontale de rayon R , d'axe Ox . Le mouvement du fluide est provoqué par des dispositifs externes qui imposent une différence de pression entre l'entrée et la sortie du fluide.

- En $x = 0$ on impose une pression $P(0)$.
- En $x = L$ la pression vaut $P(L) < P(0)$.

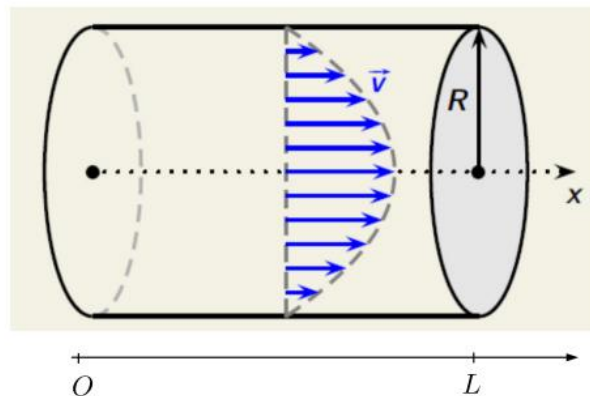


Figure [IV.7] Ecoulement de poiseuille dans une conduite cylindrique

En mécanique des fluides, le mouvement des fluides Newtoniens est décrit par les équations de Navier-Stokes (équations aux dérivées partielles non linéaires, valables dans des milieux continus). La résolution de ces équations complexes est difficile et nécessite la plupart du temps d'adopter des hypothèses simplificatrices.

La résolution de ces équations dans le cas de l'écoulement d'un fluide Newtonien incompressible en **régime laminaire** aboutit à la loi ou équation de Poiseuille :

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot (R^2 - r^2) \quad (\text{IV.20})$$

Avec :

$u(r)$: vitesse du fluide au rayon r (m.s^{-1}).

μ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

P : Pression (Pa).

x : Abscisse (suivant l'axe parallèle à la conduite) (m).

r : Rayon (coordonnée cylindrique) (m).

R : Rayon interne de la conduite (m).

IV.5.1 Profil de vitesse

L'équation de Poiseuille donne la vitesse du fluide en fonction du rayon auquel on se place dans la conduite. Elle traduit le profil parabolique des vitesses.

A partir de cette équation, on peut exprimer la vitesse moyenne du fluide au sein de la conduite sur une longueur L donnée :

$$u_{moy} = \frac{R^2}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (IV.21)$$

Avec :

u_{moy} : vitesse moyenne du fluide ($m.s^{-1}$).

μ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

Δp : Gradient de pression sur la longueur de conduite L (Pa).

L : Longueur de conduite considérée (m).

On peut montrer que le profil des vitesses est parabolique :

$$\vec{v} = V_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \vec{u}_x \quad (IV.22)$$

Avec :

$$V_0 = \frac{P(0) - P(L)}{4\eta L} \quad (IV.23)$$

Remarque : si le fluide était parfait on n'observerait pas de chute de pression.

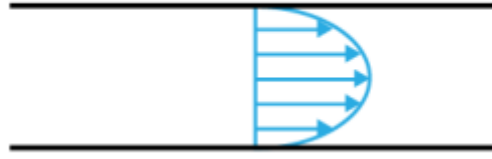


Figure [IV.8] La profile parabolique des vitesses de fluide en écoulement de poiseuille.

IV.6 Écoulement dans un espace annulaire

Examinons encore le cas d'un écoulement entre deux tuyaux droits coaxiaux, que l'on rencontre en particulier dans certains échangeurs, et aussi dans les forages pétroliers. On notera R_1 le plus petit rayon et R_2 le plus grand.

La figure suivante représente un écoulement de fluide dans une canalisation annulaire.

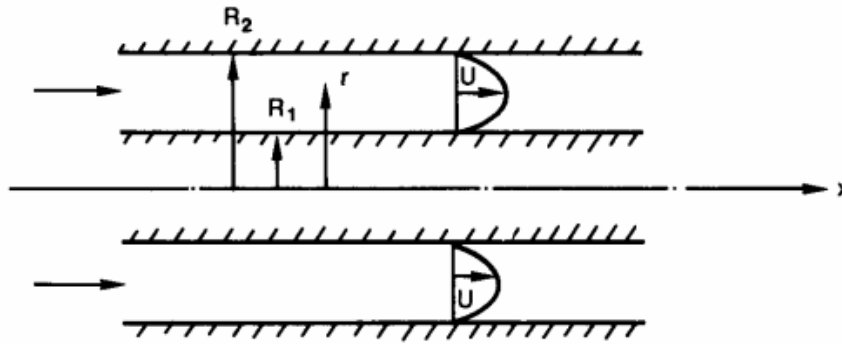


Figure [IV.9] Ecoulement dans une canalisation annulaire.

La solution générale reste valable, les conditions aux limites étant ici :

$$r = R_1, U = 0 \quad \text{et} \quad r = R_2, U = 0$$

Soient les équations :

$$A \ln R_1 + B = -\frac{R_1^2}{4\mu} \frac{dp^*}{dx} \quad (\text{IV. 24})$$

$$A \ln R_2 + B = -\frac{R_2^2}{4\mu} \frac{dp^*}{dx} \quad (\text{IV. 25})$$

On en déduit les constantes A et B :

$$A = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp^*}{dx} \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (\text{IV. 26})$$

$$B = + \frac{1}{4\mu} \frac{dp^*}{dx} \left\{ \frac{R_2^2 - R_l^2}{\ln(R_2/R_1)} \ln R_2 - R_2^2 \right\} \quad (\text{IV. 27})$$

Ce qui donne pour U, après regroupement de certains termes :

$$U = - \frac{1}{4\mu} \frac{dp^*}{dx} \left(R_2^2 - r^2 + \frac{R_2^2 - R_l^2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \ln \frac{r}{R_2} \right) \quad (\text{IV. 28})$$

Le maximum de la vitesse est obtenu pour un rayon r_m tel que :

$$r_m = \sqrt{\frac{R_2^2 - R_l^2}{2 \ln(R_2/R_1)}} \quad (\text{IV. 29})$$

En ce qui concerne le débit dû au gradient dp^*/dx , les calculs sont un peu plus laborieux.

Posons provisoirement, pour alléger l'écriture

$$C = \frac{R_2^2 - R_l^2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (\text{IV. 30})$$

Le débit-volume s'écrit :

$$q_v = \int_{R_l}^{R_2} U 2\pi r dr = - \frac{\pi}{2\mu} \frac{dp^*}{dx} \int_{R_l}^{R_2} (R_2^2 - r^2 + C \ln r - C \ln R_2) r dr \quad (\text{IV. 31})$$

$$q_v = - \frac{\pi}{2\mu} \frac{dp^*}{dx} \left\{ \frac{R_2^4}{2} - \frac{R_2^2 R_l^2}{2} - \frac{R_2^4}{4} + \frac{R_l^4}{4} - \frac{C}{2} (R_2^2 - R_l^2) \ln R_2 + C \int_{R_l}^{R_2} r \ln r dr \right\} \quad (\text{IV. 32})$$

La dernière expression s'intègre par parties et vaut :

$$\int_{R_l}^{R_2} r \ln r dr = \left[\frac{r^2}{2} \ln r - \frac{r^2}{4} \right]_{R_l}^{R_2} \quad (\text{IV. 33})$$

Au total, on a donc :

$$q_v = - \frac{\pi}{2\mu} \frac{dp^*}{dx} \left\{ \frac{1}{4} (R_2^2 - R_l^2)^2 + C \left[- \frac{R_2^2 - R_l^2}{2} \ln R_2 + \frac{R_2^2}{2} \ln R_2 \right] \right\} \quad (\text{IV. 34})$$

C'est-à-dire :

$$q_v = - \frac{\pi}{8\mu} \frac{dp^*}{dx} (R_2^2 - R_l^2) \left\{ R_2^2 + R_l^2 - \frac{R_2^2 - R_l^2}{\ln \frac{R_2}{R_l}} \right\} \quad (\text{IV. 35})$$

IV.7 Méthodes numériques de résolution

Introduction

La CFD est l'une des branches de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et des algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes que posent les écoulements de fluide. La connaissance requise de la dynamique des fluides pour analyser et évaluer les résultats est importante. Les prédictions obtenues à l'aide de la CFD (Computational Fluid Dynamics) sont largement validées par des données expérimentales, présentant une grande fiabilité dans l'exactitude des résultats.

Les équations de conservation sous forme différentielle décrivent le mouvement du fluide dans le temps et dans l'espace. Avant de commencer à résoudre ces équations numériquement, il faut discrétiser ou changer de forme du continu au discontinu. Le domaine que le fluide traverse doit être défini par un certain nombre de volumes connectés, ou de petites cellules (maillage). Il est nécessaire que les équations soient écrites sous une forme algébrique.

IV.7.1 Un aperçu général sur les méthodes numériques

Il existe plusieurs méthodes numériques dans la mécanique des fluides et chaque méthode a ces avantages et ces inconvénients spécifiques.

- Méthode des différences finies.
- Méthode des éléments finis.
- Méthode des volumes finis.

IV.7.1.1 Méthode des différences finies

Une discrétisation par méthode des différences finies est basée sur la forme différentielle de l'EDP (Équations aux Dérivées Partielles) à résoudre. Chaque dérivée est remplacée par une formule de différence approximative (qui peut généralement être dérivée d'une extension de la série Taylor). Le domaine de calcul est divisé en cellules hexaédriques (la grille) et la solution sera obtenue à chaque point nodal. Cette méthode est plus facile à comprendre lorsque la grille physique est cartésienne. La discrétisation se traduit par un système d'équations de la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, nous avons une représentation discrète de la solution.

IV.7.1.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis subdivise le domaine en sous-domaines avec certaines formes, par exemple des formes triangulaires, avec un certain nombre d'inconnues aux nœuds qui dépendent de la fonction de forme sélectionnée. La fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible.

Cette méthode se décompose en deux étapes :

- Approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines (fonctions d'interpolation).
- Utilisation de la méthode des résidus pondérés qui permet de construire une formulation intégrale à partir des équations aux dérivées partielles.

IV.7.1.3 Méthode des volumes finis

Les méthodes des volumes finis sont principalement employées pour la résolution numérique de problèmes en mécanique des fluides, où elles ont été introduites dans les années 70 par Mc Donald en 1971, Mac Cormack et Paullay en 1972 pour la résolution des écoulements bidimensionnels, et par Rizzi et Inouye en 1973 pour la résolution des écoulements tridimensionnels. Cependant, l'application de la MVF (méthode des volumes finis) n'est pas limitée aux problèmes des écoulements. Une propriété importante des méthodes des volumes finis est que les principes d'équilibre, qui sont la base de la modélisation mathématique des problèmes mécaniques continus, par définition, sont également remplacés pour les équations discrètes (conservativité).

Cette méthode est largement décrite par Patankar S.V, c'est une méthode de discrétisation qui convient bien à la simulation numérique de différents types (elliptiques, paraboliques ou hyperboliques, par exemple) de lois de conservation. Il a été largement utilisé dans plusieurs domaines de l'ingénierie, tels que la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et de masse ou l'ingénierie pétrolière. Certaines des caractéristiques importantes de la méthode des volumes finis sont similaires à celles de la méthode des éléments finis.

IV.7.1.3.1 Principe de la méthode des volumes finis

En général, la méthode des volumes finis implique les étapes suivantes :

- Décomposition du domaine du problème en volumes de contrôle.

- Formulation d'équations d'équilibre intégral pour chaque volume de contrôle
- Approximation des intégrales par intégration numérique.
- Approximation des valeurs de fonction et des dérivées par interpolation avec valeurs nodales.
- Assemblage et solution du système algébrique discret

Le point de départ d'une discrétisation en volumes finis est une décomposition du domaine en un nombre fini de sous-domaines V_i ($i = 1, \dots, N$), appelés volumes de contrôle (VC) et les nœuds associés où les variables inconnues doivent être calculées. La combinaison de tous les VC devrait couvrir tout le domaine du problème. En général, les VC (volumes de contrôle) peuvent également se chevaucher, mais comme cela entraîne des complications inutiles, nous considérons ici le cas de non-chevauchement. Pour que finalement chaque VC donne une équation pour calculer les valeurs nodales, leur nombre final (c'est-à-dire, après l'incorporation des conditions aux limites) devrait être égal au nombre de VC (volumes de contrôle). Habituellement, les volumes de contrôle et les nœuds sont définis sur la base d'une grille numérique.

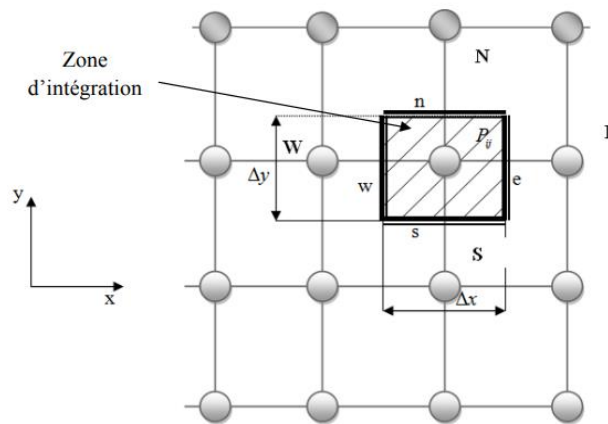


Figure [IV.10] Discretisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel

E: Nœud « East »; W: Nœud « West »; N : Nœud «North »; S : Nœud « South »; P: Nœud considéré ; w : interface « West » du volume de contrôle (VC) ; e: interface « East » du VC ; n: interface « North » du volume de contrôle (VC) ; s: interface « South » du volume de contrôle (VC) ; Δx : largeur du VC étudié ; Δy : longueur du VC étudié.

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations de conservation des différentes grandeurs physiques :

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_V \text{div}(\rho \phi \vec{V}) dV = \int_V \Gamma_\phi \text{grad}(\phi) dV + \int_V S_\phi dV \quad (\text{IV.36})$$

En appliquant le théorème de la divergence, qui consiste à transformer l'intégrale de volume en une intégrale de surface, la forme suivante est déduite

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \text{grad}(\phi) d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (\text{IV.37})$$

ρ : Masse volumique

$\vec{v}$: Vecteur vitesse

ϕ : la grandeur à calculer (vitesse, pression).

$\vec{A}$: Surface du volume de contrôle.

Γ_ϕ : Coefficient de diffusion pour ϕ .

S_ϕ : Coefficient de diffusion pour ϕ .

Les équations sont mises sous forme linéaire de façon à être résolues par méthode matricielle. Chaque point de calcul ou nœud se trouve entouré par un volume élémentaire sur lequel on va intégrer les équations aux dérivées partielles. Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectifs doivent posséder un côté commun. Il s'ensuit que l'union de tous les volumes de contrôles couvre l'ensemble du domaine de calcul. Cette propriété fondamentale va permettre la mise en évidence des propriétés de conservation des flux de chaleur.

Si nous considérons le cas d'un écoulement axisymétrique et en absence du terme source ϕS , l'équation s'écrira sous la forme suivante (avec $\phi = T$) :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = 0 \quad (\text{IV.38})$$

Ou encore

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.39})$$

Avec :

$$J_x = \left[u\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \text{ et } J_y = \left[v\phi - \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] \quad (\text{IV.40})$$

Nous allons l'intégrer à travers le volume de contrôle et par rapport au temps t.

Soit :

$$\int_s^n \int_w^e \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \phi}{\partial t} dt dx dy + \int_s^n \int_w^e \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy dt + \int_s^n \int_w^e \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial J_y}{\partial y} dy dx dt = 0 \quad (\text{IV.41})$$

Pour intégrer cette équation, on suppose que :

- Á un instant donné, la température est uniforme à travers le volume de contrôle.
- Pour un « x » donné ou un « y » donné, le flux est uniforme le long de la face.
- On prend un schéma implicite pour assurer une stabilité de ce schéma dans le temps.

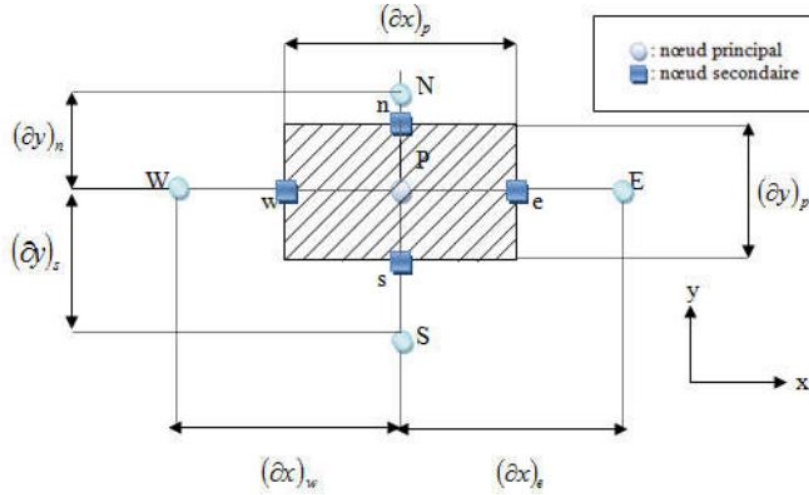


Figure [IV.11] Volume de contrôle à travers lequel se fait l'intégration

Après intégration, on aboutit à :

$$[(\phi)_p - (\phi)_p^0] \Delta x \Delta y + \int_s^n (J_e - J_w) dy \Delta t + \int_w^e (J_n - J_s) dx \Delta t = 0 \quad (\text{IV.42})$$

Soit :

$$[(\phi)_p - (\phi)_p^0] \frac{\Delta V}{\Delta t} + [J_e - J_w] + [J_n - J_s] = 0 \quad (\text{IV. 43})$$

Avec :

ΔV : volume entourant le nœud P ($\Delta V = \Delta x \Delta y$)

$(\phi)_p$: valeur au temps $t + \Delta t$

$(\phi)_p^0$: Valeur au temps t

$$J_e = \int_s^n J_e dy = \left[u\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_e \Delta y \quad (\text{IV. 44})$$

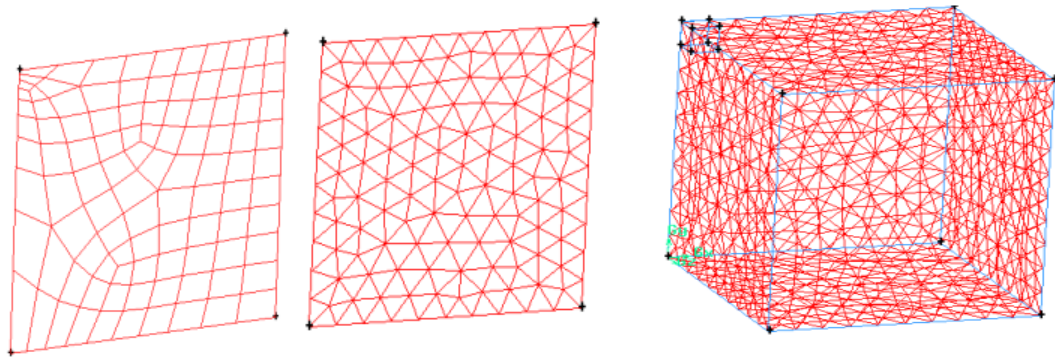
$$J_w = \int_s^n J_w dy = \left[u\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_w \Delta y \quad (\text{IV. 45})$$

$$J_n = \int_w^e J_n dx = \left[v\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_n \Delta x \quad (\text{IV. 46})$$

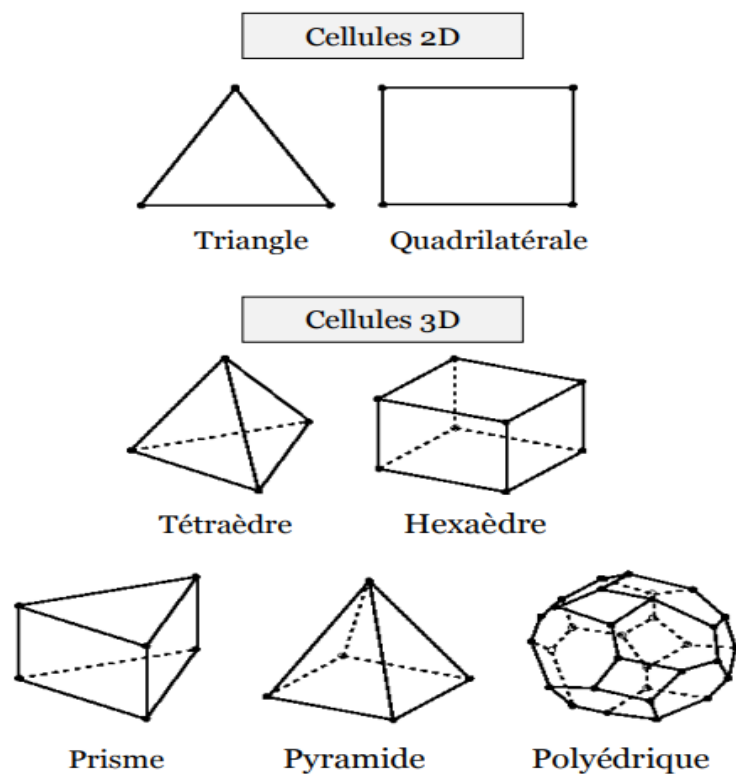
$$J_s = \int_w^e J_s dx = \left[v\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_s \Delta x \quad (\text{IV. 47})$$

IV.7.1.3.2 Maillage

Pour diviser le domaine en un ensemble de morceaux discrets, ou de cellules de calcul, ou de volumes de contrôle, une grille est utilisée. Aussi appelé un maillage. Le maillage dépend de la géométrie du problème traité. L'ICEM nous propose deux genres de maillage (TETRAHEDRAL et l'HEXAHEDRAL). Le TETRAHEDRAL est un maillage semi-automatique, simple à générer en suivant certaines étapes. L'HEXAHEDRAL nécessite beaucoup d'étapes intermédiaires, en passant par les projections des surfaces, courbes et points.

**Figure [IV.12]** Maillage non-structuré en 2D et 3D

La grille peut avoir plusieurs formes et tailles. En 2D par exemple, les éléments sont des quadrilatères ou des triangles (Figure IV.4). Ils peuvent être tétraédriques, prismes, pyramides ou hexaèdres. La différence entre les formes est juste le nombre de côtés et d'angle. Une série de faces planes (2D) ou planes (3D) reliant les limites du domaine sont utilisées pour réaliser les éléments.

**Figure [IV.13]** Différentes formes de cellules en 2D et 3D

Maillage structuré

Les grilles structurées sont identifiées par une connectivité régulière. Les choix d'éléments possibles sont quadrilatéraux en 2D et hexaèdres en 3D. Ce modèle est très efficace dans l'espace, c'est-à-dire que les relations de voisinage sont définies par un arrangement de stockage. Ce maillage peut donner une meilleure convergence et une résolution plus élevée.

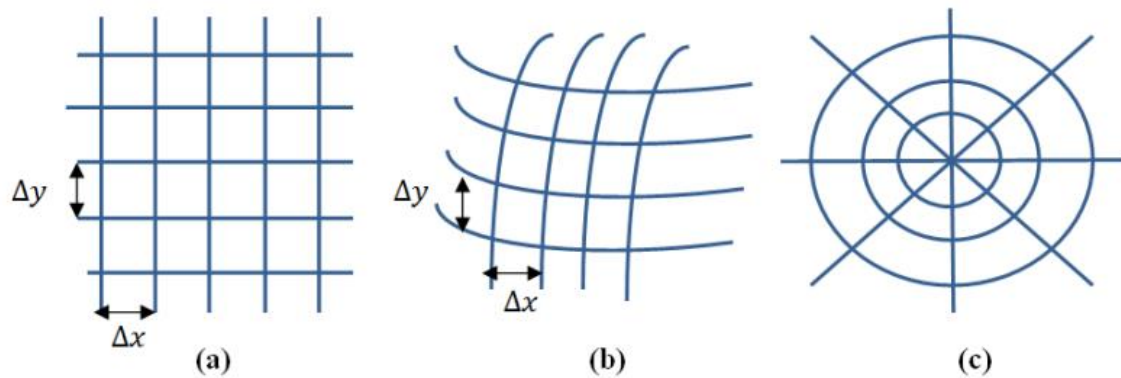


Figure [IV.14] Trois exemples de maillages structurés : (a) une grille cartésienne, (b) curviligne, (c) cylindrique.

Maillage non-structuré

Une grille non structurée est identifiée par une connectivité irrégulière. Il ne peut pas facilement être exprimé comme un tableau bidimensionnel ou tridimensionnel dans la mémoire de l'ordinateur. Cela permet d'utiliser n'importe quel élément qu'un solveur peut utiliser. Ces grilles utilisent généralement des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D.

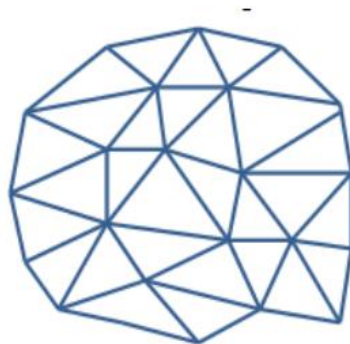


Figure [IV.15] Exemple du maillage non-structuré.

Maillage hybride

Une grille hybride contient un mélange de parties structurées et de parties non structurées. Les parties de la géométrie qui sont régulières peuvent avoir des grilles structurées et celles qui sont complexes peuvent avoir des grilles non structurées.

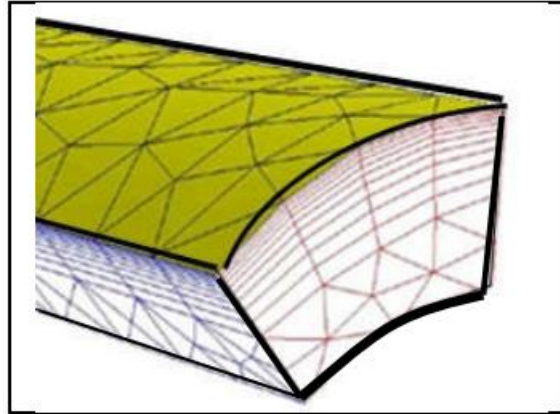


Figure [IV.16] Exemple de maillage hybride

***Chapitre V Modélisation
et simulation d'un
écoulement de fluide de
forage***

V Modélisation et simulation d'un écoulement de fluide de forage

Introduction

Nous effectuons dans cette étude la modélisation et le comportement rhéologique du fluide de forage utilisé afin de pouvoir prédire son comportement à des différents taux de cisaillement sous la variation de la température.

En utilisant le code Fluent ANSYS afin de simuler notre écoulement dans l'espace annulaire dans le cas concentrique et excentrique pour étudier l'effet des différents paramètres (vitesse d'entrée de fluide, vitesse de rotation de la tige RPM, température de fluide) sur les pertes de pression et les profils de vitesse.

V.1 Modélisation des paramètres rhéologique du fluide à différentes températures

V.1.1 Résultat de la caractérisation

Nous présentons ci-dessous les rhéogrammes obtenues à partir des mesures rhéologiques :

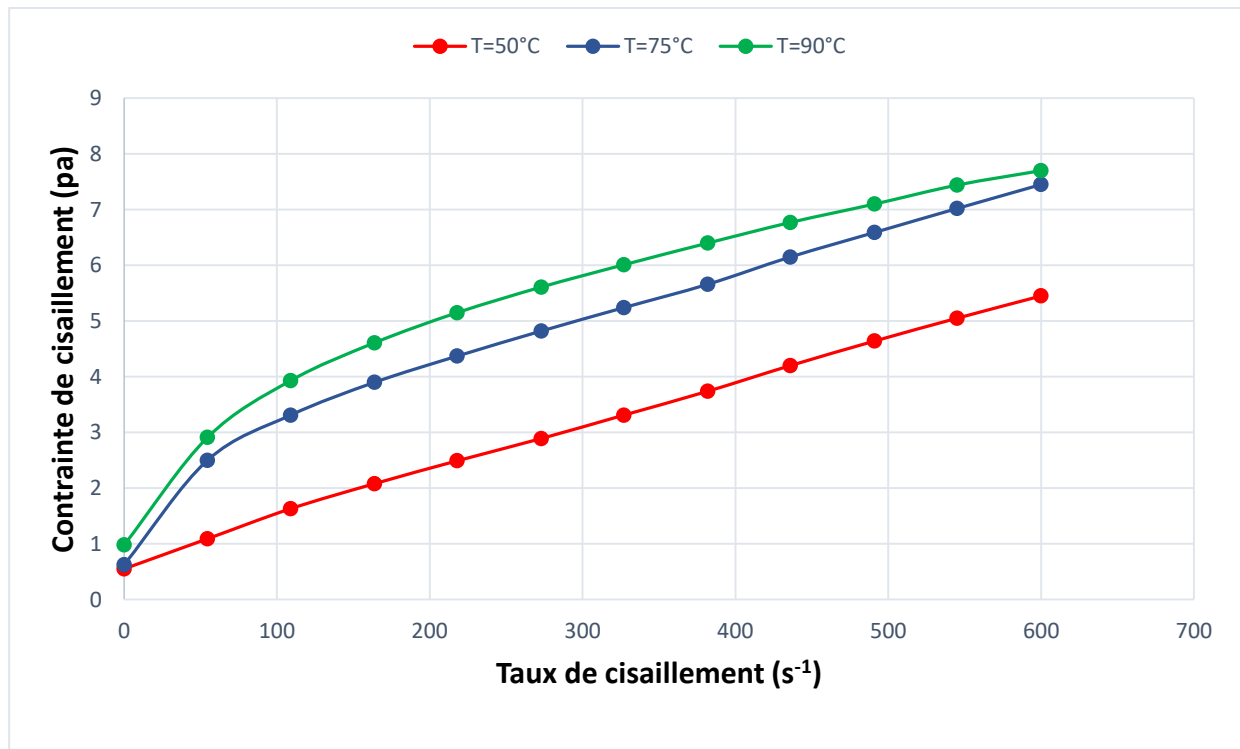


Figure [V.1] Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures

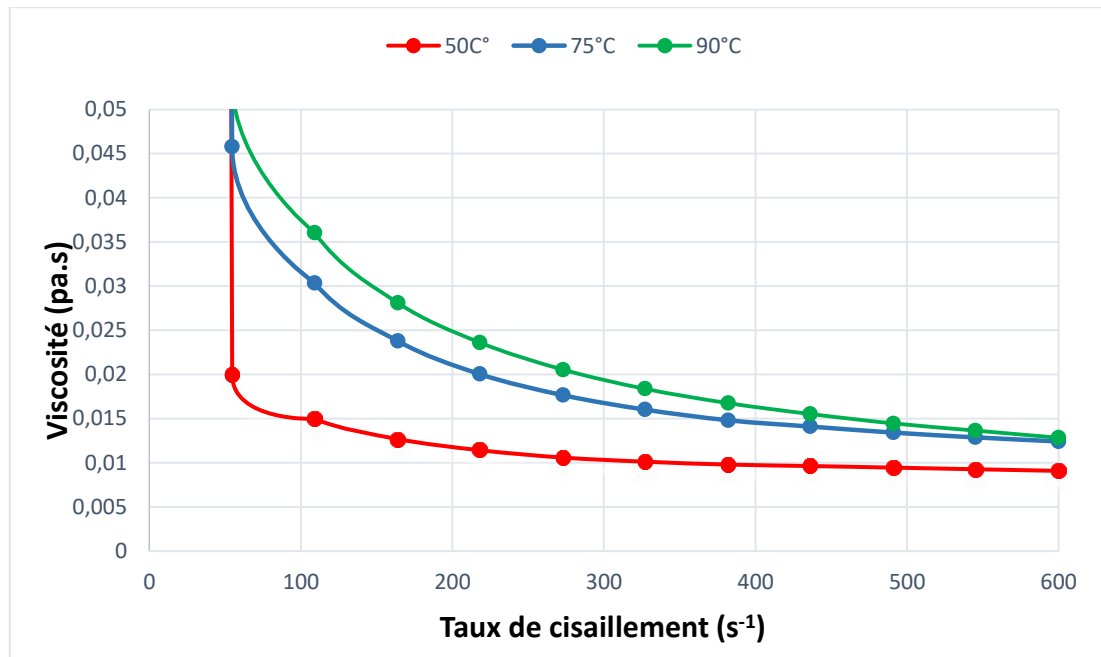


Figure [V.2] Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures

D'après les allures des courbes d'écoulement à différentes températures nous observons que les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au taux de cisaillement, ce qui implique que :

- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

Alors le fluide utilisé est un fluide non-newtonien.

V.1.2 Détermination des paramètres des modèles de Herschel-Bulkley et de Cross

V.1.2.1 Le modèle Herschel-Bulkely

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (V.1)$$

Pour $\tau > \tau_0$

τ_0 : La contrainte de seuil.

k : La consistance du fluide.

n : L'indice de rhéofluidification.

En utilisant la méthode de moindres carrés à partir de la fonction « Solver Excel » pour obtenir les paramètres de Herschel-Bulkley.

Tableau [V.1] Les paramètres rhéologiques de modèle Herschel-Bulkley à différentes températures

Température (°C)	τ_0	k	n	Convergence $(\sum residual)^2$
50	0,568341	0,013252	0,923537	0,010455404
75	0,64505	0,181909	0,562601	0,118014613
90	0,843444	0,32702	0,47662	0,027035373



Figure [V.3] Modélisation du comportement rhéologique de fluide à différentes températures à partir du modèle d'Herschel-Bulkley

V.1.2.2 Le modèle de Cross

$$\tau = \left[\tau_{\infty} + \frac{\tau_0 - \tau_{\infty}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^p} \right] \dot{\gamma} \quad (\text{V. 2})$$

λ et p : sont des constantes propres au fluide.

τ_0 : est la viscosité pour un taux de cisaillement nul.

τ_{∞} : est l'asymptote viscosité pour un taux de cisaillement très élevé.

En utilisant la méthode de moindres carrés à partir de la fonction « solver Excel » pour obtenir les paramètres de Cross.

Tableau [V.2] Les paramètres rhéologiques de modèle de Cross à différentes températures

Température (°C)	τ_{∞}	τ_0	λ	p	Convergence $(\sum residual)^2$
50	0,007766	340,0362	749,0819	0,955305252	0,009416
75	0,00632	252,9715	1029,063	0,798056313	0,022485
90	0,00492	481,2655	1710,625	0,793678891	0,214016

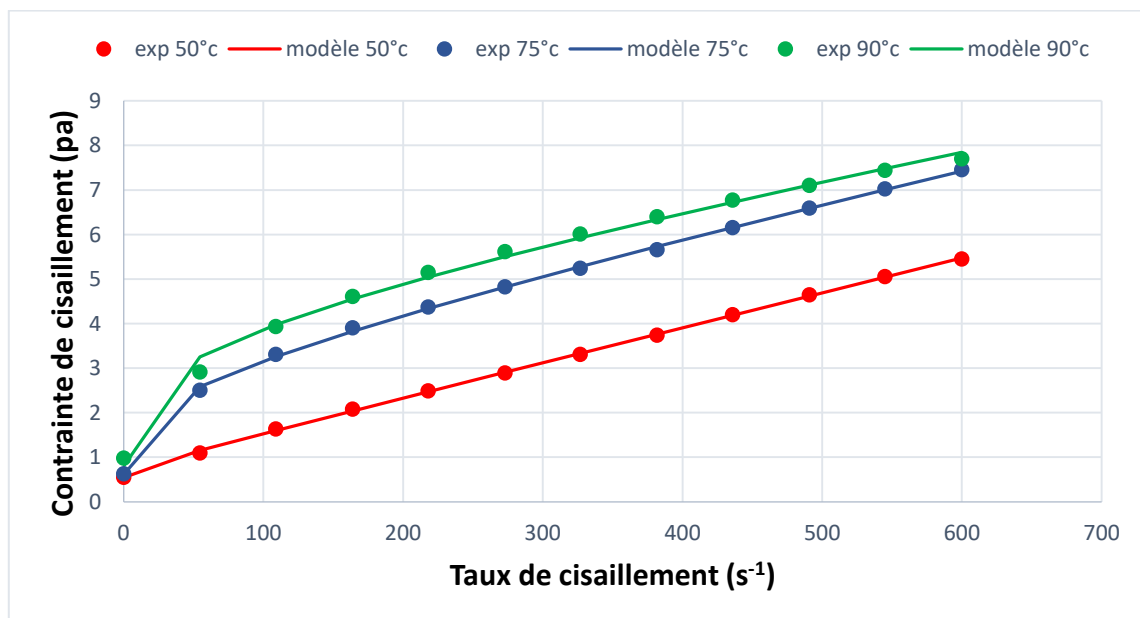


Figure [V.4] Modélisation du comportement rhéologique de fluide à différentes températures à partir du modèle de Cross

V.1.3 Comparaison entre le modèle d'Herschel-Bulkely et le modèle de Cross

Les deux modèles d'Herschel-Bulkely et de Cross sont modéliser bien le comportement rhéologique de fluide avec une bonne précision (10^{-2}), nous observons que dans le cas d'une haute température (90°C) le modèle d'Herschel-Bulkely est le plus précise et pour les cas des températures moyenne (50°C , 75°C) le modèle de Cross est le meilleur que nous pouvons choisir.

V.2 Simulation de l'écoulement du fluide de forage

V.2.1 Validation du travail

Pour commencer à travailler, l'étape de la validation est basée sur l'étude (Evaluation of Annular Pressure Losses while Casing Drilling 2014) qui a été réalisée par Vahid Dokhani, Mojtaba P. Shahri, SPE, University of Tulsa, Moji Karimi, SPE, Weatherford, Saeed Salehi, SPE, University of Louisiana at Lafayette.

V.2.1.1 Abstract sur l'étude adaptée pour la validation

Les pertes de pression annulaires ont fait l'objet d'une attention considérable dans les analyses théoriques, l'évaluation en laboratoire et les analyses de puits réelles. Des mesures. Combinaisons de mouvement du tubage, d'excentricités annulaires, de rugosité de paroi et de températures de fluide sur la longueur de l'espace annulaire affectent les régimes d'écoulement des fluides qui contrôlent les pertes de pression annulaires. Les solutions analytiques actuelles ont limité applicabilité pour des conditions complexes avec rotation et excentricité de la tige.

Dans cette étude, les pertes de pression pendant le forage sont étudiées à l'aide de la dynamique des fluides computationnelle. Les résultats sont comparés à la solution analytique disponible et aux données de terrain. L'effet de la rotation et de l'excentricité de la tige sur la perte de charge due au frottement est également étudié.

V.2.1.2 Simulation par fluent

Depuis quelques années, l'accroissement de la puissance des ordinateurs et le développement des méthodes numériques ont permis de conduire des calculs tridimensionnels de l'écoulement dans plusieurs configurations, tout en tenant compte de l'effet de la viscosité et de la turbulence. Ce progrès a fait de la modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) un outil de plus en plus important pour le développement et l'optimisation du dimensionnement de différents procédés industriels.

Les calculs sont effectués à l'aide du code FLUENT CFD qui est basé essentiellement sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations du mouvement.

V.2.1.3 Géométrie

La géométrie utilisée pour la validation est présentée sur le tableau ci-dessous :

Tableau [V.3] Les dimensions utilisées pour la géométrie de la validation

Diamètre intérieur (m)	Diamètre extérieur (m)	Radius ratio K (d_i/d_o)	La surface de section S (m ²)	La longueur H (m)
0.3556	0.4445	0.8	0.05	10

V.2.1.4 Propriétés des fluides

Les paramètres de fluide utilisé pour l'étape de la validation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau [V.4] La propriété de fluide utilisé dans la validation

Paramètres	Value
Average Velocity, (m/s)	0.1
Density, (kg/m ³)	998.2
Viscosity Model	Herschel-Bulkley
Yield Stress, (Pa)	1.5327
Consistency Index, (kg/m-s)	0.3745
Fluid Behavior Index, m	0.5989

V.2.1.5 Maillage

Le choix du maillage est une étape essentielle qui influe sur la précision et l'exactitude des résultats numériques. Donc, un maillage répondant aux objectifs, contient un nombre de mailles, une distance entre les mailles et une forme de maille, convenables.

Pratiquement, il n'existe pas des règles précises pour la création d'un maillage convenable, cependant il existe des différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable, comme :

- Le maintien d'une bonne qualité des éléments.
- L'assurance d'une bonne résolution dans les régions à fort gradient.

- L'assurance d'un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et celles à maillage grossier.
- La minimisation du nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable).

V.2.1.6 Test de maillage

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr que la solution influe la réalité.

Pour assurer un bon maillage il est nécessaire d'effectuer un test de maillage dans plusieurs cas, chacun à un nombre des éléments et des nœuds différents à l'autre, lorsque la vitesse maximale et la perte de pression arrivent à stabiliser, ça sera le bon choix pour adapter le cas de maillage.

Chaque cas de maillage est représenté dans les figures suivantes :

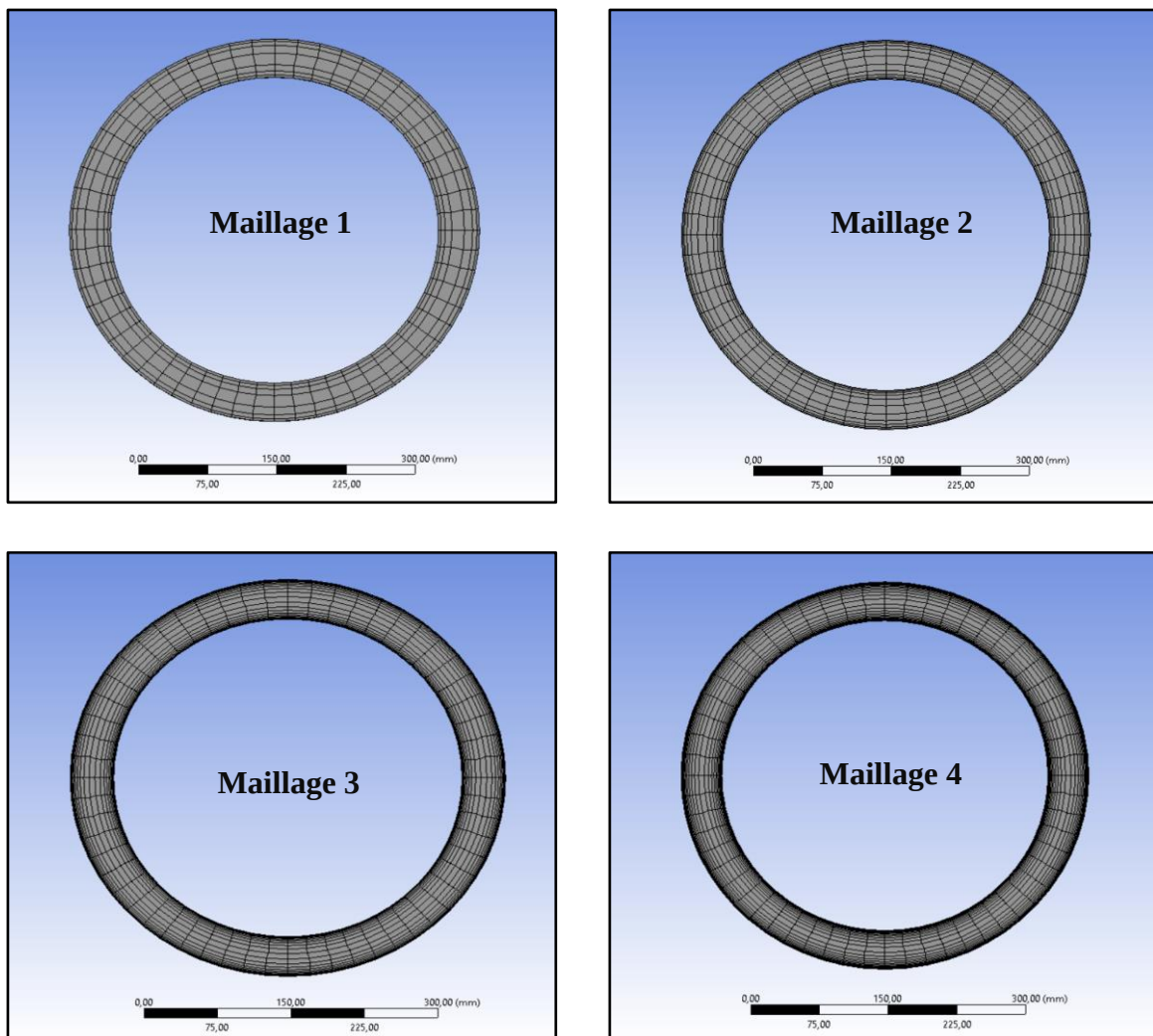
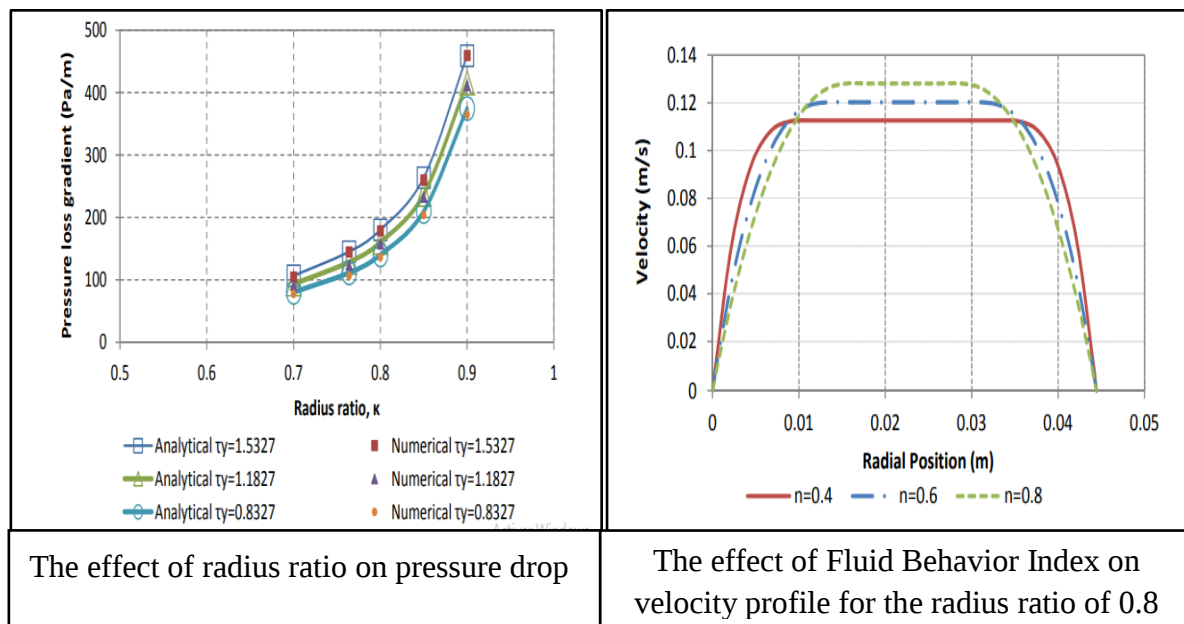


Figure [V.5] Les différents maillages du test

Tableau [V.5] Les résultats de test de maillage

Maillage	1	2	3	4
Eléments	6090	11484	25578	37758
Nœuds	7424	13224	28072	40832
Vmax (m/s)	0.12162	0.12339	0.12210	0.12212
Perte de pression (Pa/m)	167.04	172.15	177.29	177.11
Précision	10-9	10-9	10-9	10-9
Itération	1980	1220	1830	3880
Temps de calcul	15 min	20 min	45 min	3h

Les résultats trouvés sont les mêmes que nous avons trouvé dans l'étude de la validation (représenté dans les figure suivant), donc l'étape de validation est approuvée.

**Figure [V.6]** Les résultats déjà trouvés dans l'étude de validation

À partir des résultats trouvés, le bon maillage est le 3ième cas parce qu'il est bien précis et prend le moindre temps de calcul.

V.2.2 Les résultats de simulation

V.2.2.1 Le premier cas (la tige est concentrique)

Dans ce premier cas la conduite concentrique et la même de l'étape de validation.

Géométrie et distribution de maillage

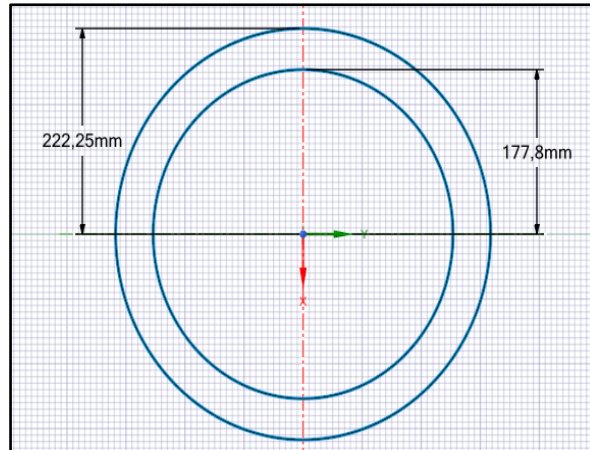


Figure [V.7] Vue de dessus de La géométrie concentrique

Tableau [V.6] Le maillage utilisé pour le cas concentrique

	Eléments	Nœuds
Maillage	25578	28072

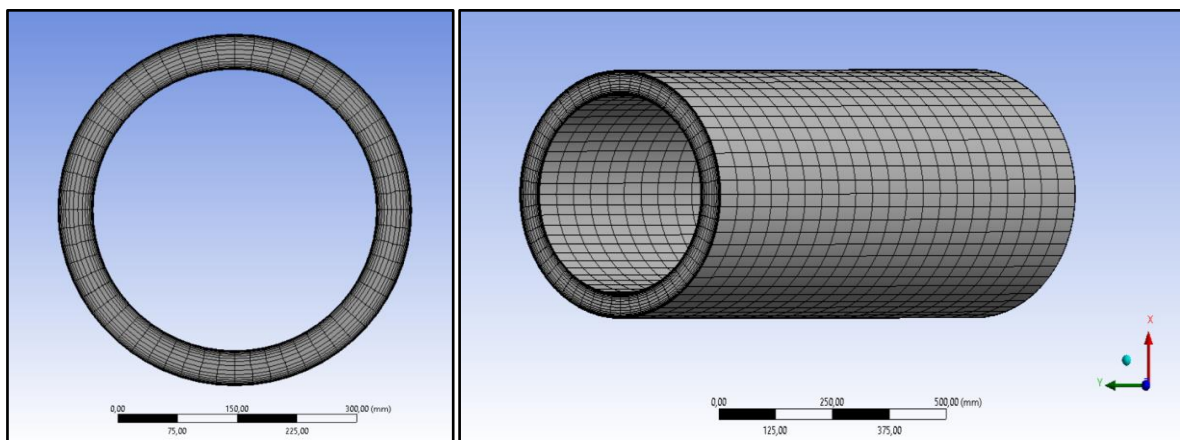


Figure [V.8] Distribution de maillage sur la géométrie concentrique

V.2.2.1.1 Effet de la vitesse d'entrée de fluide de forage

Pour étudier cet effet il suffit de fixer le RPM et changer à chaque fois la vitesse d'entrer de l'écoulement de fluide de forage.

Tableau [V.7] Les différentes vitesses d'entrées de fluide de forage

	V₁	V₂	V₃	V₄
RPM=0	0.3	0.6	1	1.4

Ces vitesses sont correspondantes aux débits des pompes de forage varie entre 900 et 4200 l/min.

Les propriétés de fluide**Tableau [V.8]** Les propriétés du fluide de forage

Les paramètres	La valeur
La densité (kg/m ³)	998
La contrainte de seuil	0,568341
La consistance du fluide	0,013252
L'indice de rhéofluidification	0,923537

Les conditions aux limites**Tableau [V.9]** Conditions aux limites.

La zone	Paramètre	Valeur/état
Inlet	Type	Velocity inlet
	Vitesse (m/s)	0.3 – 0.6 – 1 – 1.4
Outlet	Type	Pressure outlet
	Pressure (pa)	0
Casing	Type	Wall
	Wall motion	Stationnaire
La tige de forage	Type	Wall
	Wall	Stationnaire

Contours des vitesses

Les contours de vitesses dans l'espace annulaire concentrique sont présentés dans plusieurs figures pour des vitesses d'entrées différents (0.3m/s, 0.6m/s, 1m/s, 1.4m/s). Les résultats illustrés dans ces figures reflètent des situations d'écoulement similaires aux informations sur l'effet du changement de la vitesse d'entrée.

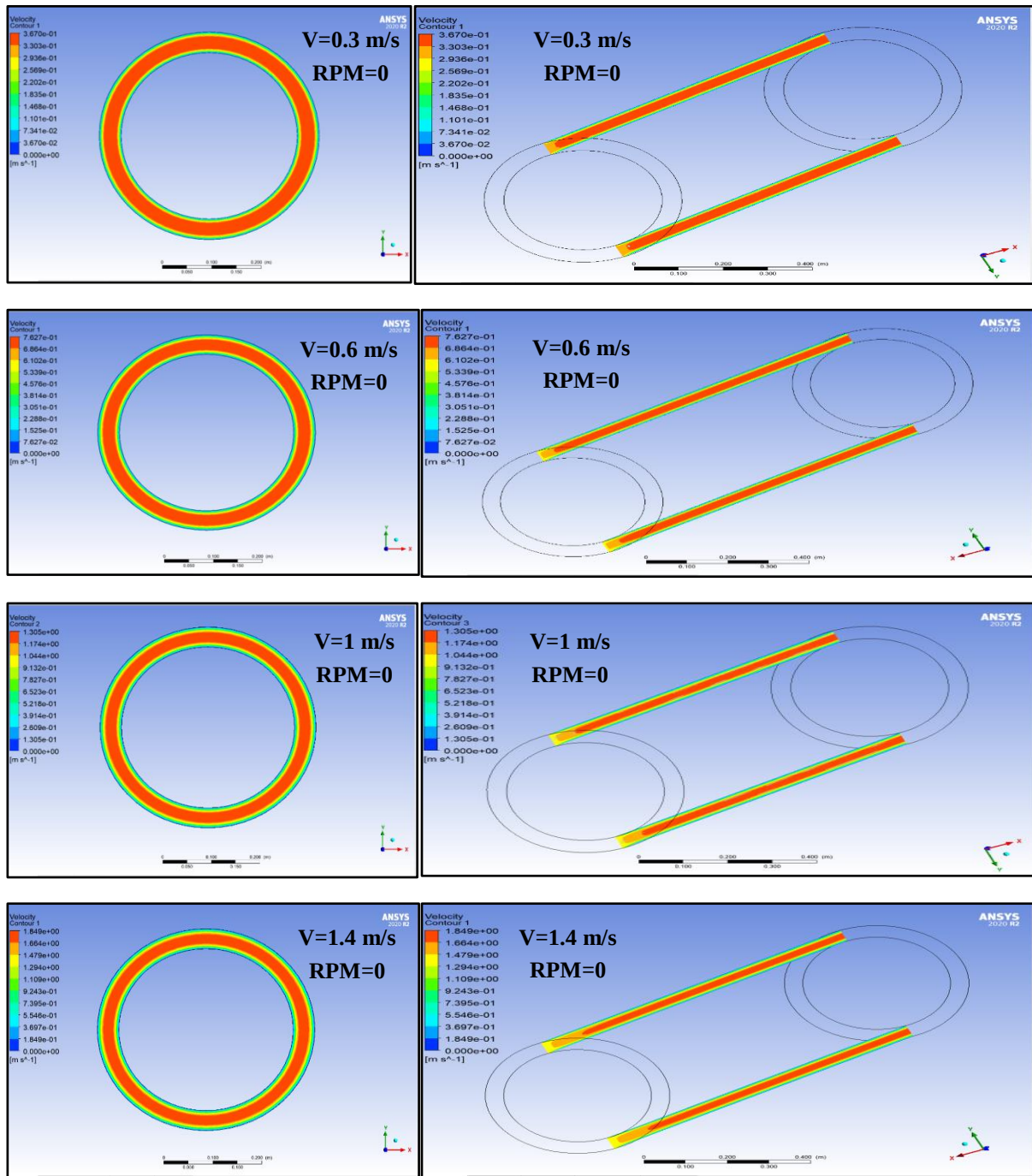


Figure [V.9] Profil de vitesses dans le cas concentrique (outlet et annulaire) pour $V_{\text{entrée}} = 0.3, 0.6, 1$ et 1.4 m/s avec $\text{RPM} = 0$

Les courbes de Profil de vitesse (outlet et annulaire)

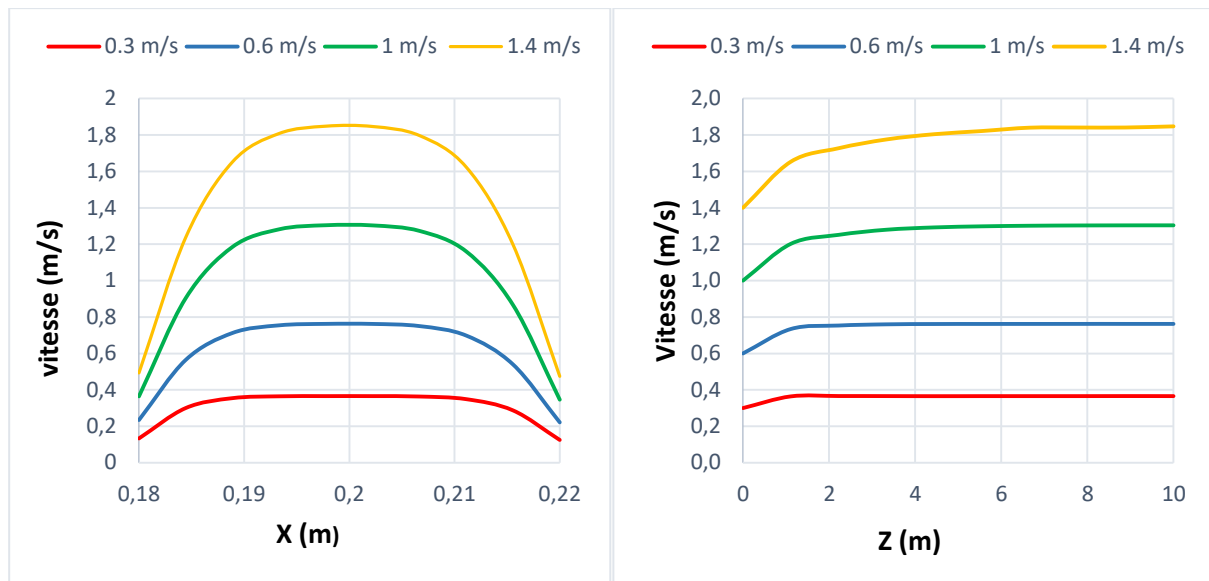


Figure [V.10] Profil de vitesse suivant l'axe X et Z pour des différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas concentrique

A partir des graphes obtenus par la simulation, nous observons que :

- La vitesse dans l'axe X (outlet) varie selon la vitesse d'entrée, à chaque fois que cette dernière augmente le courbe de vitesse perd son aplatisse.
- Lorsque la vitesse d'entrée est plus faible, le profil de vitesse n'est pas parabolique par contre dans le cas où la vitesse d'entrée est plus élevée (1.4m/s).
- La variation du profil de vitesse est brusque au voisinage des parois lorsque la vitesse d'entrée est élevée.
- À partir de la variation de la vitesse suivant de l'axe Z le profil de la vitesse se développe dans les 2 à 4m pour les faibles vitesses de (0.3 et 0.6 m), et dans les 4 à 6m pour les grandes vitesses d'entrée, donc la longueur de développement de vitesse est proportionnellement avec la vitesse d'entrée du fluide.

Les courbes de pertes de pression

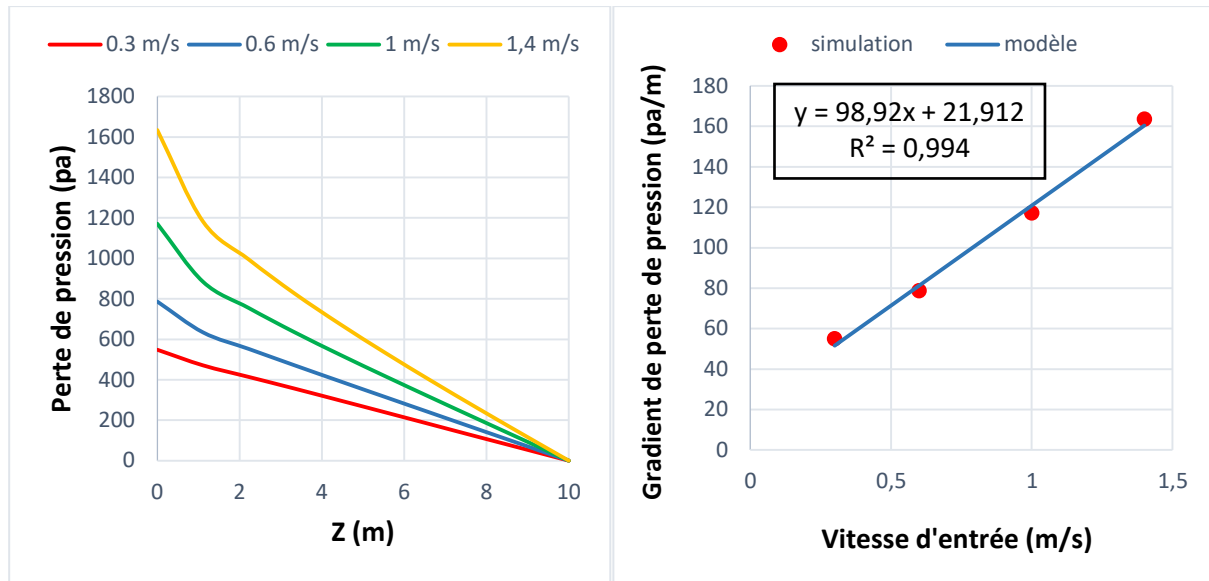


Figure [V.11] Perte de pression aux différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas concentrique

A partir des deux graphes ci-dessus :

- La perte de pression augmente proportionnellement avec la vitesse d'entrée du fluide.
- Sur l'axe Z le changement de la perte de pression devient linéaire et décroissant pour toutes les vitesses d'entrées à partir de 2m.
- Nous observons que l'effet de changement de la vitesse d'entrée influe uniquement sur la valeur des pertes de charge et conserver leur tendance de linéarité.
- La variation du gradient de pression est linéaire en fonction de la vitesse d'entrée selon la formule suivante :

$$\frac{\Delta P}{L} = 98.92 V_{\text{entrée}} + 21.912 \quad (\text{V.3})$$

V.2.2.1.2 Effet de la vitesse de rotation de la tige

Pour étudier cet effet, il suffit de fixer la vitesse d'entrée et changer à chaque fois le RPM de la tige de forage.

Tableau [V.10] Les différentes vitesses de rotation de la tige

	RPM ₁	RPM ₂	RPM ₃	RPM ₄
V=1	0	100	200	300

Les vitesses de rotation de tige choisie pour cette étude sont correspondance aux RPM utilisées dans le forage pétrolier

Les conditions aux limites

Avant de lancer la simulation, nous introduisons les conditions suivantes :

Tableau [V.11] Conditions aux limites cas concentrique pour différent RPM

La zone	Paramètre	Valeur/état
Inlet	Type	Velocity inlet
	Vitesse (m/s)	1
Outlet	Type	Pressure outlet
	Pressure (Pa)	0
Casing	Type	Wall
	Wall	Stationner
La tige de forage	Type	Wall
	Wall motion (tr/min)	0, 100, 200, 300

Contours des vitesses

Les contours de vitesses dans l'espace annulaire concentrique sont présentés dans plusieurs figures pour des RPM différents (0, 100, 200, 300 tr/min). Les résultats illustrés dans ces figures reflètent des situations d'écoulement similaires aux informations sur l'effet du changement de la RPM.

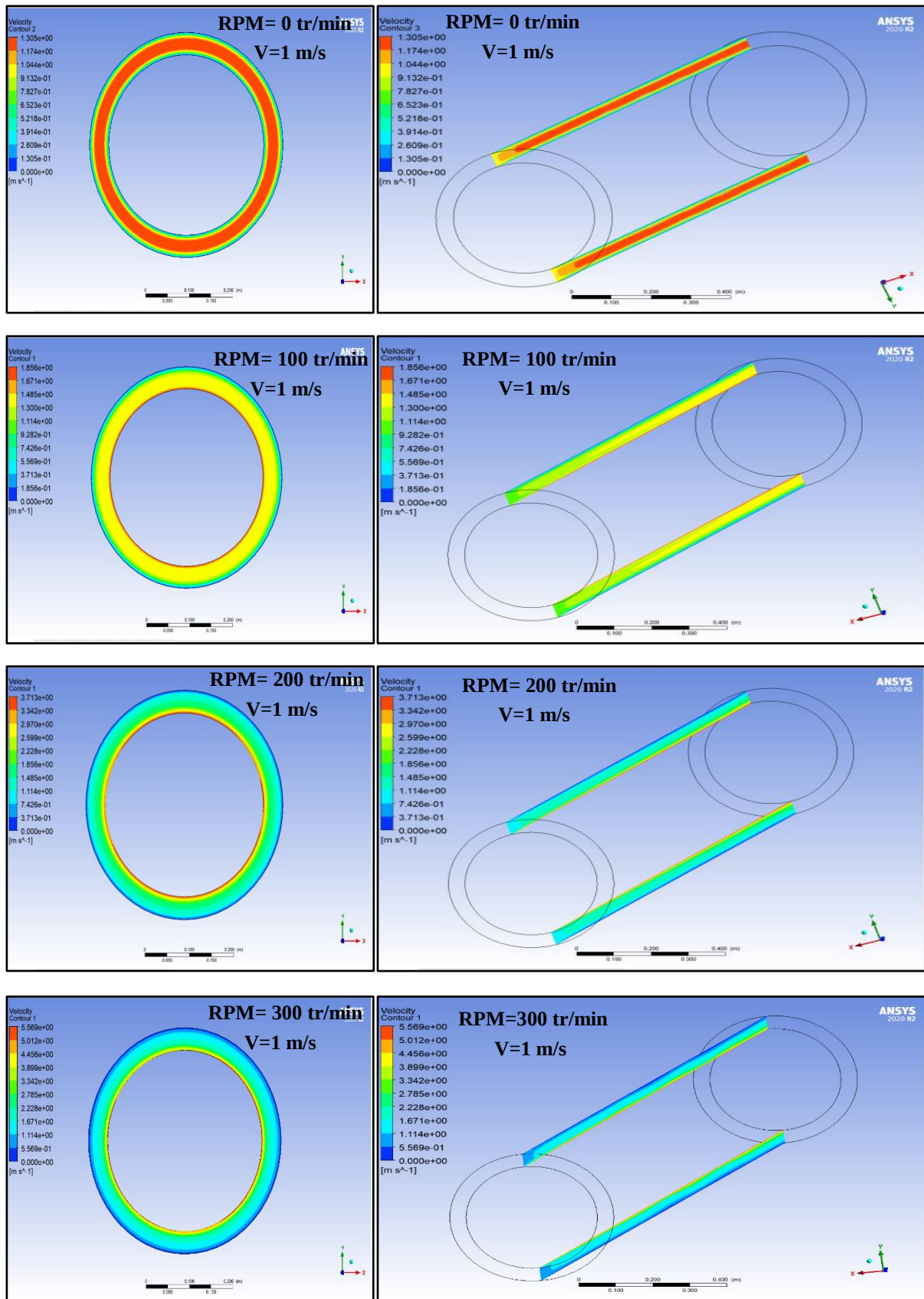


Figure [V.12] Profil de vitesses dans le cas concentrique (outlet et annulaire) pour RPM= 0, 100,200 et 300 tr/min avec $V_{\text{entrée}} = 1 \text{ m/s}$

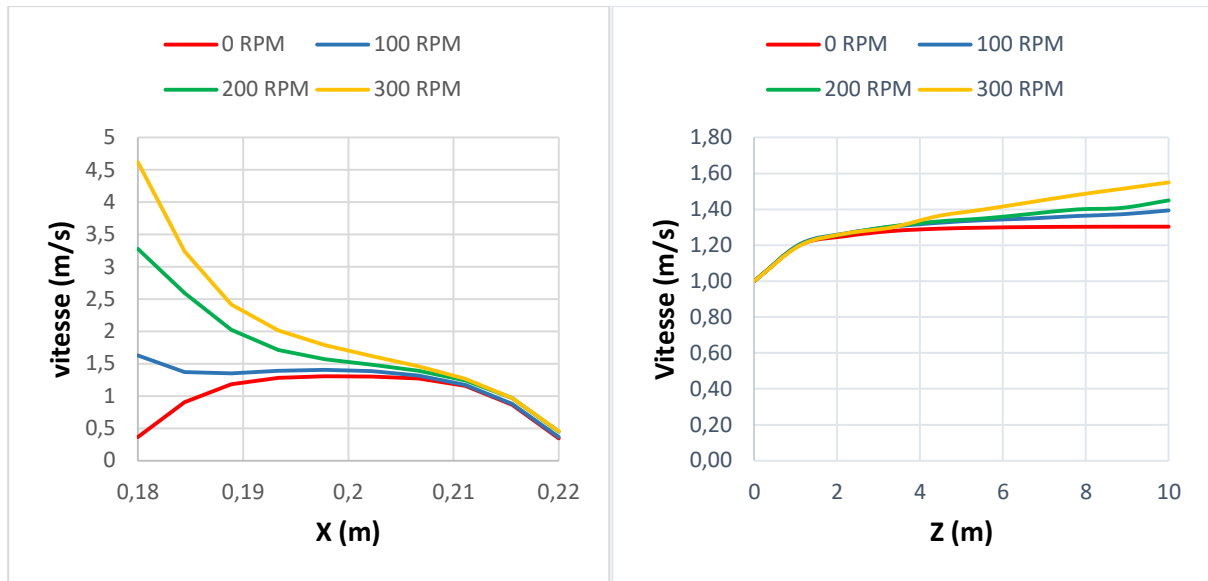
Profil de vitesse dans (outlet et annulaire)

Figure [V.13] Profil de vitesse suivant l'axe X et Z pour des différents RPM et $V_{\text{entrée}} = 0$ dans le cas concentrique

Nous observons dans le graphe de profile de vitesse suivant l'axe X :

- La vitesse au voisinage de la tige qui est en rotation est élevée.
- À cause de l'effet de la rotation, le profil de vitesse perd sa forme parabolique et la vitesse devienne décroissante de la paroi de garniture jusqu'au casing.
- La RPM n'influe pas sur la vitesse au voisinage du casing, cependant il a un effet important au voisinage de la tige (l'augmentation de RPM est proportionnelle avec la vitesse au voisinage de la tige).

À partir du graphe de développements de vitesse suivant l'axe Z nous observons que la vitesse de rotation de la tige influe sur la vitesse d'écoulement proportionnellement.

Les courbes de pertes de pression

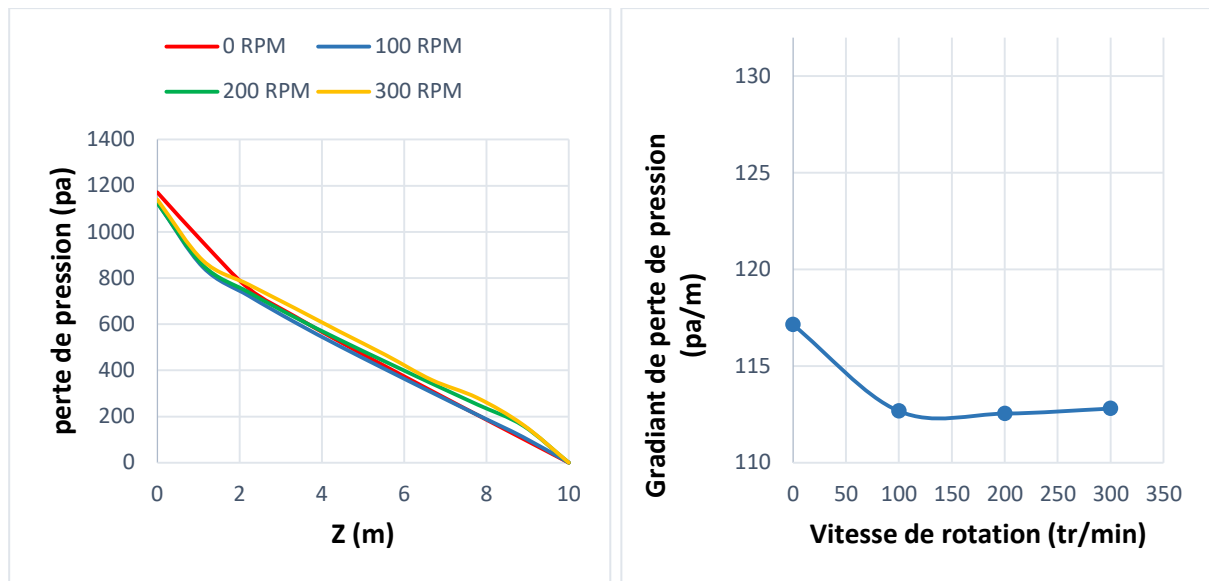


Figure [V.14] Perte de pression aux différentes RPM et $V_{\text{entrée}} = 1 \text{ m/s}$ dans le cas concentrique

D'après les graphes de perte de pression nous remarquons que la rotation de la tige diminue légèrement les pertes de pression mais contrairement le changement de la vitesse de rotation n'a pas une influence sur les pertes de pression.

V.2.2.1.3 Effet des paramètres rhéologiques de fluide de forage

Dans cette partie nous allons étudier l'influence des paramètres rhéologiques du fluide de forage sur le profil de vitesse et les pertes de pression.

Nous allons traiter cette partie selon le tableau suivant :

Tableau [V.12] Les cas étudiés pour l'effet de la température

	Vitesse d'entrée (m/s)	RPM (tr/min)
1 ^{iere} cas	1	0
2 ^{ieme} cas	1	100

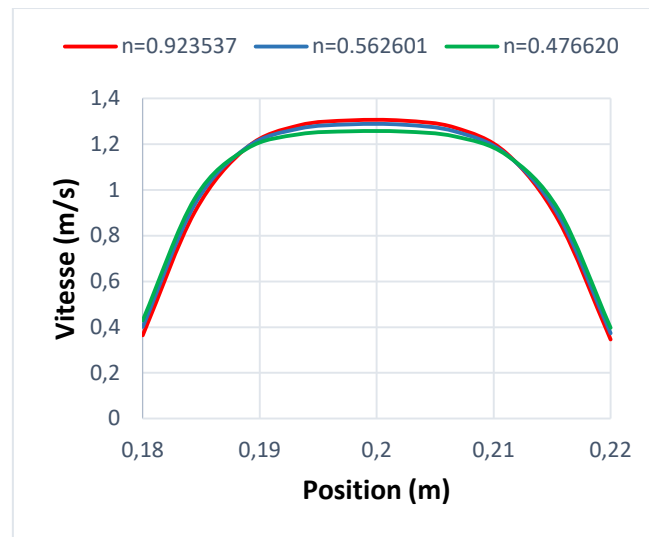
Effet du paramètre rhéologique « n » sur le profil de vitesse**Premier cas ($V=1\text{m/s}$, $\text{RPM}=0\text{tr/min}$) :**

Figure [V.15] Profil de vitesse pour ($v=1\text{ m/s}$ et $\text{RPM}=0\text{ tr/min}$) à différentes valeurs de « n » dans le cas concentrique

Selon la figure ci-dessus le changement de l'indice d'écoulement n n'a pas une influence remarquable sur le profil de vitesse, il s'agit d'un léger changement aux vitesses maximales.

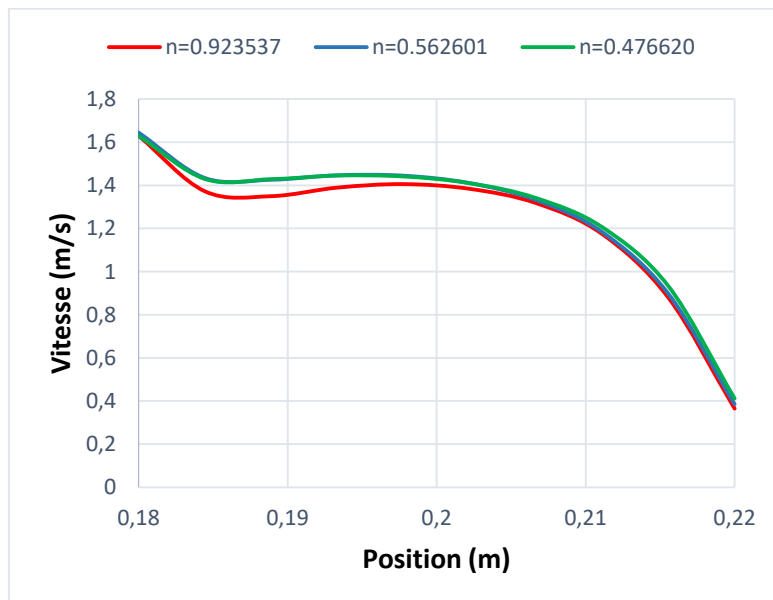
Deuxième cas ($V=1\text{m/s}$, $\text{RPM}=100\text{tr/min}$) :

Figure [V.16] Profil de vitesse pour ($v=1\text{ m/s}$ et $\text{RPM}=100\text{ tr/min}$) à différentes valeurs de « n » dans le cas concentrique

Selon Figure [V.16] le changement de la valeur de paramètre rhéologique « n » pendant la rotation de la tige n'a pas une influence remarquable sur le profil de vitesse.

Effet des paramètres rhéologiques sur les pertes de pression

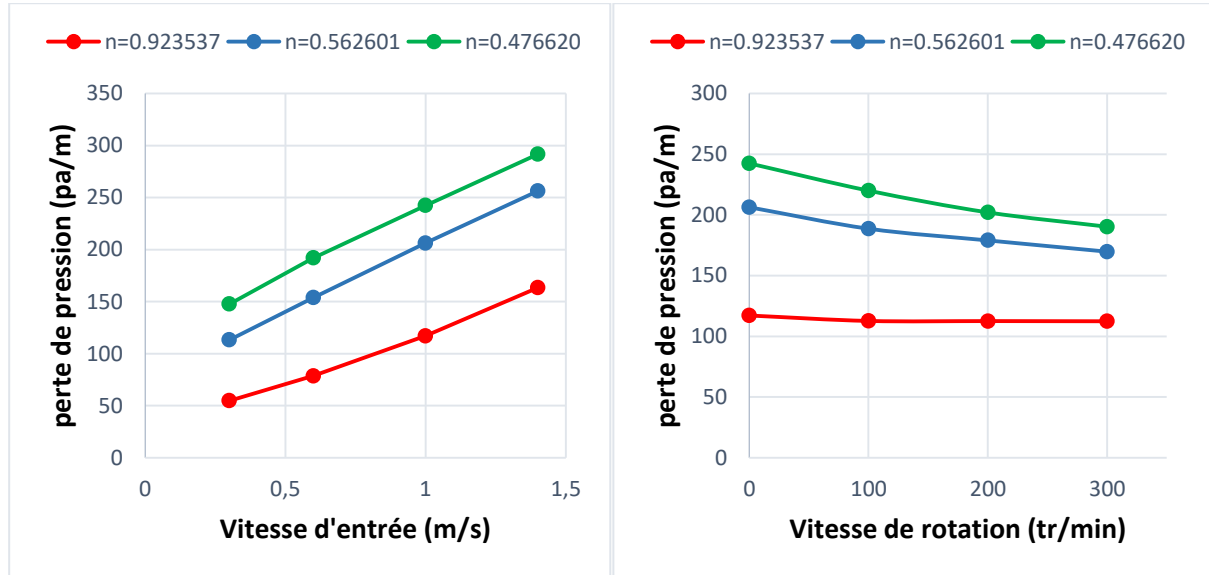


Figure [V.17] Changement de perte de pression en fonction de la vitesse d'entrée à (RPM=0) et la vitesse de rotation à ($V_{\text{entrée}}=1\text{m/s}$) dans le cas concentrique

Selon les graphes :

- Les paramètres rhéologiques ont une influence sur les pertes de pression si la « n » diminue les pertes de pressions augmentent.
- La variation de gradient de perte de pression à différents « n » est toujours linéaire en fonction de la vitesse d'entrée.
- La vitesse de rotation de la tige a une influence importante pour les petits indices d'écoulement « n ».

V.2.2.2 Le deuxième cas (la tige est excentrique)

Généralement la garniture de forage ne garde pas la position centrique dans le puits à cause de son poids élevé et ses vibrations pendant la rotation.

Alors dans ce cas nous allons étudier l'effet des différents paramètres de forge sur le profil de vitesse et les pertes de pression avec une tige excentrique dans le casing avec un coefficient d'excentricité $\varepsilon=50\%$.

La géométrie et le maillage

Pour faire la géométrie il faut d'abord trouver la distance entre les deux centres de la tige et de le casing à partir de la relation suivant selon le coefficient d'excentricité choisi :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{R_0 - R_i} \quad (\text{V. 4})$$

Avec :

ε : Coefficient d'excentricité de la tige.

δ : la distance entre les deux centres.

R_0 : le rayon du tubage.

R_i : le rayon de la tige.

D'après on a :

$$\delta = \varepsilon (R_0 - R_i) = 0.5 (0.222 - 0.177) = 0.022 \text{ m} \quad (\text{V. 5})$$

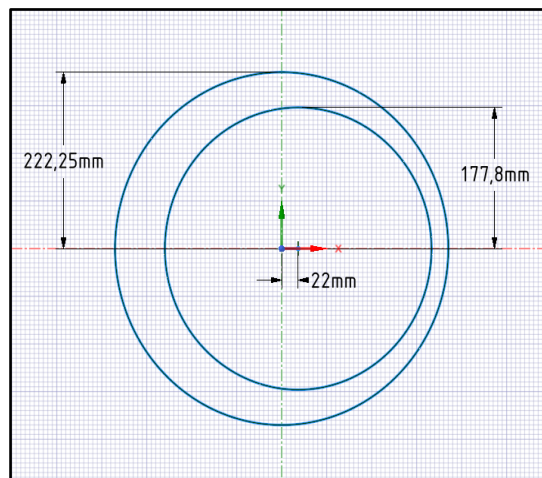


Figure [V.18] Vue de dessus de La géométrie excentrique

La distribution de maillage

Tableau [V.13] Le maillage utilisé pour le cas concentrique

	Eléments	Nœuds
Maillage	27000	29640

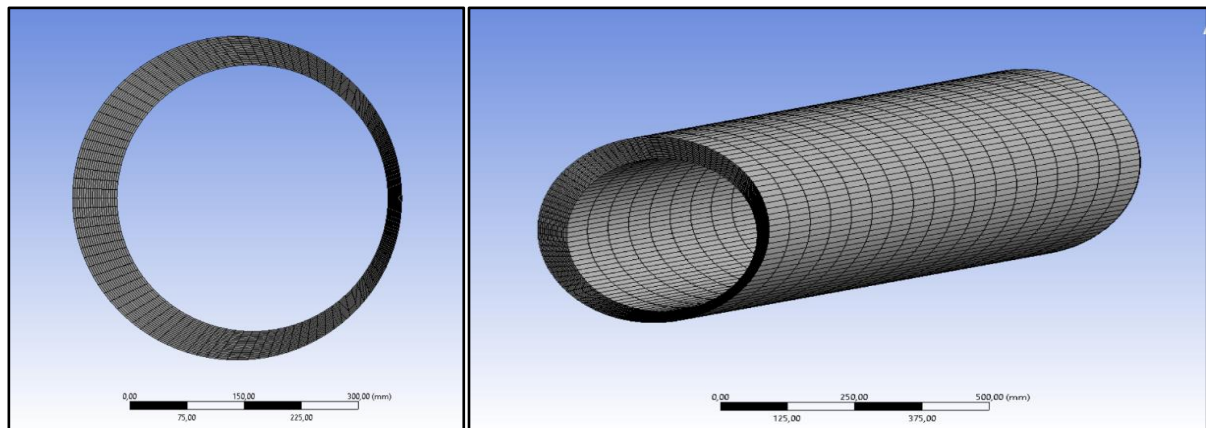


Figure [V.19] Distribution de maillage sur la géométrie excentrique

V.2.2.2.1 Effet de vitesse d'entrée de fluide de forage

Nous allons étudier ce cas avec les mêmes vitesses utiliser dans le cas concentrique.

Les propriétés de fluide

Les propriétés de fluide sont le même utiliser dans le cas concentrique.

Les conditions aux limites

Tableau [V.14] Condition aux limites cas excentrique pour différentes vitesses d'entrée

La zone	Paramètre	Valeur/état
Inlet	Type	Velocity inlet
	Vitesse (m/s)	0.3 – 0.6 – 1 – 1.4
Outlet	Type	Pressure outlet
	Pressure (Pa)	0
Casing	Type	Wall
	Wall motion	Stationnaire
La tige de forage	Type	Wall
	Wall	Stationnaire

Contours des vitesses

Les contours de vitesses dans l'espace annulaire excentrique sont présentés dans plusieurs figures pour des vitesses d'entrées différents (0.3m/s, 0.6m/s, 1m/s, 1.4m/s). Les résultats illustrés dans ces figures reflètent des situations d'écoulement similaires aux informations sur l'effet du changement de la vitesse d'entrée.

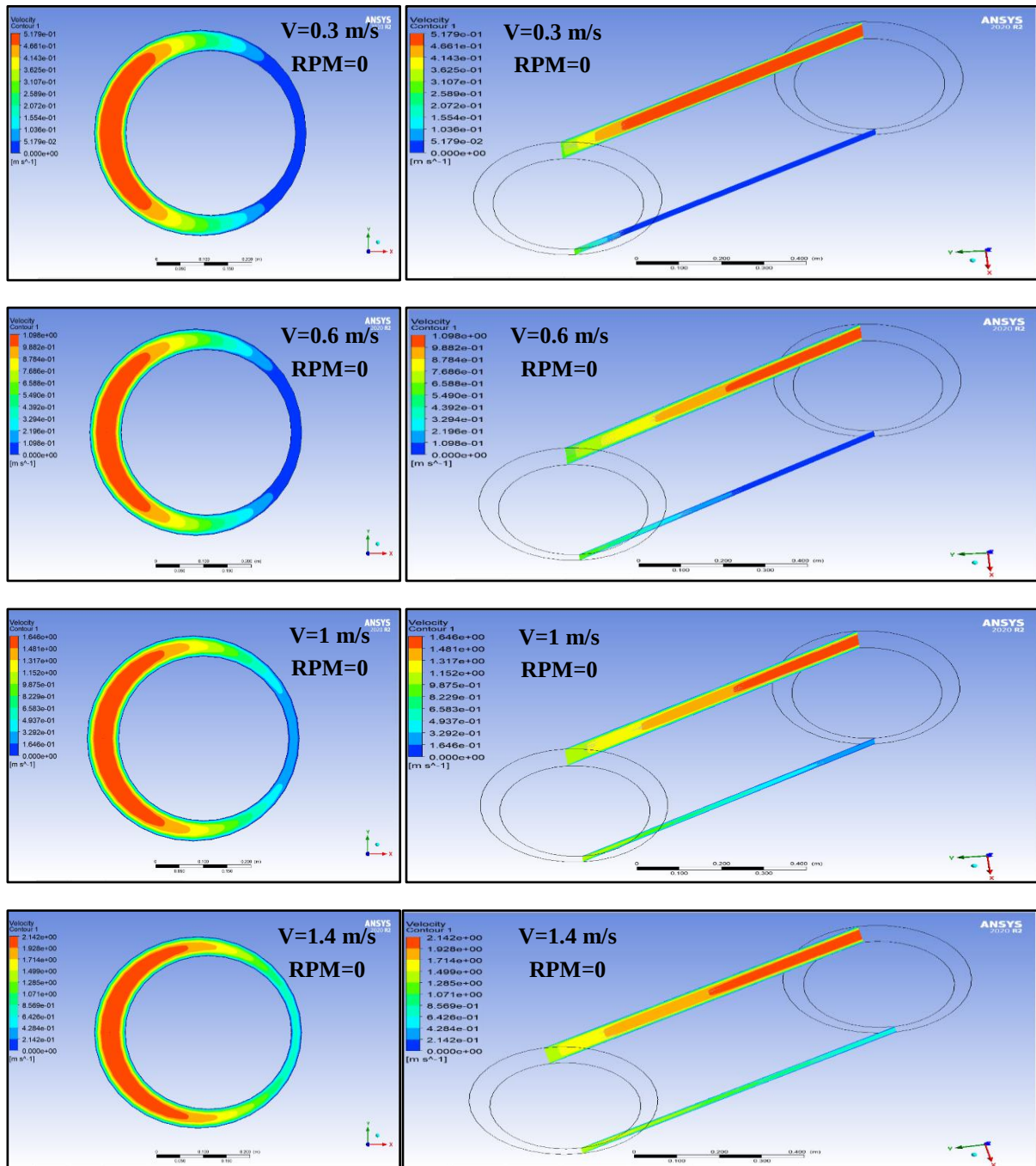


Figure [V.20] Profil de vitesse dans le cas excentrique (outlet et annulaire) pour $V_{entrée} = 0.3, 0.6, 1$ et 1.4 m/s avec $RPM = 0$ tr/min

Pour tracer les graphes de profil de vitesse dans cette étude, il faut bien préciser que dans le cas excentrique la distance entre la paroi de tige et de casing n'est pas les mêmes, nous prendrons deux axes sur la section outlet (Axe 1 et 2) et deux autres sur la section annulaire (Axe 3 et 4) comme il est présenté dans les figures suivantes :

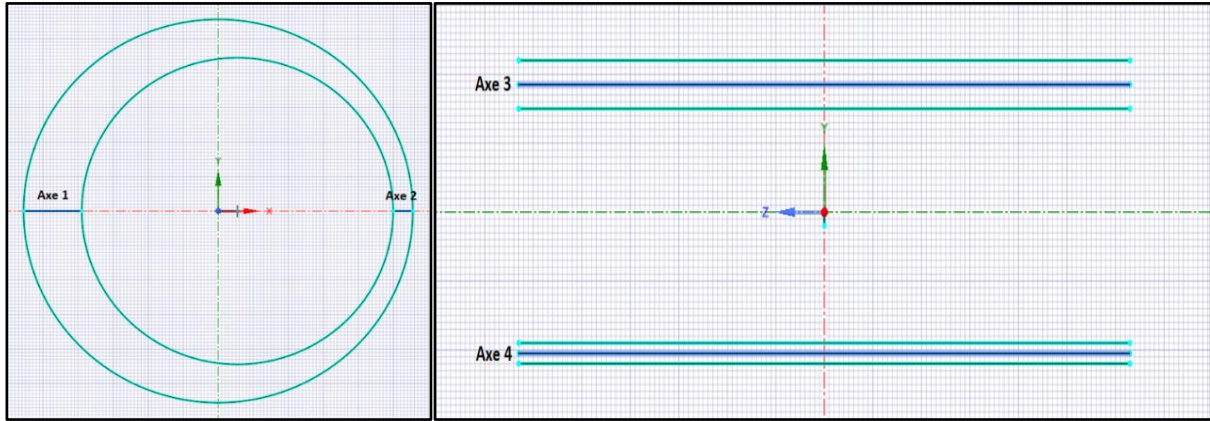


Figure [V.21] Les axes de présentation de la variation de vitesse sur la géométrie excentrique

Les courbes des profils de vitesse

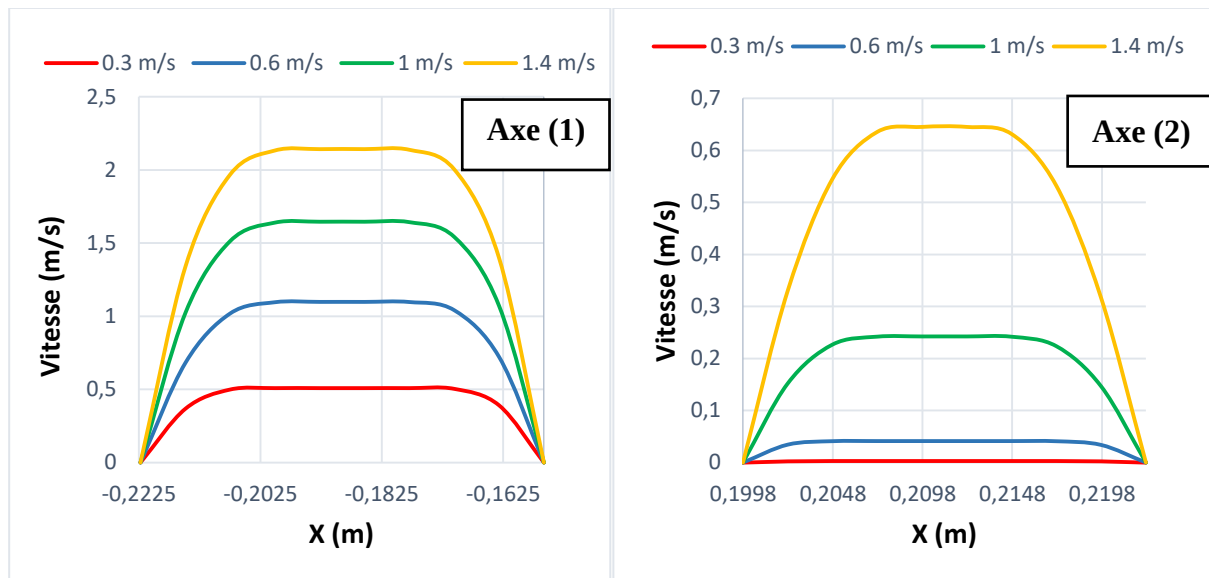


Figure [V.22] Profil de vitesse (outlet) pour des différentes vitesses d'entrées avec RPM=0 dans le cas excentrique

Nous observons que la vitesse est très faible dans l'espace petite par contre elle est élevée dans l'espace grand et la vitesse augment proportionnellement avec la vitesse d'entrée.

Les courbe de développement de vitesse

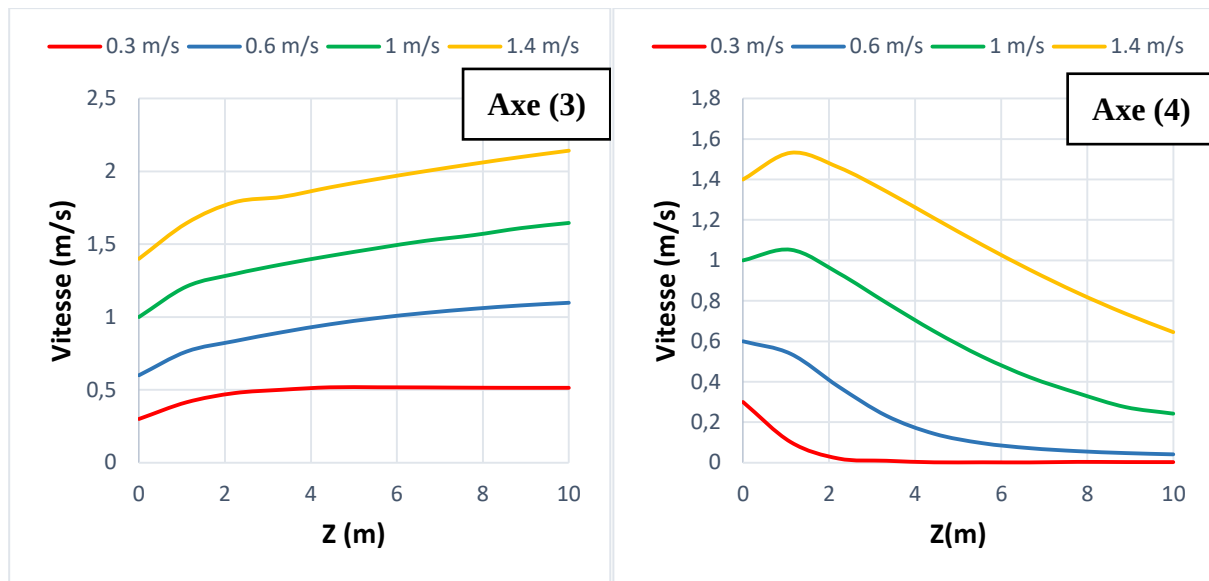


Figure [V.23] Développement de vitesse (annulaire) pour des différentes vitesses d'entrées avec $RPM=0$ dans le cas excentrique

Selon les graphes ci-dessus la vitesse développe sur l'axe 1 comme suivant :

- Pour la vitesse d'entrée la plus faible (0.3m/s) la vitesse de fluide de forage atteindre une phase de stabilisation.
- Pour les vitesses d'entée les plus grandes, la vitesse de fluide de forage continue de développer sans atteindre son développement total.

Sur l'axe 2 comme suite :

- Pour les vitesses d'entrée les plus faibles (0.3 et 0.6m/s), la vitesse d'écoulement de fluide diminue directement et tant vers le 0.
- Pour les vitesses d'entrée les plus grandes, la vitesse d'écoulement n'arrive pas à continuer dans le sens d'augmentation, elles chutent directement après d'atteindre une vitesse maximale.

Les courbes de pertes de pression

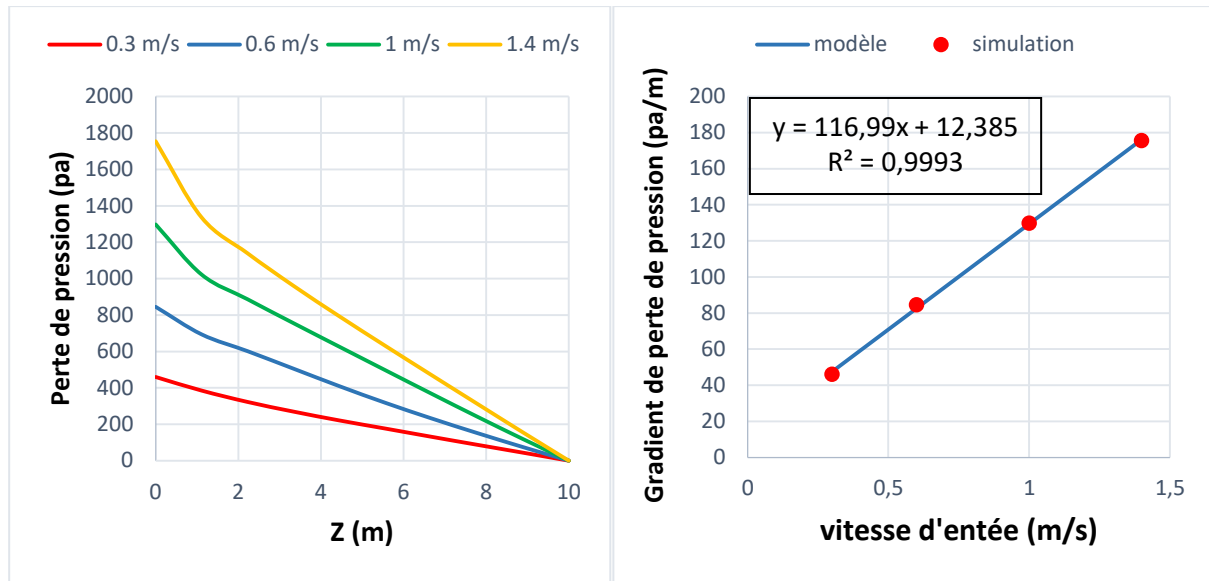


Figure [V.24] Perte de pression aux différentes vitesses d'entrées et RPM=0 dans le cas excentrique

A partir des deux ci-dessus :

- La perte de pression augmente proportionnellement avec la vitesse d'entrée de fluide.
- Sur l'axe Z le changement de la perte de pression devient linéaire et décroissant pour toutes les vitesses d'entrée à partir de 2m.
- Nous observons que l'effet de changement de la vitesse d'entrée influe uniquement sur la valeur des pertes de charge et conserve leur tendance de linéarité.
- La variation de gradient de pression est linéaire en fonction de la vitesse d'entrée selon la formule suivante :

$$\frac{\Delta p}{L} = 116.99 V_{entrée} + 12.385 \quad (V.6)$$

V.2.2.2.2 Effet de la vitesse de rotation de la tige

Les contours de vitesses dans l'espace annulaire concentrique sont présentés dans plusieurs figures pour des RPM différents (0, 100, 200, 300 tr/min) à une vitesse d'entrée =1m/s. Les résultats illustrés dans ces figures reflètent des situations d'écoulement similaires aux informations sur l'effet du changement de la RPM.

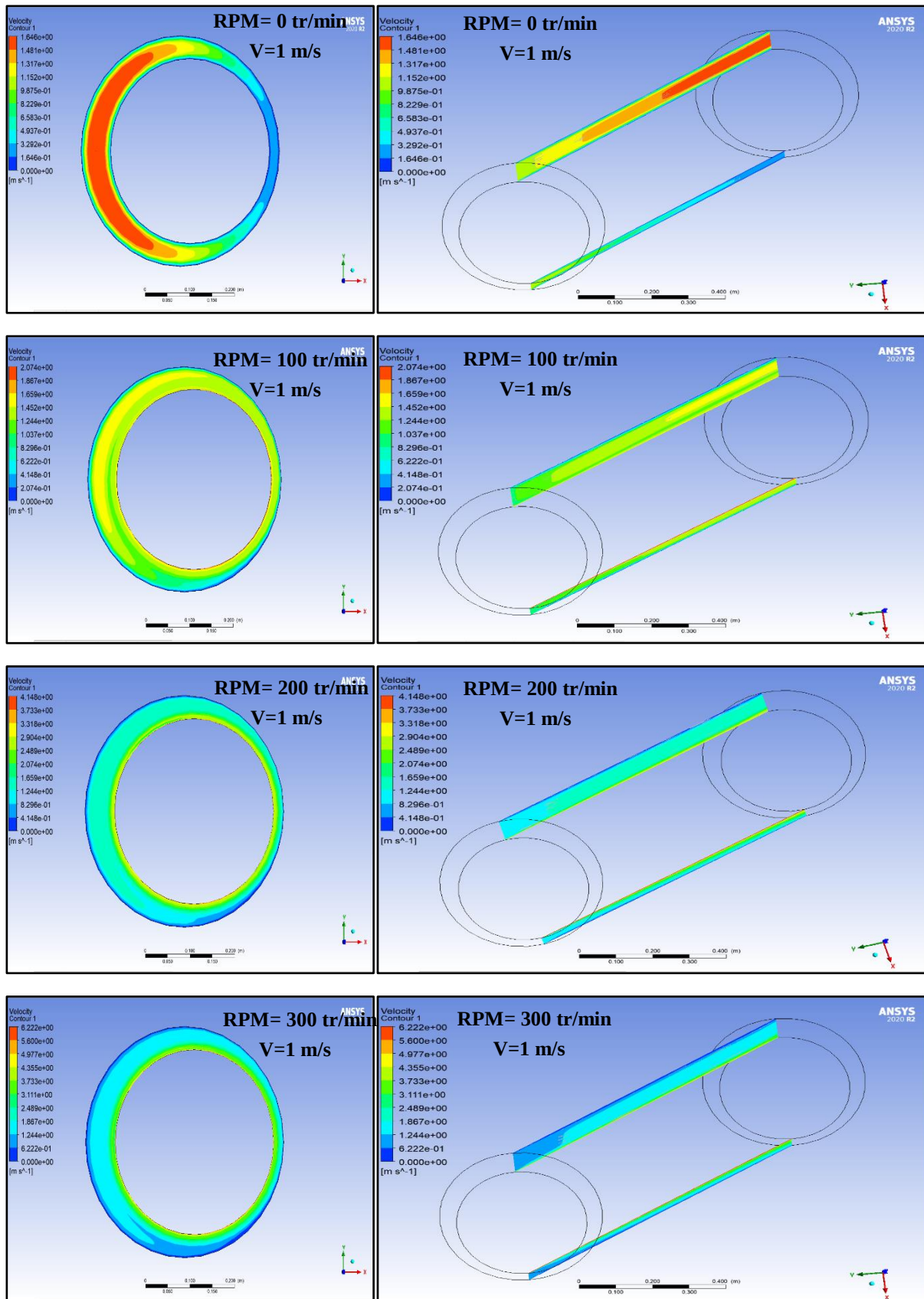


Figure [V.25] Profil de vitesses dans le cas excentrique (outlet et annulaire) pour RPM= 0, 100,200 et 300 tr/min avec $V_{\text{entrée}} = 1$ m/s

Les courbes des profils de vitesse

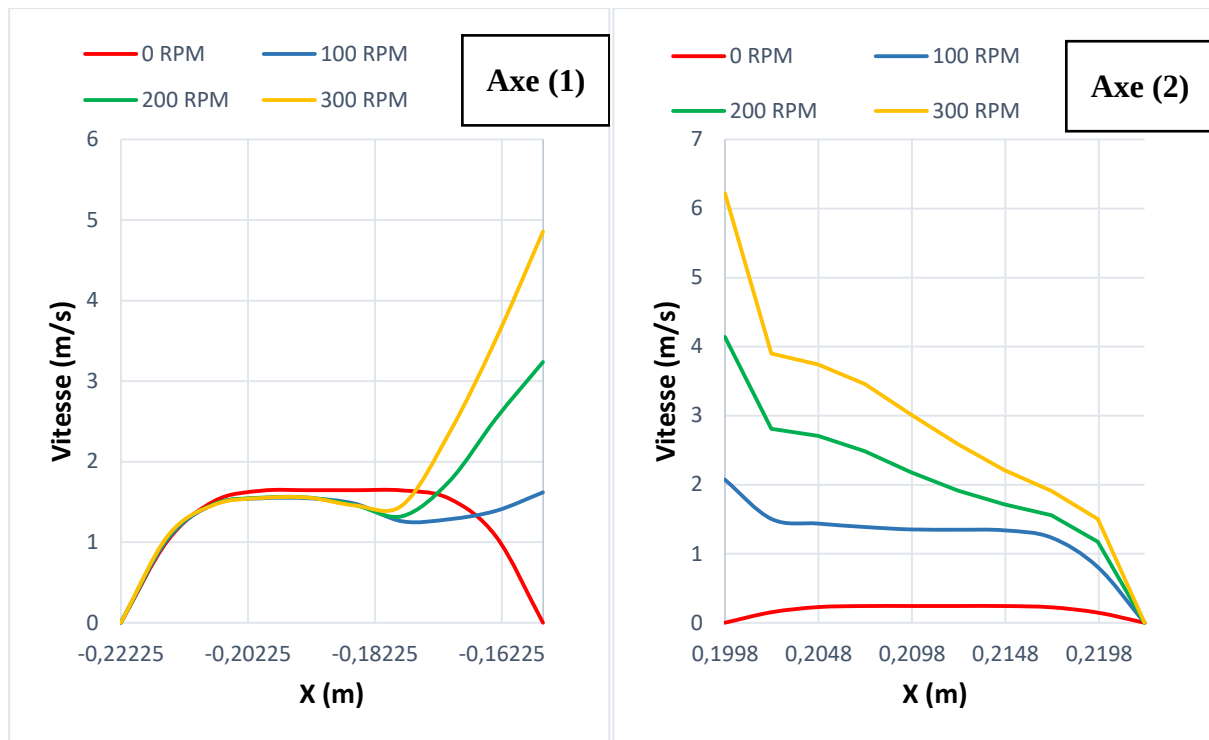


Figure [V.26] Profil de vitesse (outlet) pour des différentes RPM avec $V_{\text{entrée}} = 0$ dans le cas excentrique

Nous observons à partir les graphes ci-dessus que :

- La vitesse de rotation de la tige RPM augmente énormément la vitesse de fluide de forage au voisinage de la tige dans le petit espace (Axe 2) par rapport au grand espace (Axe1).
- Le RPM a une influence importante sur les petites espaces que les grandes espaces concernant la vitesse d'écoulement.
- À chaque fois le fluide s'éloigne de la tige la vitesse d'écoulement chute et tend vers 0 jusqu'à l'arriver à la paroi du casing.

Les courbes de développement de vitesse

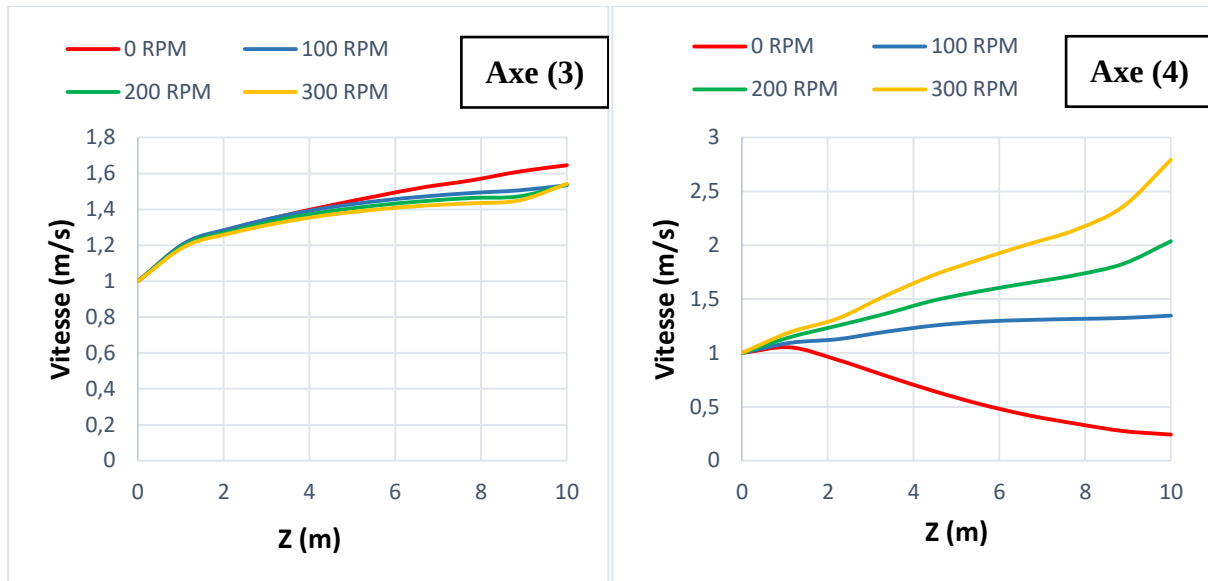


Figure [V.27] Développement de vitesse (annulaire) pour des différentes RPM avec $V_{\text{entrée}} = 0$ dans le cas excentrique

D'après les graphes au-dessus nous observons que :

- La vitesse de rotation influe uniquement sur la vitesse d'écoulement dans le petit espace Axe (4).
- La vitesse d'écoulement dans le petit espace Axe (4) augmente proportionnellement avec la vitesse de rotation de la tige par contre elle chute lorsque la vitesse de rotation est à égale 0.

Les pertes de pression

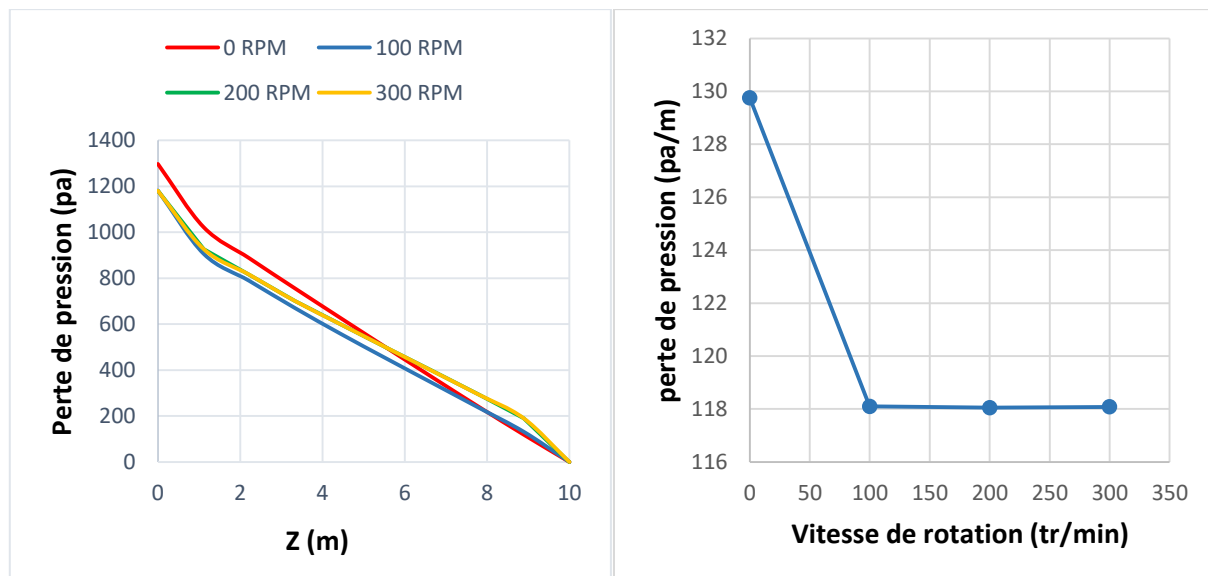


Figure [V.28] Perte de pression aux différentes RPM et $V_{\text{entrée}} = 1$ m/s dans le cas excentrique

D'après les graphes de perte de pression, nous remarquons que la rotation de la tige diminue la perte de pression mais contrairement le changement de la vitesse de rotation n'a pas une influence sur la perte de pression.

V.2.2.2.3 Effet des paramètres rhéologiques de fluide de forage

Dans cette partie nous allons étudier l'influence du paramètre rhéologique « n » du fluide de forage sur le profil de vitesse et les pertes de pression.

Effet des paramètres rhéologiques sur le profil de vitesse

Premier cas ($V=1\text{m/s}$, $\text{RPM}=0\text{tr/min}$) :

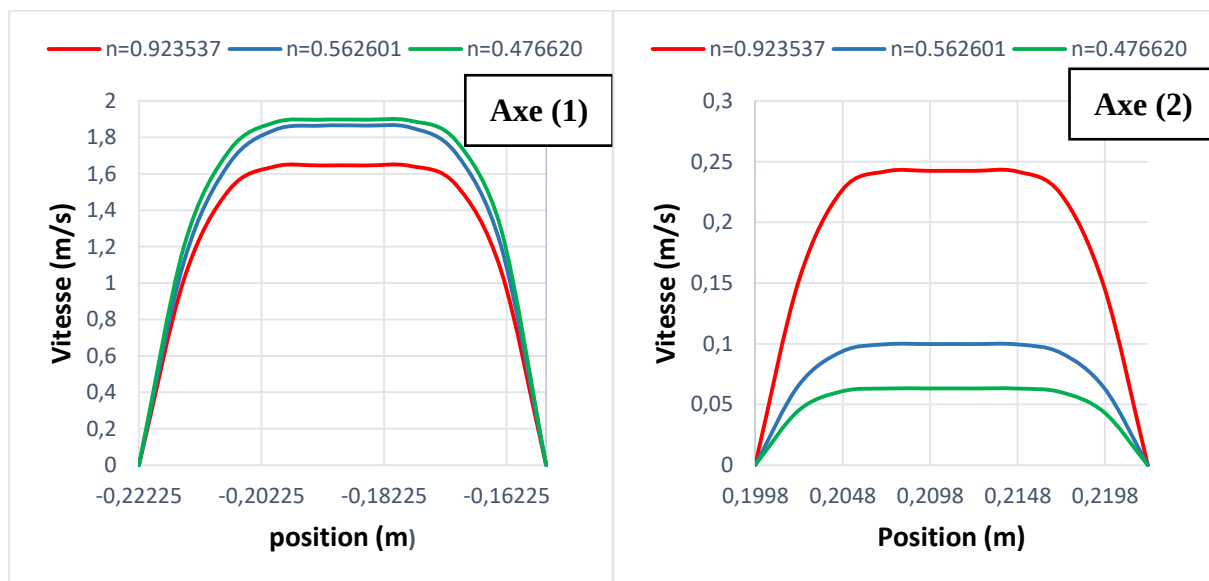


Figure [V.29] Profil de vitesse pour ($v=1\text{ m/s}$ et $\text{RPM}=0\text{ tr/min}$) à différentes « n » dans le cas excentrique

A partir des graphes ci-dessus nous observons que :

- Le changement de l'indice d'écoulement « n » influe sur le profil de vitesse dans le grand espace (Axe1) et le petit espace (Axe2).
- La variation de la vitesse est proportionnelle avec la variation de « n », inversement dans le grand espace, et proportionnelle avec « n » dans le petit espace.

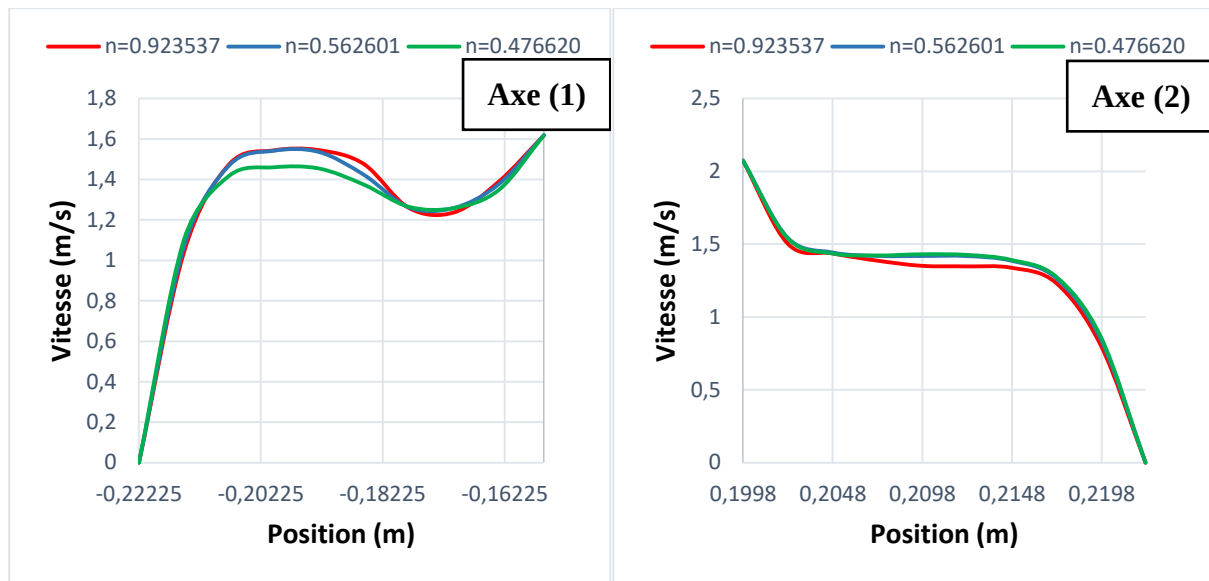
Deuxième cas ($V=1\text{m/s}$, $\text{RPM}=100\text{tr/min}$) :

Figure [V.30] Profil de vitesse pour ($v=1\text{ m/s}$ et $\text{RPM}=100\text{ tr/min}$) à différentes « n » dans le cas excentrique

Selon les graphes ci-dessus de la variation de l'indice d'écoulement « n » pendant la rotation de la tige n'a pas une influence remarquable sur le profil de vitesse pour les deux axes.

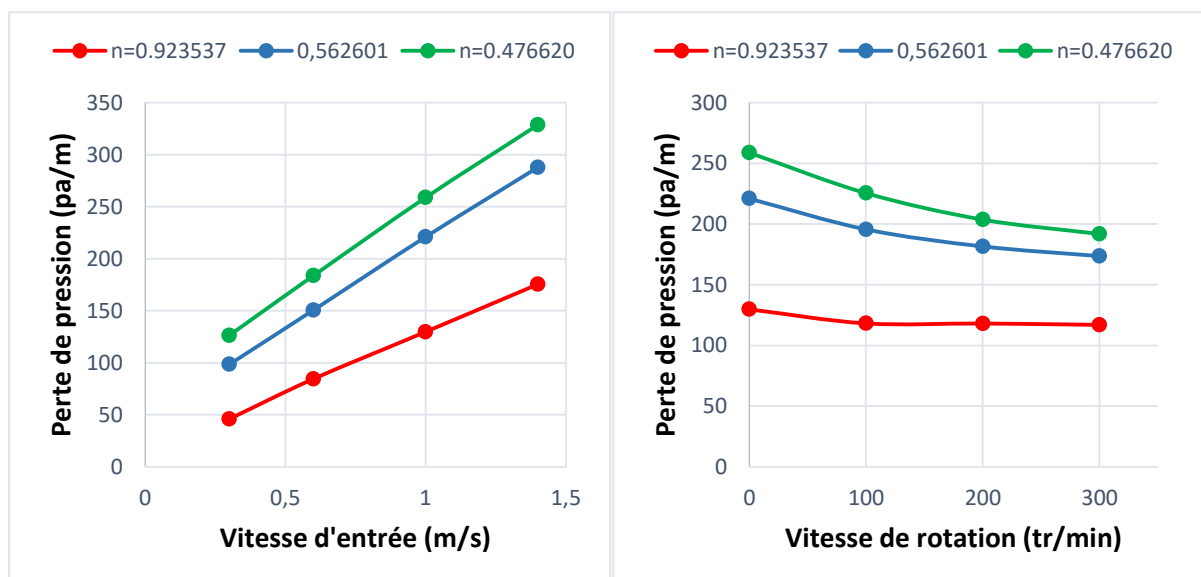
Effet de température sur les pertes de pression

Figure [V.31] Changement de perte de pression en fonction de la vitesse d'entrée à ($\text{RPM}=0$) et vitesse de rotation à ($V_{\text{entrée}}=1\text{m/s}$) dans le cas excentrique

Selon les graphes :

- Le paramètre rhéologique a une influence sur les pertes de pression si l'indice d'écoulement « n » augmente les pertes de pressions diminuent, cet impact se manifeste par la variation de l'indice d'écoulement « n ».
- La variation de gradient de perte de pression à différentes valeurs de « n » est toujours linéaire en fonction de la vitesse d'entrée.
- La vitesse de rotation de la tige a une influence importante pour les petites « n ».

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est la simulation d'un écoulement de fluide de forage dans le cas concentrique et excentrique pour étudier l'influence des divers paramètres (la vitesse d'entrée de fluide, la vitesse de rotation de la tige, les paramètres rhéologiques) sur le profil de vitesse et les pertes de pression dans l'espace annulaire.

Nous avons modélisé la boue de forage WBM suivant le modèle de Cross et Herschel Bulkley, ce dernier s'est avéré le plus adéquat tout en déterminant les 3 paramètres : Indice de consistance k , contrainte de seuil τ_c et l'indice d'écoulement n , pour les utiliser dans notre simulation.

Après la validation de notre étude avec Fluent ANSYS nous avons divisé notre travail en deux parties :

- Partie 1 : écoulement dans l'espace annulaire avec une tige concentrique.
- Partie 2 : écoulement dans l'espace annulaire avec une tige excentrique.

La simulation de l'écoulement nous permet d'avoir ces résultats :

- À différentes vitesses d'entrée l'excentricité a une influence sur le profil de vitesse si la distance entre la tige et le casing augmente, la vitesse augmente aussi et dans l'autre côté où cette distance diminue, la vitesse devient très faible et négligeable.
- La vitesse est devenue maximale dans le cas excentrique au niveau de la petite zone entre la tige et le casing pendant la rotation.
- À différentes vitesses, l'influence de la température sur la vitesse de l'écoulement est plus visible dans le cas excentrique que le cas concentrique, si nous introduisons la RPM, la vitesse est toujours maximale dans le petit espace, l'influence de la température dans ce cas est devenue négligeables. Il faut noter que l'effet de la température se manifeste sur les paramètres rhéologiques notamment l'indice d'écoulement « n ».
- L'excentricité de la tige augmente considérablement les pertes de pression annulaire à grande vitesse d'entrée, la relation entre la perte de pression et la vitesse d'entrée reste toujours linéaire.

- La vitesse de rotation n'a pas un effet sur les pertes de pression, et ces dernières restent toujours plus grandes dans la tige excentrique.
- L'augmentation de la température a un effet sur les pertes de pression dans le cas concentrique et excentrique (ils augmentent dans les deux cas) à cause de la variation considérable des deux paramètres « n » et « τ_c » ce qui rend l'écoulement plus difficile (phénomène de floculation sous températures).

A partir notre travail, nous pouvons, d'après les résultats de la simulation pour les graphes de perte de pression, détecter s'il y a excentricité de la tige à cause de la forte augmentation du gradient de pression de perte de pression.

Nous pouvons aussi prendre une idée sur l'évolution de perte de charge en fonction de la vitesse d'entrée qui sous forme linéaire à travers les formules déjà trouvées dans le cas concentrique (V.3) et le cas excentrique (V.6).

Dans le cas excentrique l'écoulement du fluide devient faible dans le côté étroit de l'espace annulaire pour résoudre ce problème il suffit d'augmenter la vitesse de rotation de la tige qui augmente énormément la vitesse dans ce côté pour éviter le stockage des déblais qui provoque des coincements de la garniture de forage.

Ce travail peut être complété par une étude de l'effet de l'excentricité sur les pertes de pression et les profils de vitesse.

Un autre cas d'étude peut être intéressant, qui est le cas d'écoulement dans un espace annulaire incliné rencontré le plus dans les forages dirigés.

Références bibliographiques

- [1] Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Concentric annular flow with center body rotation of a Newtonian and a shear-thinning liquid. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 16,156-162 (1995)..
- [2] Nouri, J. M., Whitelaw, J. H., Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with the rotation of the inner cylinder. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 236-246 (1997)..
- [3] Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Oliveira, P. J., Pinho, F. T., Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21, 92-103 (2000)..
- [4] Fang, P., Manglik, R. M., Jog, M. A., Characteristics of laminar viscous shear-thinning fluid flows in eccentric annular channels. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 84, 1-17 (1999)..
- [5] Nouri, J. M., Umur, H., Whitelaw, J. H., Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in concentric and eccentric annuli. *J. Fluid. Mech.*, 253, 617-641 (1993)..
- [6] Nouri, J. M., Whitelaw, J. H., Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with the rotation of the inner cylinder. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 236-246 (1997)..
- [7] Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Oliveira, P. J., Pinho, F. T., Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21, 92-103 (2000)..
- [8] Fisher, K. A., Wakeman, R. J., Chiu, T. W., Meuric, O. F. J., Numerical modeling of cake formation and fluid loss from non-Newtonian muds during drilling using eccentric/concentric drill strings with/ without rotation. *Chem. Eng. Res. Des.*, 78, 707-714 (.
- [9] Ali, W. A., Parametric study of cutting transport in vertical and horizontal well using computational fluid dynamics (CFD). M. Sc. Thesis, Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, West Virginia University, United States (2002)..
- [10] Escudier, M. P., Oliveira, P. J., Pinho, F. T., Fully developed laminar flow of purely viscous nonNewtonian liquids through annuli, including effects of eccentricity and inner-cylinder rotation. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 23, 52-73 (2002).
- [11] Nouar, C., Devienne, R., Lebouché, M., Thermal convection for Couette flow with axial flow rate. Case of a pseudo-plastic fluid. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, 639-647 (1987)..

- [12] Nouri, J. M., Whitelaw, J. H., Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with the rotation of the inner cylinder. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 236-246 (1997)..
- [13] M. Duan, S. Miska, M. Yu, N. Trakach, R. Ahmed, Experimental study and modeling of cuttings transport using foam with drill pipe rotation, *Soc. Petrol. Eng.* (2008)..
- [14] Ahmed, R., Enfis, M., Miftah-El-Kheir, H., Laget, M., & Saasen, A. (2010, September). The effect of drillstring rotation on equivalent circulation density: Modeling and analysis of field measurements. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. One.
- [15] Anifowoshe, O., & Osisanya, S. O. (2012, June). The effect of equivalent diameter definitions on frictional pressure loss estimation in an annulus with pipe rotation. In *SPE Deepwater Drilling and Completions Conference*. OnePetro..
- [16] Subramanian, R., & Azar, J. J. (2000, November). Experimental study on friction pressure drop for nonnewtonian drilling fluids in pipe and annular flow. In *International oil and gas conference and exhibition in china*. OnePetro..
- [17] Ofei, T. N., Irawan, S., & Pao, W. (2014). CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014..
- [18] Subramanian, R., & Azar, J. J. (2000, November). Experimental study on friction pressure drop for nonnewtonian drilling fluids in pipe and annular flow. In *International oil and gas conference and exhibition in china*. OnePetro..
- [19] Vieira, L. G. M., Barbosa, E. A., Damasceno, J. J. R., Barrozo, M. A. S., Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. *Braz. J. Chem. Eng.*, 22, 143-152 (2005)..
- [20] Vieira Neto, J. L., Duarte, C. R., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S., Effect of a draft tube on the fluid dynamics of a spouted bed: Experimental and CFD studies. *Drying Technol.*, 26, 299-307 (2008)..
- [21] Cunha, F. G., Santos, K. G., Ataíde, C. H., Epstein, N., Barrozo, M. A. S., Annatto powder production in a spouted bed: An experimental and CFD study. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 976-982 (2009)..
- [22] Barrozo, M. A. S., Duarte, C. R., Epstein, N., Grace, J. R., Lim, C. J., Experimental and computational fluid dynamics study of dense-phase, transition region and dilute-phase spouting. *Ind. Eng. Chem.*, 49, 5102-5109 (2010)..
- [23] Santos, K. G., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S. Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of spouted bed. *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 211-219 (2009)..

- [24] Oliveira, D. C., Almeida, C. A. K., Vieira, L. G. M., Damasceno, J. J. R., Barrozo, M. A. S., Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: An experimental and CFD study. *Braz. J. Chem. Eng.*, 26(3), 575-582 (2009).
- [25] Pereira, F. A. R., Barrozo, M. A. S., Ataíde, C. H., CFD predictions of drilling fluid velocity and pressure profiles in laminar helical flow. *Braz. J. Chem. Eng.*, 24, 587-595 (2007)..
- [26] Numerical study of drilling fluids flow in drilling operation with pipe rotation, volume 4, parte 4, pages 950-954 (2021).
- [27] Abid, D. (1995) Synthèse sur les fluides de forage, rapport 419/94. Sonatrach/CRD Boumerdès, Algérie.
- [28] Jean-Paul NGYEN. Techniques d'exploitation pétrolière, Le forage, 1993.
- [29] Module (FFF) les différents types de fluide de forage, M. Daddou, Division forage, Département RHU juillet 2009.
- [30] G. COUARAZ et J.L. GROSSIORS « Initiation à la rhéologie » laboratoire de physique pharmaceutique centre Châtenay-Malabry Université Paris 1991.
- [31] Mourad GARECHE « Caractérisation mécanique d'un fluide complexes » Thèse de magister I.N.H 1997
- [32] Reynolds. O, 1895. On the dynamical theory of incompressible flows viscous fluids and the determination of the criterion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 186, pp. 123-64.
- [33] Kennedy, P. K., *Flow Analysis of Injection Molds*. New York. Hanser.
- [34] M. BOUTARFA, « Caractérisation physique et rhéologique de la bentonite de Maghnia », Faculté d'Architecture et de Génie civil (FAG), Maghnia, Mémoire, 2012.
- [35] M. BOUALIT Abdel Hamid « CONTRIBUTION A L'ETUDE THERMO-HYDRODYNAMIQUE DES FLUIDES BINGHAMIENS »
- [36] P.Smith Stevens, *les formes dans la nature* ,1976.
- [37] G.Batchelor, *introduction to fluide dynamic*.2000.
- [38] A.Lipatnikov, *Fundamentals of premixed turbulence combustion*, 2013.
- [39] ALLEL, B, « Modélisation Hydraulique d'un Système de Transfert d'eau potable -cas du transfert du couloir Chleff-Tenes-el Guelta – à partir du barrage de sidi yacoub », Thèse de magister, Université Hassiba Benbouali. Chlef.

- [40] MELOUKA MOHAMED, « Simulation de l'effet d'insertion de tribulation du sien d'écoulement de fluide dans une constante, du point vu transfert de chaleur et perte de charge », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2013.
- [41] Bniaiche E. (2013). Ecoulement à surface libre. ITSMAERB, PPT online.
- [42] Gaaloul N. (2013). Notions de mécanique des fluides. Cours. CPU.
- [43] Ben Hamouda R. (2008). Notions de mecaniqye des fluides. CPU.
- [44] Patankar. S. V, 1980. Numerical heat transfer and fluid flow, Mc-Graw Hill, New York.
- [45] Tu J., Yeoh G.H., Liu C., Computational fluid dyamics, A pratical approach, Elsevier, USA, 2008.

Annexes

Le logiciel FLUENT

Fluent est un code CFD très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides et le transfert de chaleur pour différents types de problèmes. Il peut par exemple calculer la portance d'une aile d'avion, la traînée d'une voiture, le refroidissement de circuits électroniques par de l'air ventilé...etc.

En démarrant le logiciel Fluent on doit choisir les confins du domaine de calcul (2D ou 3D), et la précision que doit utiliser le logiciel, simple précision ou double précision.

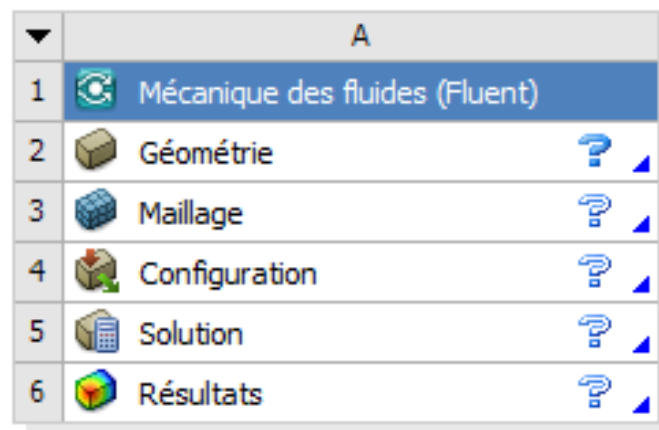


Figure 1 : schéma de projet du logiciel

L'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menuettes étapes par étape en commençant par la géométrie de notre projet jusqu'à la phase des résultats finaux.

Il est plus pratique de représenter ces étapes en détail (**Figure 2**) :

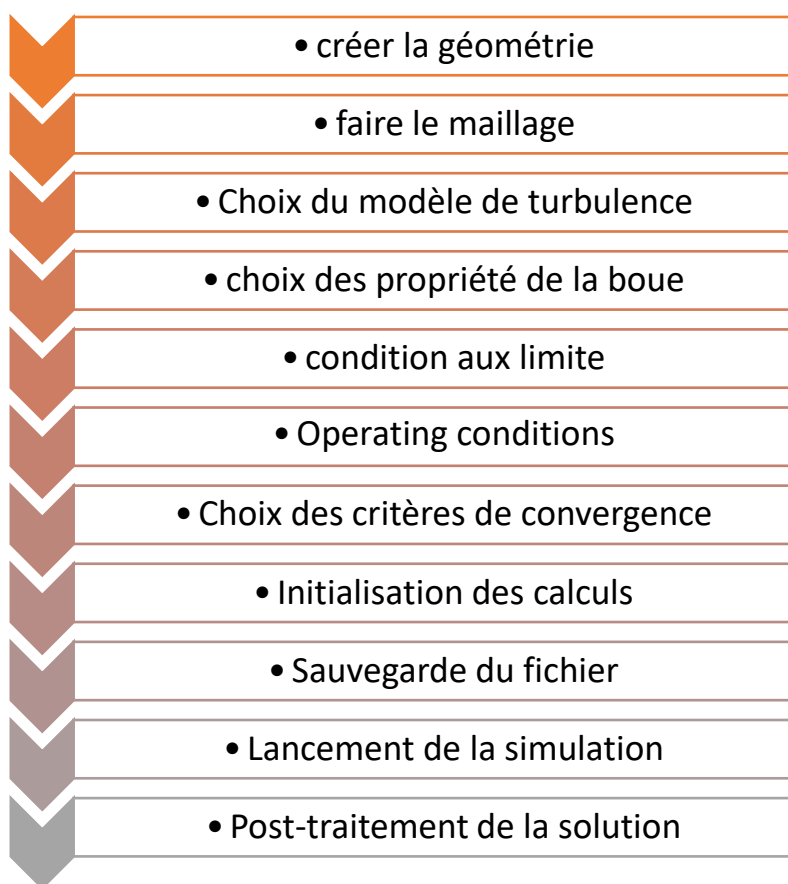


Figure 2 : les étapes de l'utilisation du logiciel

1-Géométrie :

Dans cette étape on fait la création de la forme géométrique de notre projet, la figure suivante représente sa fenêtre :

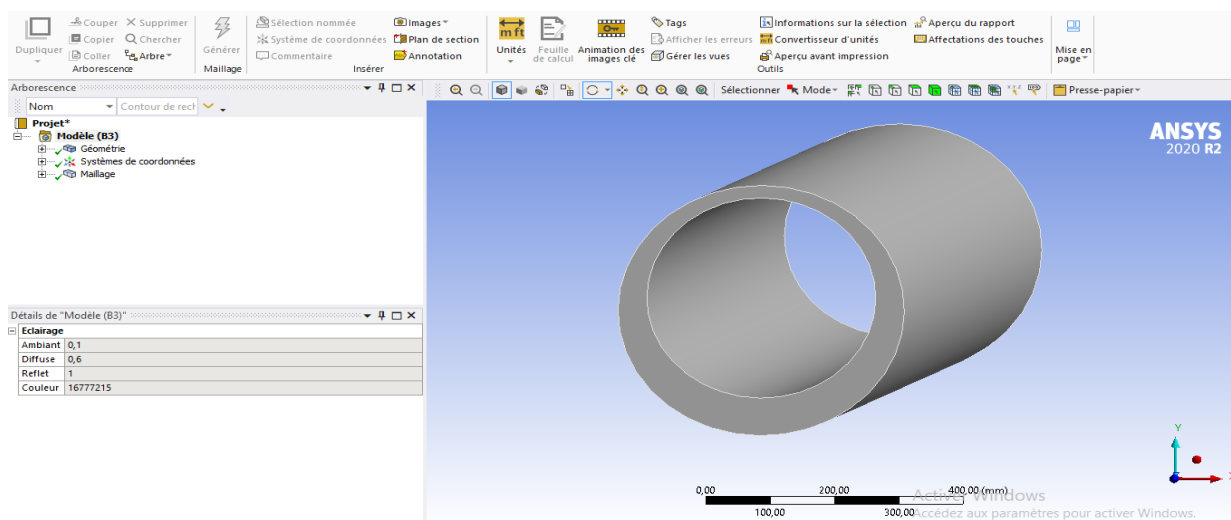


Figure 3 : Création de la géométrie.

2-Maillage

Dans cette étape, on choisit le maillage de notre projet, la figure ci-dessous représente un exemple de maillage avec le cas excentrique :

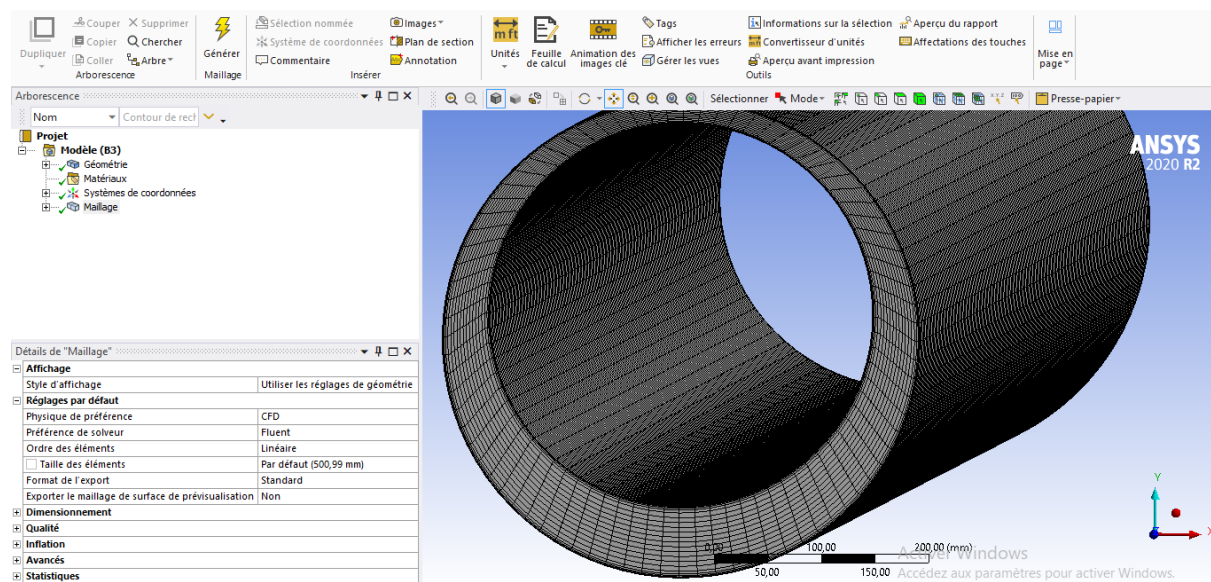


Figure 4 : Choix de maillage.

3-Configuration et Solution

On introduit toutes les informations (Choix du modèle de turbulence, Operating conditions, Operating conditions, condition aux limites, Choix des critères de convergence, Initialisation des calculs).

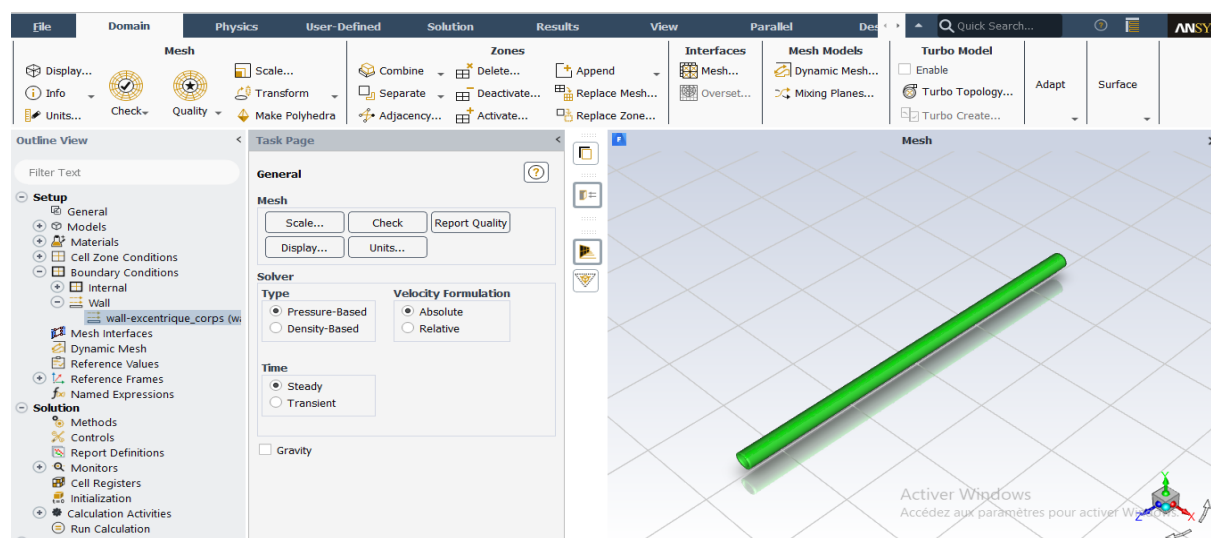


Figure 5 : Configuration et Solution

4-Résultat

C'est l'étape dernière ici ou on peut représenter nos résultats selon des graphes par exemple.

La figure ci-dessous représente la fenêtre de cette étape.

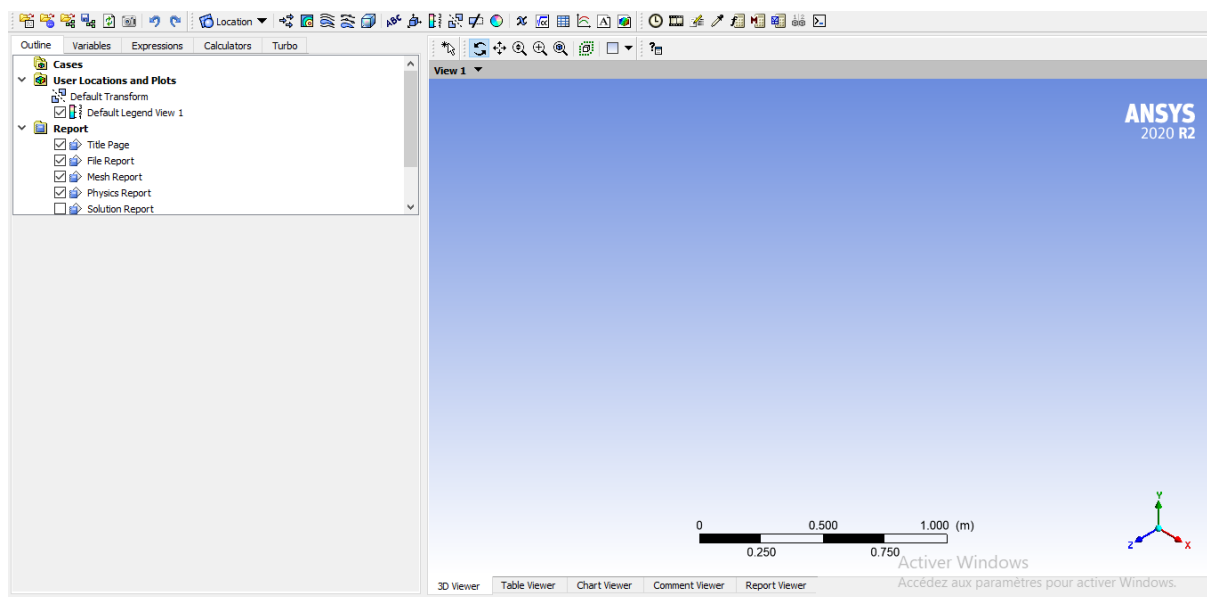


Figure 6 : Fenêtre de résultat.