

Université KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de
l'Univers**

Département : Forage et Mécanique des chantiers pétroliers



Mémoire

MASTER PROFESSIONNE

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Forage

Présenté par :

- ❖ **BENTRCIA OUSSAMA**
- ❖ **MEHABA SYPHAX**
- ❖ **BAADACHE YASMINA**

Thème:

Simulation d'un mélangeur de fluide de forage

Soutenu publiquement le : 18/06/2023

Devant le jury :

Mme. CHAICHE Zineb	MCB	Président	UKMO
Mr. BOUKESSANI Mohamed	MCB	Examineur	UKMO
Mme. HADJADJ Souad	MCB	Encadreur	UKMO

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciement

Nous remercions le seigneur qui nous a donné la force et le courage pour achever toute sorte d'obligation et relever les défis de la vie y compris la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions bien sûr tous nos enseignants sans exception pour leurs aides, leurs inspirations et leur contribution consistante à notre formation.

Nous tenons à exprimer une immense gratitude et un grand respect à l'égard de notre encadreur Madame HADJADJ Souad qui nous a énormément aidé, poussé et orienté grâce à ses précieux conseils et aussi la pertinence de son raisonnement.

Un grand merci aux membres du jury pour leur temps et évaluation précieuse de ce travail.

On tient à exprimer notre profonde gratitude envers le groupe ENAFOR pour leur généreuse contribution de donnée précieuse qui ont grandement enrichi notre travail.

Pour conclure un grand merci pour nos chers amis et toutes les personnes qui ont participé et contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

A nos très chers et précieux parents qui sont à la base de notre engagement et le secret de nos prés réussite grâce à leurs amples soutiens.

A tous nos enseignants sans exception qui nous ont transmet leurs connaissances, leurs savoirs et qui sont à la hauteur de nos exigences.

A tous nos amis avec lesquels on a passé des moments mémorable et grandiose tout a long de ces années passées, c'était vraiment exceptionnel.

A tout le groupe de UKMO qui nous ont attribué et créer un climat et des conditions d'études adéquates et adaptés.

ملخص

تهدف هذه الدراسة الى محاكاة ثلاثية الأبعاد للسلوك الهيدروديناميكي لسوائل الحفر في الخلاط على مستوى الخزانات السطحية بشكل رقمي. التدفق يعتبر دائم، غير قابل للضغط ومضطرب. أما سائل الحفر تتم دراسته بصيغتين مختلفتين: بسودوبلاستيك مقنن بقانون الاستطاعة وثنائي حالة المادة باعتباره خليطاً من مسحوق البنتونيت والماء. تم اجراء المحاكاة الرقمية على نموذج مصغر ب 8000 مرة مقارنة بالحجم الحقيقي، باستخدام برنامج, Ansys-fluent 19.2. تُظهر النتائج تدفقاً شعاعياً ناتجاً عن استخدام العنفة، بالإضافة إلى وجود سرعة مثالية تولد القوى التي يحتاجها التحريك الموحد للسوائل، دون تشتيت كبير للطاقة.

الكلمات المفتاحية: الخلاط، الخزانات السطحية، زائف اللدونة، العنفة، ثنائي الطور.

Abstract:

The objective of this study is to numerically simulate the hydrodynamic behavior of a drilling fluid in agitator on the level of surface tanks. The flow conditions are considered turbulent, incompressible, and steady state. The fluid in question is tested in two different forms: pseudoplastic within the framework of the power law, and biphasic as a mixture of bentonite powder and water. The numerical simulation was performed on a model at a reduced scale of 8000 times compared to the real scale, using the software Ansys-fluent 19.2.

The results show a radial flow due to the use of a turbine, as well as the existence of an optimal speed that generates the necessary shearing forces to uniformly agitate the fluid, without huge energy dissipation.

Keys words: agitator, surface mud tanks, pseudoplastic, turbine, biphasic.

Résumé :

L'objectif de cette étude consiste à simuler numériquement en trois dimensions le comportement hydrodynamique de fluide de forage dans un agitateur au niveau des bacs de surface. L'écoulement est considéré comme turbulent, incompressible et permanent. Le fluide en question est testé dans deux formes différentes : pseudoplastique dans le cadre de la loi de puissance, et biphasique en tant que mélange de poudre de bentonite et l'eau. La simulation numérique a été effectuée sur un modèle à un volume réduit 8000 fois par rapport à l'échelle réelle, à l'aide du logiciel commercial Ansys-fluent 19.2.

Les résultats montrent un écoulement radial dû à l'utilisation d'une turbine. Plus l'existence d'une vitesse optimale, qui génèrent les cisaillements nécessaires pour agiter uniformément le fluide, sans dissipation énorme de l'énergie.

Mots clés : agitateur, bacs à boue de surface, pseudoplastique, turbine, biphasique.



Introduction	1
Chapitre I :Généralités	
I.1. Définition de mélange	2
I.2. La boue de forage	3
I.3. Les caractéristiques rhéologiques	3
I.4. Le fluide pseudoplastique	5
I.4.1. Définition et courbe typique	5
I.4.2. Indice de consistance du fluide et indice de comportement d'écoulement	6
I.4.3. Détermination de l'indice de comportement d'écoulement n et de l'indice de consistance K dans un viscosimètre Fann	7
I.4.3.1. Détermination de n	7
I.4.3.2. Détermination de K	8
I.5. Système de circulation de boue de forage, en surface	8
I.5.1. Suction tank system	8
I.5.1.1. Mud Cleaner	9
I.5.1.2. Suction tank	9
I.5.2. Shaker tank	10
I.5.3. Flow divider	11
I.5.4. Strip Tank	11
I.5.5. Trip tank	11
I.5.6. Reseves tanks	12
I.5.7. Reserve tank system	12
I.5.8. Mix unit	12
I.5.9. High Pressure Piping and Hoses	13
I.6. Principe d'agitation	13
I.7. Importance de l'agitation	13
I.8. Agitateurs mécaniques	13
I.8.1. Les impulseurs	14
I.8.1.1. Les impulseurs axiaux (circulants)	15

I.8.1.2. Les impulseurs radiaux (cisailants)	16
1.8.2. Les Compartiments	18
I.9. Les régimes d'écoulement	19
I.9.1. Le régime laminaire	19
I.9.2. Le régime turbulent	19
I.9.3. Nombre de reynolds	20
I.10. Les cavernes	21
Chapitre II : Problématique	
II.1. Description de la problématique	23
II.2. La similitude de l'agitateur de la boue de forage	25
II.3. Formulation mathématique	28
II.4. Formulation numérique et méthode de Résolution	28
II.4.1. Méthode des volumes finis	29
II.4.2. Le solveur AnsysFluent	29
II.4.3. Le modèle k-epsilon de turbulence	29
II.4.4. Les conditions aux limites	30
II.4.5. Le maillage	30
II.4.5.1. Types de maillage	31
II.4.6. Indépendance de maillage	32
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1. Hypothèses et conditions aux limites	36
III.2. Résultats et discussions	36
III.2.1. Les profils de vitesse	36
III.2.1.1. Fluide non newtonien pseudoplastique	36
III.2.1.2. Fluide biphasique, la poudre de bentonite dispersée dans l'eau	42
Discussion	43
Conclusion	45
Références	46

LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES	Page
I.1	Représentation schématique de la dispersion et la distribution lors d'un Mélange	2
I.2	Courbe d'écoulement d'un fluide à loi de puissance	6
I.3	Détermination des paramètres rhéologiques d'un fluide à loi de puissance	7
I.4	L'ensemble des réservoirs qui composent le système de circulation en surface de la boue de forage	8
I.5	Mud Cleaner	9
I.6	Agitateur mécanique	14
I.7	Le flux agité, a : axial en utilisant une hélice marine, b : radial en utilisant une turbine	15
I.8	Les impulseurs axiaux, en haut les hélices marines, 1 : à deux pales, 2 : à quatre pales, 3 : à trois pales. En bas les hélices à pales sabrent ou hypercirculateur, 4 : à trois pales, 5 : à quatre pales, 6 : à trois pales larges	16
I.9	Les impulseurs radiaux : Turbines, à gauche : turbine Rushton, à pales droites, au milieu : turbine de Smith, à droite : turbine à pales inclinées	17
I.10	Pales de contour boulonnées au moyeu, montées sur un arbre creux	18
I.11	Contours des écoulements en agitation, a : écoulement radial, b : écoulement axial, c : écoulement mixte	18
I.12	La caverne du fluide pseudoplastique	21
II.1	L'agitateur de la boue de forage réel (ENAFOR 57 – BOG 12).	24
II.2	La position de l'agitateur par rapport à la longueur et largeur du bac, projection horizontale (en haut) et verticale (en bas).	24
II.3	L'agitateur modèle, a : la projection verticale, b : la projection horizontale en bas, c : la projection horizontale en haut	26
II.4. a	Le système d'agitation en trois dimensions	26
II.4. b	Une projection verticale du système d'agitation	27
II.4.c	Une projection horizontale du système d'agitation	27
II.5	Les types de maillage	32

LISTE DES FIGURES

II.6	Les profils de vitesse, au niveau de la turbine, dans le plan yz, de six cas étudiés	33
II.7. a	Le maillage du 3 ^{ème} cas, une vue tridimensionnelle avec une coupe dans le plan yz	34
II.7. b	Le maillage du 3 ^{ème} cas, projection dans le plan yz	34
II.7.c	Le maillage du 3 ^{ème} cas, projection dans le plan yz, la turbine	35
II.7. d	Le maillage du 3 ^{ème} cas, projection dans le plan xz	35
III.1	La courbe de puissance, la boue de forage	38
III.2	Profile de vitesses radiales, à gauche : la projection verticale dans le plan YZ, à droite : la projection horizontale dans le plan XZ	49
III.3	Profile de vitesses, à gauche : la projection verticale dans le plan YZ, à droite : la projection horizontale dans le plan XZ	41
III.4	Profile des trois vitesses utilisées en projection horizontale dans le plan XY (vitesse axiale). En haut $v_1=1000\text{rpm}$, au milieu $v_2=1460\text{rpm}$, en bas $v_3=2400\text{rpm}$	43
III.5	Contours de vitesse de fluide biphasique (poudre de bentonite + l'eau)	45

Tableaux	Titres	Page
II.1	Les dimensions du réservoir et des pales de turbine	25
II.2	Les conditions aux limites appliquées sur l'agitateur	30
II.3	Les caractéristiques physiques de l'eau	32
II.4	Récapitulation du maillage traité	33
III.1	Les caractéristiques thermos physiques de la boue de forage	37
III.2	Les vitesses et les nombres de Reynolds étudiés	37
III.3	Les caractéristiques thermos physiques des fluides utilisés	42

Symbole	Signification	Unité
B	(Vessel diameter / 4), cavern model parameter	[m]
D_A	Diamètre d'agitateur	[m]
D_C	Diamètre de caverne	[m]
D_T	Diamètre de réservoir	[m]
3D	Trois dimensions	-
F	Force	[N]
F_T	Flow consistency coefficient	-
G	Accélération terrestre	[m. s ⁻²]
g_c	Constante gravitationnelle dimensionnelle	-
H	Hauteur	[cm]
K	Indice de consistance	[kg. s. m ⁻¹]
K	Énergie cinétique turbulente	[J]
L	Largeur	[m]
M	La masse	[kg]
N	Indice du comportement	-
N	Vitesse de rotation	[RPM]
Long	Longueur de Bac a boue	[m]
Long A	Longueur d'Agitateur	[m]
Long 1	Longueur entre Agitateur et Bac a boue	[m]
Long 2	Longueur entre Agitateur et Bac a boue	[m]
Large	Largeur de Bac a boue	[m]
Large A	Largeur d'Agitateur	[m]
Large 1	Largeur entre Agitateur et Bac a boue	[m]
Large 2	Largeur entre Agitateur et Bac a boue	[m]
P	Pression	[Pa]
P̄	La pression moyenne	[Pa]
P'	Les fluctuations de pression	[Pa]
T	Température	[K]
T	Le temps	[s]
u, v, w	Composantes du champ de vitesse	[m/s]
ū . v̄ et w̄	Les composantes de la vitesse moyenne	[m/s]

NOMENCLATURE

$u', v' \text{ et } w'$	Les composantes des fluctuations instantanées de la vitesse	[m/s]
V	Vitesse de fluide	[m/s]
v_c	La vitesse dans la caverne	[m/s]
$X, Y, Z,$	Coordonnées Cartésiennes	[m]

Symbole	Grecs	Unité
ρ	Masse volumique de la boue de forage	[Kg/m ³]
ϵ	Taux de dissipation d'énergie en turbulence	[m ² /s ³]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
μ	Viscosités dynamique	[kg/m.s]
μ_p	La viscosité plastique	[Cp]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
ν_T	Viscosité turbulente	[m ² /s]
Γ_T	La diffusivité turbulente	[W/m.K]
τ	La contrainte de cisaillement	[Pa]
τ_c	La contrainte critique	[Pa]
η	Facteur d'efficacité	-
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	[s ⁻¹]

Abréviations

CFD	Computational Fluid Dynamic
-----	-----------------------------



Introduction

Dans l'industrie pétrolière, L'agitation mécanique est une opération essentielle, car elle accompagne de nombreux processus tout au long de l'exploitation des hydrocarbures. Que ce soit lors de l'exploration des puits, du forage proprement dit ou des opérations de transformation des hydrocarbures en produits finis, l'agitation joue un rôle crucial dans différentes étapes.

Dans le contexte du forage pétrolier, l'agitateur est un élément indispensable pour assurer un mélange homogène des fluides de forage. Les fluides de forage sont des mélanges complexes de liquides et solides, et leur homogénéité est primordiale pour garantir leur efficacité tout au long du processus de forage.

Ce travail comporte une simulation tridimensionnelle de fluide de forage dans un agitateur. Le volume de ce système d'agitation est réduit 8000 fois par similitude. L'écoulement est permanent, incompressible et turbulent et le fluide de forage utilisé, est considéré, tantôt, comme un fluide monophasique non newtonien, pseudoplastique obéit par la loi de puissance, tantôt comme un fluide biphasique, sous forme d'un mélange de la poudre de bentonite et de l'eau. Le code numérique utilisé pour réaliser ce travail est l'Ansys Fluent 19-02.

L'objectif de l'étude est de comprendre le comportement hydrodynamique du fluide de forage lors de l'agitation.

Pour atteindre ce but, le mémoire est réparti en trois chapitres. Le premier, entame des généralités sur les systèmes d'agitation existant dans une plateforme de forage, et sur la rhéologie du fluide de forage. Le dernier chapitre présente la discussion des résultats obtenus par la modélisation et la simulation décrite dans le deuxième chapitre.



Chapitre I : Généralités

L'agitation est un processus très important dans le système de circulation de la boue de forage, en surface, car cette dernière, du point de vue rhéologique, nécessite une agitation continue afin de garder sa fluidité et son homogénéité. Pour ces raisons la plupart des réservoirs de la boue de forage sont dotés par un agitateur

Dans ce chapitre, les principes généraux des mélanges et des dispositifs de mélange sont abordés. Ainsi que la description système de circulation de la boue de forage, en surface.

I.1. Définition de mélange :

Le mélange est généralement effectué pour réduire les hétérogénéités en particulier dans le mélange de solides particuliers, ou pour améliorer un processus de vitesse, en particulier dans les récipients agités mécaniquement [1].

Mais, un mélange parfait n'existe car, le degré d'homogénéisation dans un volume est relatif à l'échelle et au point de vue de l'étude.

Un milieu homogène correspond donc à un milieu dont les particules sont à la fois bien dispersées et bien distribuées (voir fig.I.1). [2]



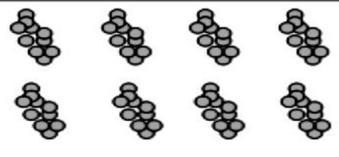
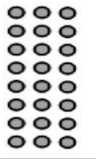
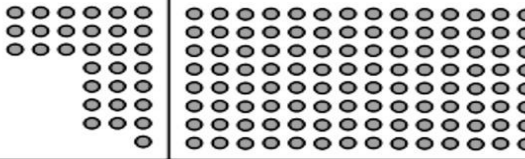
		
Mauvaise Dispersion Mauvaise Distribution	Mauvaise Dispersion Bonne Distribution	
		
Bonne Dispersion Mauvaise Distribution	Bonne Dispersion Bonne Distribution	

Fig.I.1 : Représentation schématique de la dispersion et la distribution lors d'un Mélange [3].

I.2. La boue de forage :

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (chaux, alourdissant, réducteurs de filtrats, émulsifiants, viscosifiants...). L'Institut Américain du Pétrole (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille. A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Les boues de forage sont des fluides non newtoniens, le plus souvent thixotropes. [4]

On distingue trois types de boue :

- Boue à base d'eau (Water Based Mud) ;
- Boue à base d'huile (Oil Based Mud) ;
- Boue synthétique (Synthetic BasedMud).

I.3. Les caractéristiques rhéologiques :

À une température et une pression donnée, les fluides sont caractérisés par :

A. Leur comportement sous des conditions transitoires, tel qu'il se manifeste par leur temps de réponse aux conditions modifiées d'écoulement.

B. Leur comportement en écoulement laminaire, caractérisé par leur courbe d'écoulement expérimentale, ou rhéogramme.

Les coefficients constants de l'équation d'écoulement représentée par cette courbe sont des paramètres rhéologiques spécifiques au fluide particulier. Si l'écoulement est laminaire, l'équation d'écoulement relie le cisaillement τ à la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Pour un fluide donné, cette relation varie avec la température et la pression. Nous avons dit que dans un écoulement laminaire, le fluide est divisé en couches laminaires, parallèles à la direction de l'écoulement, chaque couche se déplaçant à sa vitesse spécifique. On peut donc définir:

(a) Un taux de cisaillement tel que :

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{\text{différence de vitesse entre deux couches adjacentes}}{\text{distance entre les deux couches}} \quad (\text{I.1})$$

L'équation dimensionnelle de $\dot{\gamma}$ est :

$$\frac{\text{LT}^{-1}}{\text{L}} = \text{T}^{-1}$$

La dimension de $\dot{\gamma}$ est le temps inverse s^{-1} ou $\frac{1}{s}$.

(b) Une contrainte de cisaillement, qui est la force par unité de surface de la couche laminaire induisant le cisaillement.

L'équation dimensionnelle de τ est :

$$\frac{\text{MLT}^{-2}}{\text{L}^2} = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$$

La contrainte de cisaillement τ a les dimensions de la pression. Elle est souvent exprimée en livres par 100 pieds carrés (lb/100 ft²) dans le système impérial, ou en pascals (Pa) dans le système international d'unités (SI).

Pour un taux de cisaillement donné, la viscosité apparente η est définie par l'équation suivante:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.2})$$

Où τ est la contrainte de cisaillement conduisant à $\dot{\gamma}$.

L'équation dimensionnelle de la viscosité apparente η est :

$$\frac{\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}}{\text{T}^{-1}} = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$$

La viscosité apparente η a les dimensions de la viscosité.

Dans le système international (SI), la viscosité apparente η est exprimée en pascal-seconde (Pa.s). L'unité couramment utilisée est sa sous-multiple, le millipascal-seconde (mPa.s), qui est équivalent au centipoise (cP).

Il est souvent nécessaire de prendre en compte la contrainte de cisaillement, le taux de cisaillement et la viscosité apparente au niveau de la paroi du canal où le fluide se déplace.

C. Leur comportement au repos, tel qu'il se manifeste par la formation de gel après une certaine période de temps, pour les fluides thixotropes.

Un fluide est thixotrope s'il présente les caractéristiques suivantes :

- (a) Il forme un gel après avoir été secoué et laissé au repos.
- (b) Il retrouve son état initial après avoir été secoué à nouveau.

À température et pression constantes, le comportement thixotrope est réversible.

I.4. Le fluide pseudoplastique :

I.4.1. Définition et courbe typique :

Les fluides pseudo-plastiques, tout comme les fluides newtoniens, s'écouleront sous toute contrainte appliquée, aussi petite soit-elle. Cependant, contrairement aux fluides newtoniens, la contrainte de cisaillement n'est pas proportionnelle au taux de cisaillement, mais à sa puissance n^{th} , d'où le nom de fluides à loi de puissance.

L'équation d'écoulement est la suivante :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (I.3)$$

Où : K est l'indice de consistance exprimé en Pa · sⁿ ou en lb · sⁿ/100ft², et n est l'indice de comportement d'écoulement sans dimension.

Si n = 1, l'équation devient identique à l'équation d'écoulement d'un fluide newtonien ayant la viscosité K.

Les graphiques suivants, présentés dans la (Fig.I.2), représentent les courbes d'écoulement d'un fluide à loi de puissance dans des coordonnées cartésiennes et logarithmiques respectivement.

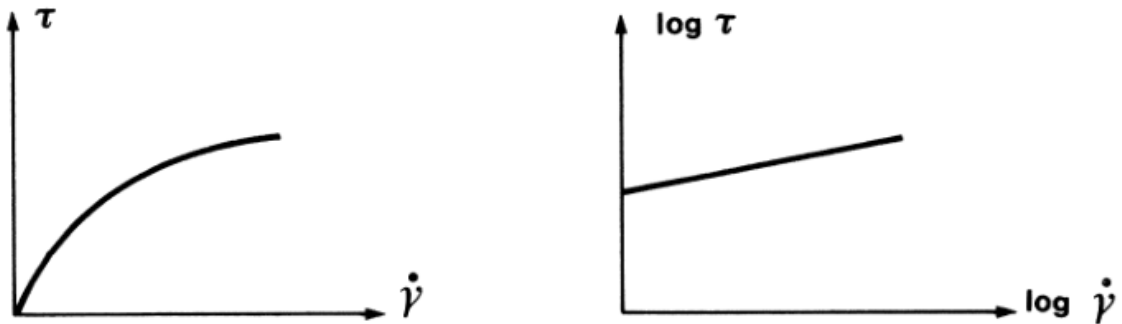


Fig.I.2 : Courbe d'écoulement d'un fluide à loi de puissance.

I.4.2. Indice de consistance du fluide et indice de comportement d'écoulement :

Dans des coordonnées logarithmiques, la courbe d'écoulement est une ligne droite dont l'équation est la suivante :

$$y = \log K + nx \quad (\text{I.4})$$

Où :

$$y = \log \tau \text{ et}$$

$$x = \log \dot{\gamma}.$$

Ainsi, l'indice de comportement d'écoulement n représente la pente de cette ligne, tandis que l'indice de consistance du fluide K est donné par l'intersection de la courbe d'écoulement avec l'axe à $y = 1$.

$$n = \frac{\log \tau - \log \tau'}{\log \dot{\gamma} - \log \dot{\gamma}'} = \frac{\log \tau / \tau'}{\log \dot{\gamma} / \dot{\gamma}'} \quad (\text{I.5})$$

I.4.3. Détermination de l'indice de comportement d'écoulement n et de l'indice de consistance K dans un viscosimètre Fann :

Les déterminations réalisées dans un viscosimètre Fann à six vitesses (ou, si cet instrument n'est pas disponible, dans un viscosimètre Fann à deux vitesses, en utilisant également g_o , qui est considéré comme représentant une détermination à 3 tr/min) sont tracées, sous forme d'une rhéogramme, sur du papier log-log, les taux de cisaillement (en s^{-1}) étant représentés sur l'axe des abscisses, les contraintes de cisaillement (en $lb/100 ft^2$) sur l'ordonnée (Fig. I.3).

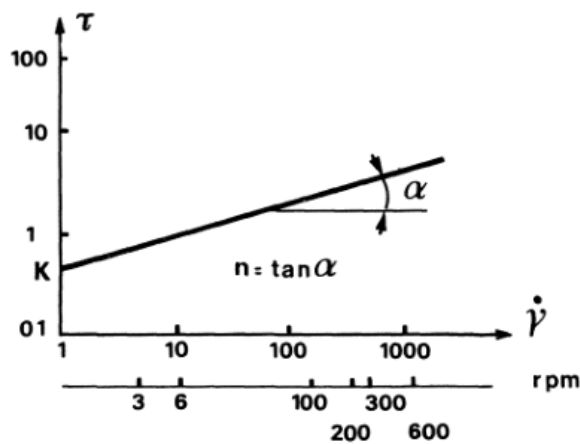


Fig.I.3 : Détermination des paramètres rhéologiques d'un fluide à loi de puissance.

I.4.3.1. Détermination de n :

Nous avons vu que :

$$n = \frac{\log \tau / \tau'}{\log \dot{\gamma} / \dot{\gamma}'} \quad (\text{nombre sans dimension})$$

Si $\dot{\gamma} = 2\dot{\gamma}'$, nous avons :

$$n = \frac{\log \tau / \tau'}{\log 2} = \frac{\log \theta / \theta'}{\log 2} = 3.32 \log \theta / \theta' \quad (I.6)$$

I.4.3.2. Détermination de K :

$$K = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} \quad (I.7)$$

Si $\dot{\gamma} = 1, K = \tau_1$.

Si τ est donné en lb/100 ft² et $\dot{\gamma}$ en s⁻¹ l'unité de K sera en lb sⁿ /100 ft². Si τ est donné en pascal, l'unité de K sera en Pa. sⁿ. Il convient de rappeler que 1 lb_{force}/100 ft² = 0,478964 Pa. [5]

I.5. Système de circulation de boue de forage, en surface :

Les composants du système de circulation des boues de forage en surface entamés dans ce qui suit sont les réservoirs qui nécessitent l'agitation continue de la boue de forage, plus les éléments supplémentaires qui assurent la liaison et complètent leurs fonctionnements, (voir fig.I.4) [6]

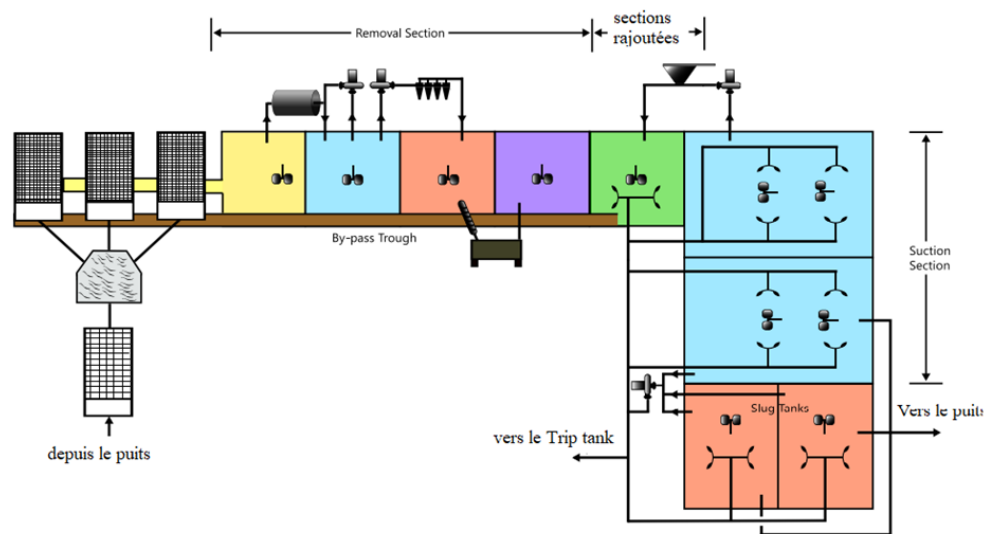


Fig.I.4 : l'ensemble des réservoirs qui composent le système de circulation en surface de la boue de forage.

I.5.1. Suction tank system :

Il décrit tous les composants nécessaires à l'aspiration du fluide de forage par les pompes à haute pression, ainsi que le Mud Cleaner. Il se compose des éléments suivants :

- Mud Cleaner
- Suction Tank
- Low Centrifugal Pump
- Filtre
- Mud Agitator

I.5.1.1. Mud Cleaner :

C'est une combinaison d'hydrocyclones montés au-dessus de tamis vibrants avec de petites ouvertures. Il peut être loués ou achetés en tant qu'unités indépendantes ou assemblés sur un emplacement de forage (voir fig.I.5).



Fig.I.5: Mud Cleaner. [7]

I.5.1.2. Suction tank :

Il maintient un stock de fluide de forage suffisant pour les pompes à haute pression. En mode circulation, la hauteur de remplissage dans ce réservoir est maintenue par le Mud Ditch. Les pertes de liquide du fluide sont compensées par du fluide provenant des Reserve Tanks.

Il est divisé en 3 chambres afin d'entreposer différents types de boue de forage pour le mode circulation. Un agitateur est installé dans chaque chambre afin d'éviter une sédimentation du rinçage de forage. Toutes les chambres sont équipées de clapets de vidange. Son nettoyage s'effectue à l'aide d'une buse de rinçage rotative basse pression et la chambre 1 à l'aide d'une buse de rinçage 3000 PSI.

I.5.2. Shaker tank :

Il sépare les différents niveaux de nettoyage du fluide de forage. Les appareils et les agrégats permettant d'atteindre les niveaux de nettoyage sont montés sur et dans le Shaker Tank. Le Tank est divisé en 3 chambres :

- Piège à sable
- Chambre Desander
- Chambre Degasser

Une troisième pompe centrifuge située sur le Shaker Tank Skid permet de pomper vers le Desilter le rinçage de forage de la chambre Degasser ou du Suction Tank.

Des matières solides se déposent dans le piège à sable du fait de la faible vitesse d'écoulement. Ces matières sont vidées dans le bassin d'évacuation à l'aide d'une vanne guillotine. Un trop-plein se trouve entre le piège à sable et la chambre Desander. Le piège à sable est nettoyé à l'aide de 2 buses de nettoyage.

Le Mud Ditch permet de guider le fluide dans la chambre Desander.

Une pompe centrifuge aspire le fluide de forage depuis la chambre Desander ou Degasser et transporte le fluide vers le Desander. Le liquide nettoyé retourne ensuite dans la chambre Desander.

Un aspirateur de surface situé dans le Tank guide le fluide de forage de surface plus léger dans la chambre Degasser. L'aspirateur de surface permet également de régler la hauteur du niveau de liquide. Cette chambre est nettoyée à l'aide d'une buse de rinçage rotative à basse pression. Des clapets de vidange se trouvent dans la chambre.

Une pompe centrifuge aspire le rinçage de forage depuis la chambre de Degasser et transporte le fluide vers le Drilling Mud Degasser.

Le liquide dégazé retourne ensuite dans la chambre Degasser ou dans la cuve d'aspiration. Le gaz est soufflé par une soupape de retenue du Mud Gas Separator puis est conduit dans le bassin d'évacuation. La soupape de retenue sert à éviter que le fluide pénètre dans le Drilling Mud Degasser en cas de formation de mousse dans le Mud Gas Separator.

Un aspirateur de surface situé dans le Tank guide le fluide de forage de surface plus léger dans le Suction Tank. L'aspirateur de surface permet également de régler la hauteur du niveau de liquide. Un agitateur situé dans la chambre évite la sédimentation du fluide de forage. La chambre est nettoyée à l'aide d'une buse de rinçage rotative basse pression et d'une buse de rinçage 3000 PSI. Des clapets de vidange se trouvent dans la chambre.

I.5.3. Flow divider :

Selon les besoins, le Flow Divider sépare le fluide de forage du Mud Return en plusieurs flux partiels. Le fluide de forage est réparti sur quatre conduites avec clapets de blocage:

- Trois conduites entraînent le rinçage de forage dans les Shale Shaker.
- Une conduite guide le rinçage de forage directement dans le bassin d'évacuation.

Le fluide de forage dégazé du Mud Gas Separator est conduit dans le Flow Divider.

I.5.4. Strip Tank :

Le Strip Tank est utilisé pour une mesure précise du rinçage de forage sur le Trip Tank.

I.5.5. Trip tank :

Le Trip Tank est rempli par le Mud Return Line. Pour éviter un trop-plein, on peut ouvrir une vanne du Mud Ditch. Cela crée un écoulement de Bypass via le Trip Tank. Afin d'améliorer le rinçage, le Trip Tank est divisé en deux (2) chambres de 5,5 m³.

Le Trip Tank possède des capteurs de remplissage mécanique et électrique qui mesurent le volume du liquide de rinçage évacué du puits de forage par la tige.

La pompe du Trip Tank pompe le fluide dans le puits de forage pour maintenir la pression hydrostatique dans le puits de forage. Le volume alimenté dépend du volume évacué de la tige de forage.

Pendant la procédure de Trip, le niveau de remplissage dans le Trip Tank est observé et documenté.

I.5.6. Reseves tanks :

C'est ensemble de plusieurs Tanks qui alimentent le processus de forage, en cas de défaillance ou de nécessité. Chaque Tank est divisé en 2 chambres et il est rempli par le retour du Mud Ditch et par les conduites de pression et les conduites de compensation. Le vidage s'effectue via les conduites de compensation dans d'autres Tanks, vannes d'aspiration et clapets de vidange. Le nettoyage s'effectue avec deux buses de rinçage rotatives basse pression. La chambre 1 peut également être nettoyée à l'aide d'une buse de rinçage 3000 PSI. Un Mud Agitator présent dans chaque chambre évite la sédimentation du rinçage de forage.

Les composants suivants sont installés :

- Dispositif d'accueil pour deux Mud Agitators
- Système de tuyauterie LP
- Clapets de blocage
- Dispositif d'accueil pour un Low Pressure Centrifugal Pump
- Dispositif d'accueil pour un Hopper

I.5.7. Reserve tank system

Il entrepose et mélange le fluide de forage. Il se compose des éléments suivants :

- Plusieurs Reserve Tank (deux ou trois)
- Hopper
- Low Pressure Pump
- Mud Agitator

I.5.8. Mix unit :

Elle mélange la base du fluide de forage (eau ou huile) avec des matières solides, la bentonite ou la baryte, par exemple. Les pompes centrifuges aspirent la base de fluide depuis le Tank system et la transportent vers l'un des Hopper. En fonction de la forme d'alimentation des matières solides dans le Hopper, le mélange est effectué dans le Big Bag Hopper ou dans

le Sack Hopper. Le Big Bag Hopper est équipé d'une voie de roulement pour des sacs allant jusqu'à cinq tonnes de masse.

I.5.9. High Pressure Piping and Hoses:

Il est composé de plusieurs conduites à haute pression, vannes et tubes flexibles. Le fluide de forage est pompé via ce système de conduites des Mud Pumps vers le puits de forage.

I.6. Principe d'agitation :

L'agitation est réalisée par la mise en mouvement de la phase liquide. Soit la masse est composée de différentes substances et l'opération vise à homogénéiser celle-ci ou à mettre en contact des réactifs pour qu'ils réagissent plus efficacement, soit le milieu est déjà homogène et l'opération d'agitation est effectuée pour réaliser un transfert thermique ou un maintien de particules solides en suspension. [8]

I.7. Importance de l'agitation :

L'agitation et le mélange sont deux opérations unitaires importantes utilisées dans des industries telles que les agitateurs à turbine sont largement utilisés pour faire circuler le liquide à travers le récipient dans lequel la dispersion des liquides et des gaz dans d'autres liquides comme le mélange de pâte rigide, d'élastomères et de poudres solides sèches a lieu.

- Suspension des particules solides
- Mélange de liquides miscibles
- Dispersion d'un gaz à travers le liquide
- Dispersion d'un deuxième liquide pour former une émulsion ou suspension
- Favoriser le transfert de chaleur
- Amélioration du transfert de masse entre les phases [9]

I.8. Agitateurs mécaniques :

Les agitateurs de boue sont des équipements de mélange de fluides qui maintiennent les solides en suspension dans le fluide de forage, sans qu'ils se déposent au fond de la cuve à boue.

Il utilise une turbine pour agiter et mélanger la boue de forage, entraînée par un arbre de rotation puis un moteur électrique. Les aubes de la turbine transforment la puissance mécanique en circulation ou en agitation du fluide. Certains arbres peuvent avoir deux impulseurs montés sur eux. (Voir fig.I.6).[10]

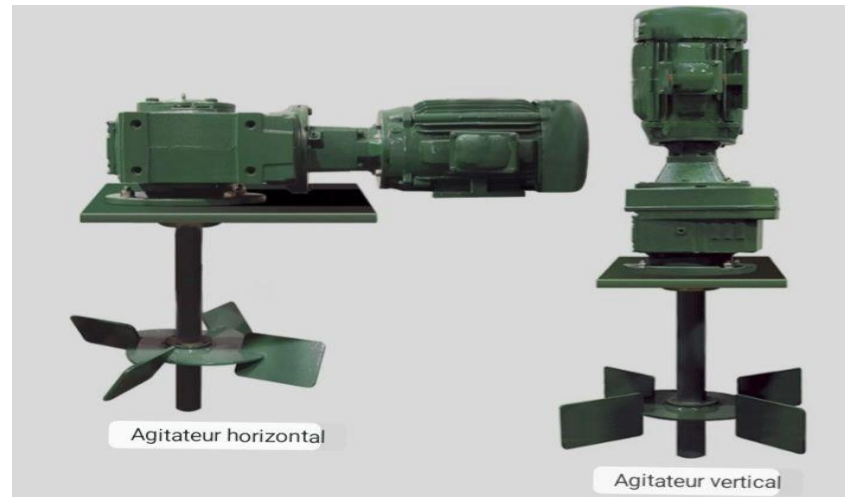


Fig .I.6 : Agitateur mécanique [11]

I.8.1. Les impulseurs :

L'agitation traditionnelle en cuve utilise un agitateur constitué par un arbre à l'extrémité duquel est fixé un impulseur. Une telle configuration n'est possible que pour les liquides dont la viscosité est inférieure à 60 Pa.s.

L'impulseur peut provoquer un écoulement axial (voir fig.I.7 et 11) les types des écoulements) du liquide. Ce pourra alors être :

- ❖ Une hélice marine.
- ❖ Une hélice à pales sabre.
- ❖ Une turbine axiale (à palettes inclinées).

Si, au contraire, l'écoulement engendré est radial (voir fig.I.7 et 11) les types des écoulements), on aura affaire à une turbine radiale.

Les impulseurs axiaux provoquent une circulation importante du liquide dans la cuve et c'est là leur intérêt. En revanche, les impulseurs radiaux sont choisis parce qu'ils tournent vite et créent à leur périphérie un taux de cisaillement élevé.

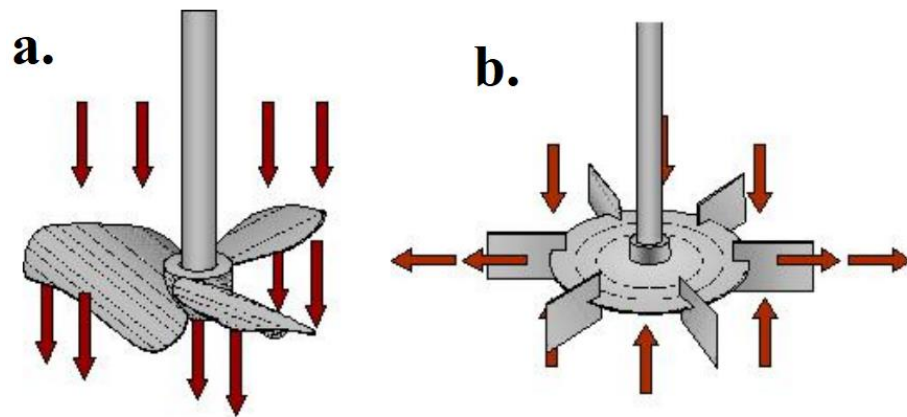


Fig .1.7 : Le flux agité, a : axial en utilisant une hélice marine, b : radial en utilisant une turbine.[12]

I.8.1.1. Les impulseurs axiaux (circulants) :

Ces impulseurs sont utilisés pour provoquer une circulation importante dans la cuve. Le liquide descend le long de l'axe et remonte le long des parois de la cuve. Il en résulte que cet impulseur convient bien pour homogénéiser une solution et pour mettre ou maintenir un solide en suspension. La vitesse de rotation varie entre 200 et 1 500 rev.mn. La viscosité du produit ne doit pas dépasser 8 Pa.s pour une hélice marine. L'impulseur est généralement placé au tiers du niveau liquide à partir du fond de cuve.

Il existe une variété de ces impulseur tels que (voir fig.I.8) :

- L'hélice marine.
- L'hélice à pales sabre ou hypercirculateur fonctionne selon le même principe que l'hélice marine, mais ses trois pales sont découpées dans de la tôle.
- L'impulseur à quatre palettes inclinées à 45 degrés sur l'horizontale.

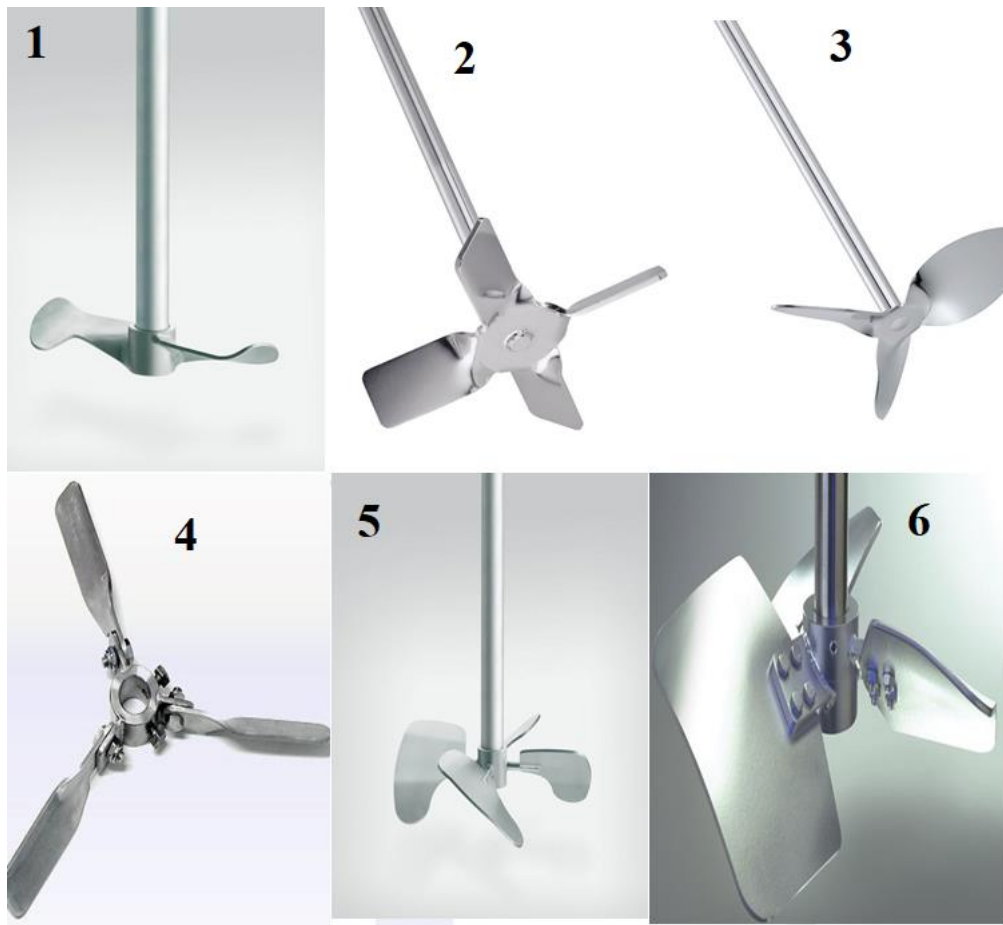


Fig .I.8 : Les impulseurs axiaux, en haut les hélices marines, 1 : à deux pales, 2 : à quatre pales, 3 : à trois pales. En bas les hélices à pales sabre ou hypercirculateur, 4 : à trois pales, 5 : à quatre pales, 6 : à trois pales larges [13]

I.8.1.2. Les impulseurs radiaux (cisailants) :

La turbine à palettes comporte un disque dont le diamètre est les $\frac{3}{4}$ de celui de l'impulseur complet. Encastrées à la périphérie, sont disposées six palettes rectangulaires verticales dont la longueur est de $\frac{d}{4}$ et la hauteur $\frac{d}{5}$ (d est le diamètre de l'impulseur complet). L'emploi principal de cette turbine est la dispersion d'un gaz. Ces turbines ne sont utilisables que dans des liquides très fluides peu visqueux.

La turbine à barreaux comporte, un disque de diamètre égal à $\frac{3d}{4}$. A la périphérie de ce disque sont soudés six barreaux radiaux horizontaux dont la longueur est $\frac{d}{4}$ et la section carrée de côté $\frac{d}{20}$. Cet impulseur est utilisé pour disperser un liquide immiscible dans un autre.

On peut également utiliser cet appareil pour déchiqueter et disperser un solide fibreux dans un liquide. Il s'agit alors d'une turbine dilacératrice.

La roue à pales inclinées a tendance à pomper le fluide de forage vers le bas, ou le fond du compartiment. Les pales sont inclinées à un angle de 45 à 60 degrés par rapport à l'arbre vertical. Le mouvement de rotation provoque un certain flux radial mais les pales tirent le fluide de forage du haut du compartiment et le forcent à frapper le fond du compartiment. Le fluide s'écoule alors radialement à travers le fond du réservoir et sur les côtés du réservoir. Ces hélices doivent être placées à environ deux tiers à trois quarts du diamètre des pales à partir du fond du compartiment. (Voir fig.I.9) [14]

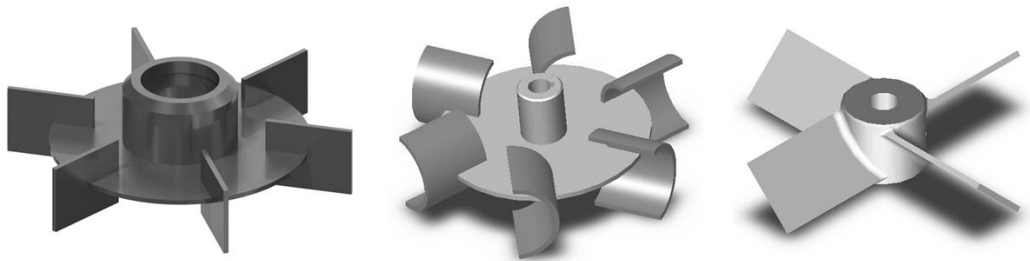


Fig.I.9 : Les impulseurs radiaux : Turbines, à gauche : turbine Rushton, à pales droits, au milieu : turbine de Smith, à droite : turbine à pales inclinées [15]

- **Pales exclusives :**

C'est des pales à pas variable (Fig.I.10) qui favorisent les schémas d'écoulement radial et axial (voir fig.I.11 les types des écoulements). L'inclinaison et le pas de chaque pale déterminent si un flux radial ou un flux axial plus ou moins. Ces hélices transmettent généralement moins de force de cisaillement au fluide que les pales à un seul plan.

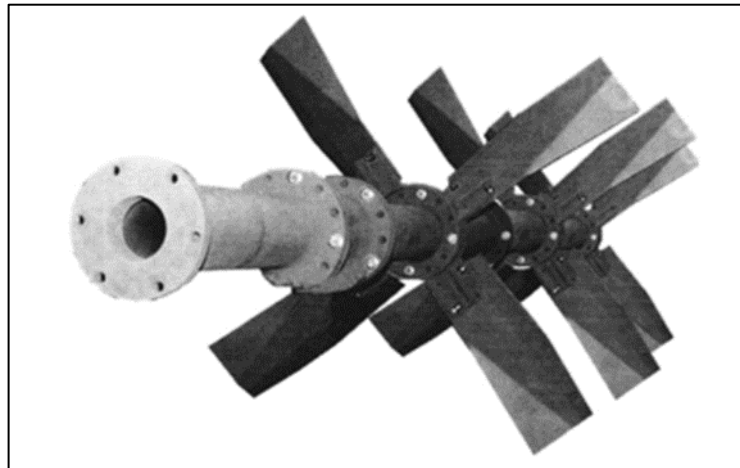


Fig.I.10. : Pales de contour boulonnées au moyeu, montées sur un arbre creux.[16]

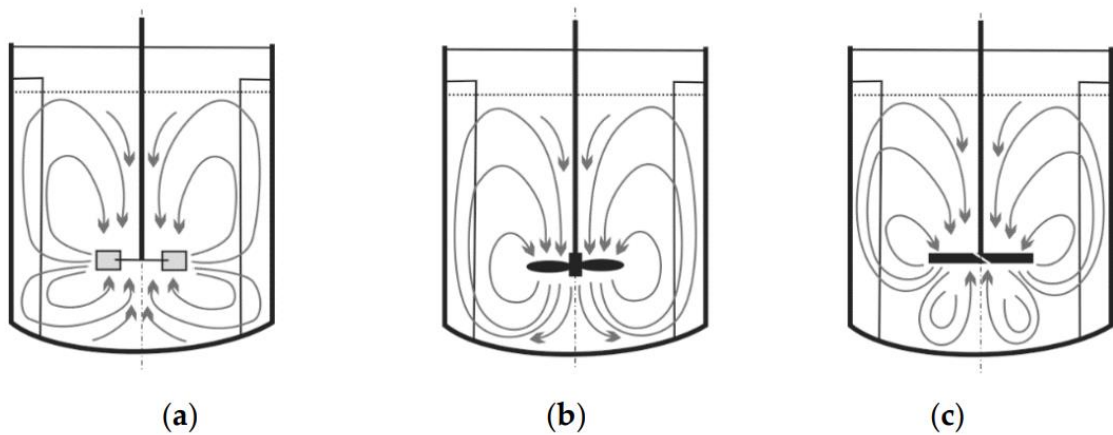


Fig.I.11. : Contours des écoulements en agitation, a : écoulement radial, b : écoulement axial, c : écoulement mixte.[17]

1.8.2. Les Compartiments :

Les agitateurs sont plus efficaces lorsqu'ils sont placés dans des compartiments ronds ou carrés de taille symétrique. Carrés de taille symétrique. Les compartiments ronds sont idéaux car il n'y a pas de place pour que les solides de se déposer. Cependant, peu d'entrepreneurs disposent de réservoirs ronds. Mais, pour une raison quelconque, la plupart des entrepreneurs ont des réservoirs rectangulaires. [16]

I.9. Les régimes d'écoulement :

Dans tous les dispositifs de mélange de liquide, il est nécessaire d'avoir deux éléments. Premièrement, il doit y avoir un écoulement global ou convectif afin qu'aucune région stagnante n'existe à l'intérieur du dispositif. Deuxièmement, il doit y avoir une région de mélange intensif ou à cisaillement élevé qui est capable de fournir la réduction des inhomogénéités ou l'amélioration du processus de vitesse requise par l'agitation. Ces deux éléments nécessitent de l'énergie pour les maintenir. La proportion d'énergie allant à chacun, dépend de l'application particulière, quelle que soit sa distribution, l'énergie mécanique est finalement dissipée sous forme de chaleur.

Comme dans la plupart des situations d'écoulement de fluide, les régimes peuvent être caractérisés comme laminaires ou turbulents. Dans les récipients de mélange, il y a une région substantielle entre les deux, représentant une transition de l'un à l'autre. Il est commode de décrire les mécanismes de mélange dans des conditions d'écoulement laminaire ou turbulent car ils sont assez différents à bien des égards.

I.9.1. Le régime laminaire :

En général, les liquides à haute viscosité sont associés à un flux laminaire. Pour maintenir un régime d'écoulement vraiment laminaire, une viscosité supérieure à environ 10 Pa.s est nécessaire à des débits d'apport d'énergie typiques. Les fluides ayant une telle viscosité sont souvent complexes du point de vue rhéologique. Dans un flux laminaire, la force d'inertie diminue rapidement en raison de l'effet de la viscosité élevée. Par conséquent, pour obtenir un mouvement de masse adéquat, les turbines rotatives doivent occuper une proportion importante de la cuve. Lorsque le mélange avance, la taille ou l'échelle des éléments fluides purs diminue en raison de l'écoulement ou de la redistribution, tandis que la différence de concentration entre les éléments diminue également en raison de la diffusion moléculaire. Cette différence est encore réduite en même temps que la surface disponible pour la diffusion augmente avec la diminution de la taille des éléments. [18]

I.9.2. Le régime turbulent :

Lorsqu'un fluide est versé en vrac dans une cuve de mélange contenant des hélices rotatives, l'écoulement est considéré comme turbulent si la viscosité du fluide est inférieure à environ 10mPa.s.

Lorsque l'impulseur se met en rotation, il confère une inertie suffisante au fluide pour circuler facilement dans tout le récipient et vers l'impulseur à nouveau. Ce processus de circulation conduit à une diffusion tourbillonnaire turbulente, qui est la plus intense dans la région de l'impulseur. Contrairement au régime laminaire, la diffusion tourbillonnaire permet un mélange beaucoup plus rapide. Bien que la diffusion moléculaire soit nécessaire pour une homogénéisation à l'échelle moléculaire, elle se produit beaucoup plus rapidement dans les fluides à faible viscosité que dans les matériaux à haute viscosité. Ainsi, le processus de mélange global jusqu'à l'échelle moléculaire dans un écoulement turbulent est beaucoup plus rapide en comparaison avec un écoulement laminaire. [19]

I.9.3. Nombre de Reynolds :

Du nombre de Reynolds pour un liquide non newtonien égale a :

$$R_e = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} \quad (I.8)$$

En intégrant la définition de la viscosité apparente de l'équation (I.9), dans l'équation qui interprète la loi de puissance (I.10) :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_A} = K(\dot{\gamma}_A)^{n-1} \quad (I.9)$$

Si :

$$\dot{\gamma}_A = K_S N \quad (I.10)$$

L'équation (I.11), devient :

$$\mu_a = K(k_S N)^{n-1} \quad (I.11)$$

En remplaçant la viscosité apparente dans l'équation (I.12), où le nombre de Reynolds pour un fluide pseudoplastique soit égale à :

$$R_e = \frac{N D^2 \rho}{K(k_S)^{n-1}} = \frac{N^{2-n} D^2 \rho}{K(k_S)^{n-1}} \quad (I.12)$$

I.10. Les cavernes :

La première fois que le terme caverne a été utilisé, c'était en 1975 par Wichterle et Wein pour décrire le comportement autour de la roue d'un fluide pseudoplastique .

La caverne est le volume agité entouré de fluide stagnant. Pour un liquide pseudoplastique, la caverne où le mélange a lieu est située près de la roue où le taux de cisaillement appliqué est élevé. Fluide stagnant signifie qu'il n'y a pas d'échange de matière dans le fluide autrement que par diffusion (voir fig.I.12).

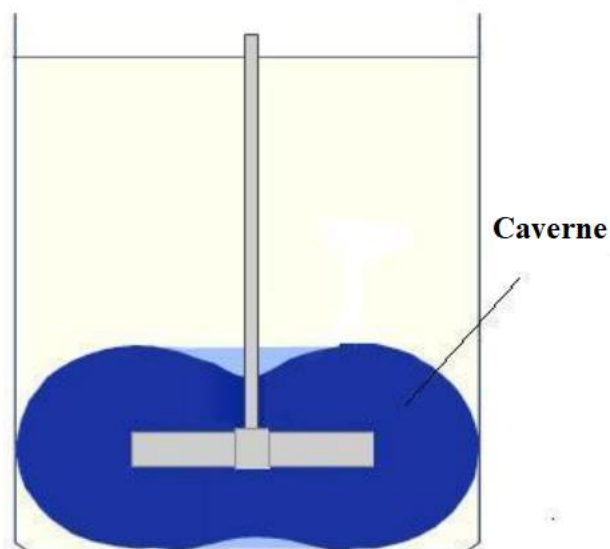


Fig.I.12 : la caverne du fluide pseudoplastique.

Des observations ont été faites avec un colorant injecté dans une caverne, elles ont montré qu'il n'y avait pas d'échange de colorant pendant des heures avec une vitesse de turbine constante entre la caverne et la zone stagnante. La surface de la caverne est située là où le taux de cisaillement des liquides est égal à la contrainte de cisaillement appliquée par l'agitateur.

Amanullah a proposé en 1998 un modèle de calcul du diamètre de la caverne pour les liquides non newtoniens avec des roues à flux axial :

$$D_C = \left[4v_c \left(\frac{2}{n-1} \right) \left(\frac{4\pi^2 K}{F_t} \right)^{\frac{1}{n}} + b^{\frac{(n-2)}{n}} \right]^{\frac{n}{(n-2)}} \quad (I.13)$$



Chapitre II :
Problématique

L'utilisation d'un agitateur de boue est essentielle pour remuer et mélanger le fluide de forage, afin d'empêcher toute particule solide de se déposer dans le réservoir. En raison de la complexité de l'écoulement réel dans un réservoir de mélange, une méthode pratique pour pré-évaluer l'opération d'agitation est la simulation d'écoulement, par la dynamique des fluides computationnelle (CFD) en utilisant des codes tels que l'Ansys-Fluent, le Comsol, etc. Cette méthode permet également d'optimiser la conception de l'agitateur de boue, notamment en ce qui concerne la puissance du moteur et la conception de l'arbre et de la roue.

Ce chapitre, comprend la modélisation mathématique et numérique d'un agitateur de boue, simulé à un petit modèle, plus l'étude de maillage.

II.1. Description de la problématique :

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement hydraulique de la boue de forage en agitation.

L'agitateur de la plateforme ENAFOR 57– BOG 12 est pris comme modèle pour cette étude. Par similitude, le système d'agitation (agitateur + réservoir) est réduit 8000 fois par rapport à son volume réel, selon les hypothèses et les caractéristiques suivantes :

- La boue de forage est considérée
 - Un fluide non newtonien, obéit par la loi de puissance
 - Un fluide biphasique (solide + liquide) : la poudre de la bentonite + l'eau
- L'écoulement est turbulent, permanent et incompressible
- La puissance du moteur électrique égale à 20 HP
- La longueur et le diamètre de l'arbre de rotation sont égaux aux 2.1 m et 0.1m, respectivement
- L'agitateur est une turbine de Rushton, à quatre pales inclinées de 30° avec un diamètre de roue de 0.3 m. La longueur et la largeur des pales mesurent respectivement 0.28 m et 0.18m tels que présentés dans la (Fig.II.1).
- Le réservoir est sous forme d'un parallélépipède rectangulaire de 5,22 m de longueur, 4,06 m de largeur et 2,65 m de hauteur (voir fig.II.2 et Tab.II.1).

- L'agitateur est positionné de manière excentrée pour empêcher les vortex. Cette position est recommandée pour les fluides non newtoniens agités par une turbine.

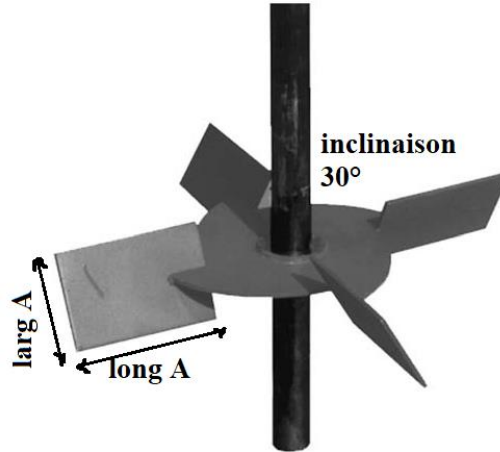


Fig. II.1 : l'agitateur de la boue de forage réel (ENAFOR 57 – BOG 12).

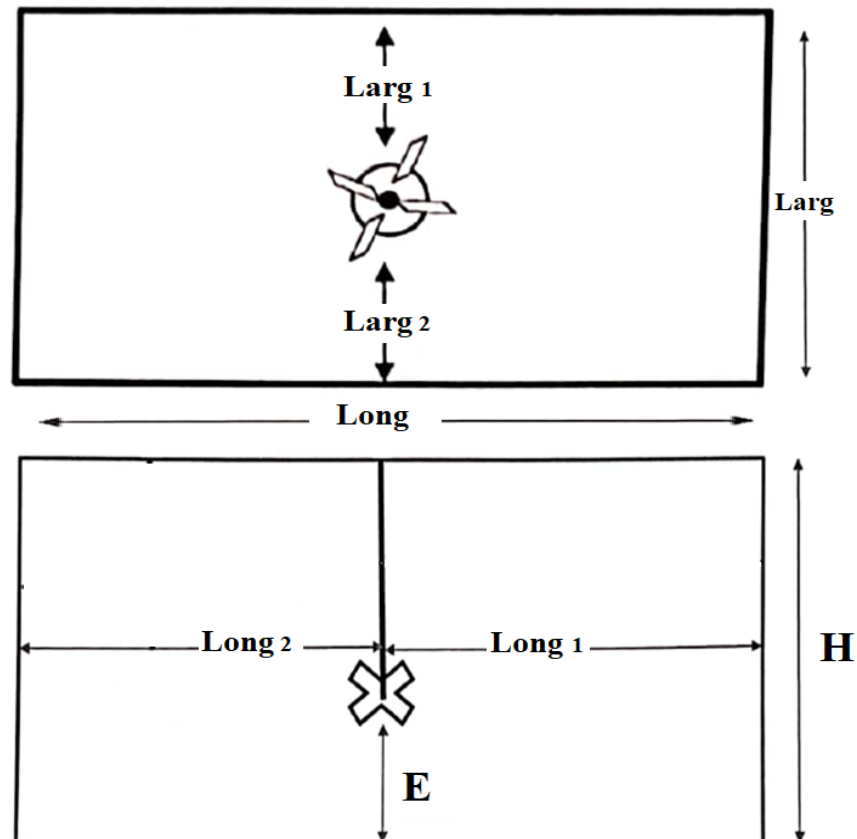


Fig.II.2 : La position de l'agitateur par rapport à la longueur et largeur du bac, projection horizontale (en haut) et verticale (en bas).

Tab.II.1 : Les dimensions du réservoir et des pales de turbine.

	E	Long 1	Long 2	H	Larg 1	Larg 2	D_A
Réel (m)	0.55	2.64	2.58	2.65	1.88	2.18	0.86
Simulé (cm)	2.75	13.2	12.9	13.25	9.4	10.9	4.3

II.2. La similitude de l'agitateur de la boue de forage :

Afin de réduire la durée d'exécution du logiciel et nombre des expériences sans perdre la généralité des informations attendues des résultats. De ce point de vue, l'agitateur de la boue de forage est simulé à un modèle plus petit de 8000 fois de son volume réel (voir fig.II.1-2 et Tab.II.1)

❖ Calcul du diamètre de l'agitateur maquette (D_{A2}):

$$V_{\text{réservoir}} = \text{Longueur} \cdot \text{Largeur} \cdot \text{Hauteur} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{\text{réel}} = 5.22 \cdot 4.06 \cdot 2.65 = 56 \text{ m}^3 ; \quad D_{A1} = 0.86 \text{ m}$$

$$V_{\text{maquette}} = 13.25 \cdot 20.3 \cdot 26.1 = \frac{56}{8000} = 7 \text{ dm}^3 ; \quad D_{A2} = ?$$

Avec :

$V_{\text{réel}}$ est le volume du réservoir réel

V_{maquette} est le volume du réservoir simulé

D_{A1} est le diamètre de turbine réel

D_{A2} est le diamètre de turbine simulée

Géométriquement le volume du réservoir est proportionnel au (diamètre de turbine)³ [1]

Donc:

$$D_{A1}^3 = 8000 D_{A2}^3 \Rightarrow D_{A2} = \sqrt[3]{\frac{D_{A1}^3}{8000}} = 0.043 \text{ m}$$

❖ Calcul de la vitesse de rotation de l'agitateur maquette (N_2) [23] :

$$N_1 D_{A1} = N_2 D_{A2} \quad (\text{II.2})$$

$$\Rightarrow D_{A2} = \frac{N_1 D_{A1}}{N_2}$$

Où :

N_1 est la vitesse de rotation de l'agitateur réel

N_2 est la vitesse de rotation de l'agitateur simulé

L'agitateur en trois dimensions est conçu dans le code Solid Works 2019, le réservoir et le montage du système ont été réalisés dans Ansys Design Modeler (voir fig.III.3-4. a-c)

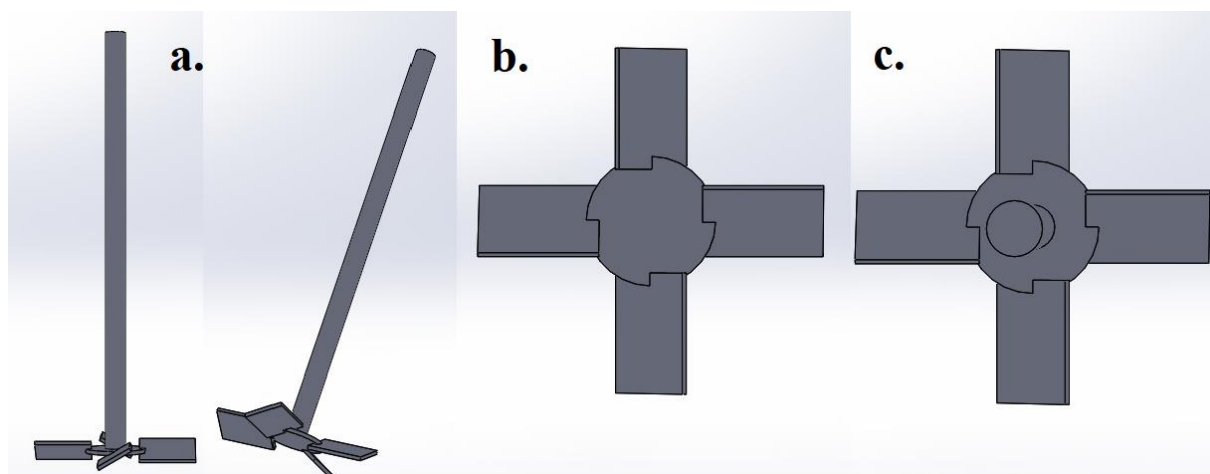


Fig.II.3 : l'agitateur modèle, a : la projection verticale, b : la projection horizontale en bas, c : la projection horizontale en haut.

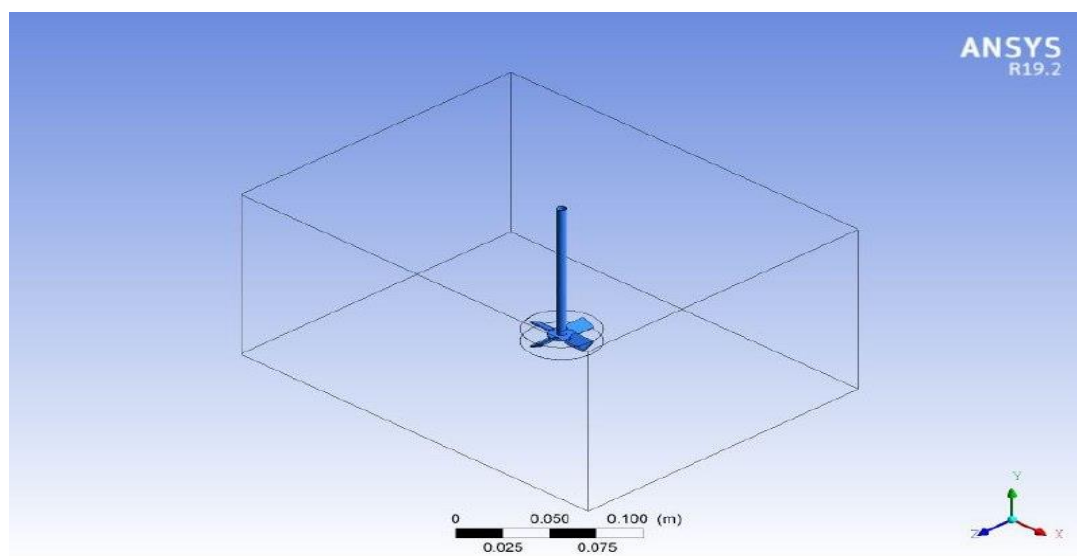


Fig.II.4. a : le système d'agitation en trois dimensions.

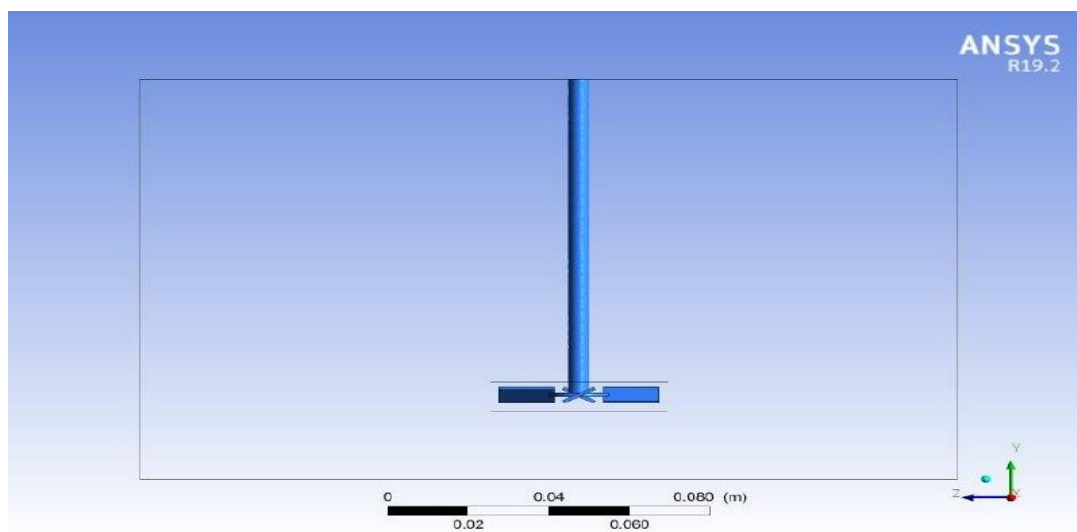


Fig.II.4. b : Une projection verticale du système d'agitation.

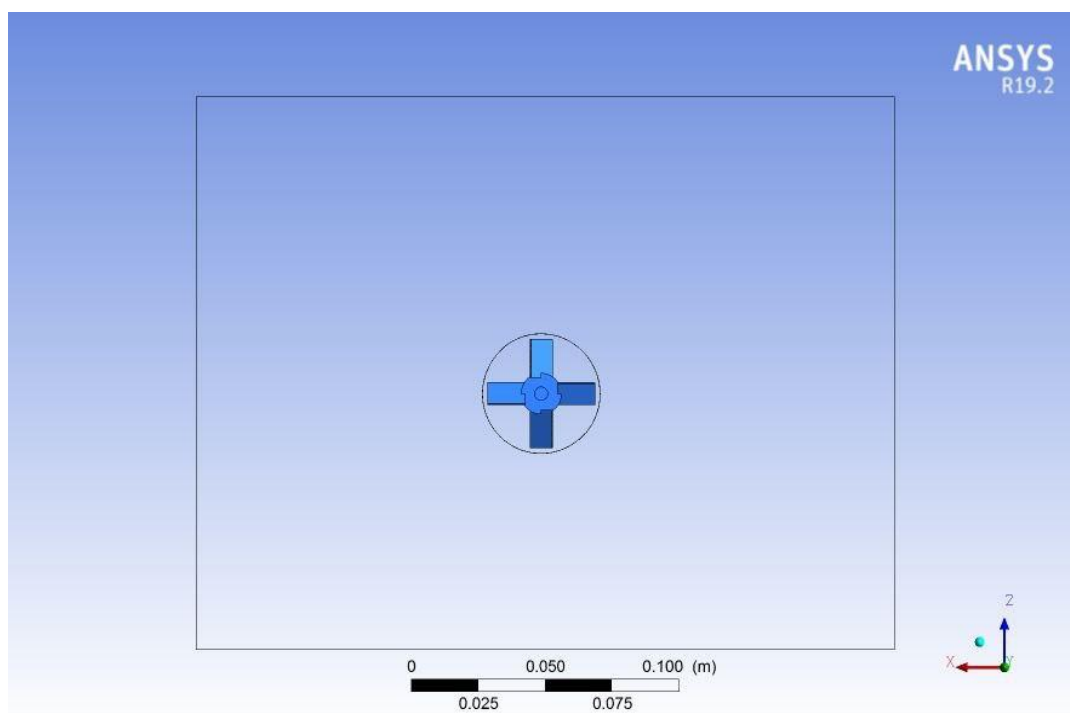


Fig.II.4.c : Une projection horizontale du système d'agitation.

II.3. Formulation mathématique :

Le bilan hydrodynamique tridimensionnel de ce système d'agitation d'un écoulement turbulent, permanent et incompressible est gouverné par les équations suivantes :

❖ En régime turbulent :

▪ L'équation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \quad (\text{II.3})$$

Dont :

$$u = \bar{u} + u' ; \quad v = \bar{v} + v' ; \quad w = \bar{w} + w' ; \quad P = \bar{P} + P'$$

Le symbole $\overline{(\quad)}$ figure l'opérateur de moyenne statistique ou moyenne d'ensemble et le symbole $(\quad)'$ désigne les fluctuations ou les écarts par rapport à ces moyennes.

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} ; \quad \varepsilon = \nu_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)} ; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{II.4})$$

Où

ν_T est la viscosité turbulente

▪ L'équation de quantité de mouvement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

II.4. Formulation numérique et méthode de Résolution :

La résolution de l'ensemble des équations gouvernantes (II.3) et (II.4) de ce système d'écoulement, est effectuée par la méthode numérique des volumes finis. En utilisant le code Ansys-Fluent 19.2.

II.4.1. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre de manière approximative les équations aux dérivées partielles. Elle repose sur un maillage constitué de petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) qui couvrent le domaine d'étude.

Bien que les volumes finis puissent être construits autour de points d'un maillage initial, cela n'est pas obligatoire .

En mécanique des milieux continus, cette méthode présente plusieurs caractéristiques clés, sont :

- Une approche physique basée sur le bilan des flux.
- Une formulation conservative.
- Une adaptation à des géométries quelconques.
- L'existence de plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires.
- L'utilisation par plusieurs codes commerciaux en mécanique tels que Fluent et CFX.

II.4.2. Le solveur AnsysFluent :

Les schémas du solveurs fluent utilisés pour résoudre les équations différentielles qui gèrent ces systèmes d'écoulement sous les conditions aux limites citées ci-dessous sont :

- Pour déterminer le couplage champ de pression-champ de vitesse : le schéma SIMPLE
- Le schéma seconde ordre upwind, pour la discrétisation des termes convectifs dans l'équation dynamique, l'équation de taux de dissipation et l'équation de l'énergie cinétique.

II.4.3. Le modèle k-epsilon de turbulence :

Le modèle de turbulence k-epsilon est l'un des modèles de turbulence les plus populaires utilisés dans la simulation numérique de dynamique des fluides (CFD). Ce modèle est basé sur une approche de deux équations pour le transport de l'énergie cinétique turbulente et la dissipation d'énergie.

Sa première équation décrit la variation de l'énergie cinétique turbulente (k) dans les différents points du domaine de simulation. Cette énergie est générée par les éléments turbulents du flux et elle est ensuite transportée par ce même flux. Cette énergie cinétique turbulente est ensuite dissipée par les forces de frottement et elle est convertie en énergie thermique.

Sa seconde équation décrit la variation de la dissipation de l'énergie turbulente (epsilon) dans le domaine de simulation. Cette équation décrit la diminution de l'énergie cinétique turbulente qui se produit dans le domaine de simulation en raison de la dissipation d'énergie turbulente en raison des forces de frottement.

Le modèle k-epsilon est souvent utilisé pour simuler des écoulements dans des domaines de géométrie complexe. C'est un modèle relativement simple à utiliser et les résultats sont souvent précis pour les écoulements d'ingénierie.

II.4.4. Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites appliquées sur l'agitateur sont mentionnées dans le tableau II.2.

Tab.II.2 : Les conditions aux limites appliquées sur l'agitateur.

	Les conditions aux limites
Aux Parois du réservoir	Vitesse du fluide s'nulle
Aux Parois d'agitateur	Vitesse de rotation de l'agitateur [RPM]

II.4.5. Le maillage :

Le choix de maillage est une étape cruciale dans la simulation numérique de phénomènes physique. Il consiste à diviser la géométrie des pièces à simuler en un ensemble de petits éléments, appelés éléments finis, qui permettant de discrétiser le domaine de calcul. Le choix du maillage est donc une étape importante dans la simulation numérique, car il peut avoir un impact significatif sur la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

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

1. La géométrie et la taille du domaine.
2. Les caractéristiques physiques du phénomène étudié.
3. Le temps de calcul nécessaire.
4. Les limites du logiciel de calcul.

II.4.5.1. Types de maillage :

❖ **Tetrahedron :**

Le maillage tétraédrique est un type de maillage qui utilise des tétraèdres pour diviser l'espace en éléments finis. Les tétraèdres sont des polyèdres à quatre faces triangulaires. Ce type de maillage est souvent utilisé pour modéliser des géométries complexes, telles que des formes organiques ou des fluides.

❖ **Hexahedron :**

Le maillage hexaédrique est un type de maillage qui utilise des hexaèdres pour diviser l'espace en éléments finis. Les hexaèdres sont des polyèdres à six faces quadrangulaires. Ce type de maillage est souvent utilisé pour modéliser des géométries régulières, telles que des boîtes ou des structures rectangulaires.

❖ **Prism/wedge :**

Le maillage prismatique est un type de maillage qui utilise des prismes pour diviser l'espace en éléments finis. Les prismes sont des polyèdres à cinq faces, avec deux faces triangulaires et trois faces quadrangulaires. Les maillages en coin (wedge) sont similaires aux maillages prismatiques, mais avec une face triangulaire et deux faces quadrangulaires. Ce type de maillage est souvent utilisé pour modéliser des géométries avec des surfaces planes inclinées, telles que des ailes d'avion.

❖ **Polyhèdron :**

Le maillage polyédrique est un type de maillage qui utilise des polyèdres pour diviser l'espace en éléments finis. Les polyèdres peuvent avoir un nombre quelconque de faces, et peuvent être réguliers ou irréguliers. Ce type de maillage est souvent utilisé pour modéliser des géométries complexes avec des surfaces courbes ou des formes irrégulières.

❖ **Hybride :**

Le maillage hybride est un type de maillage utilisé en modélisation 3D qui combine différents types de maillages pour représenter des objets complexes. Il est souvent utilisé pour modéliser des objets qui ont une géométrie complexe et qui nécessitent un maillage plus fin près de certaines zones critiques. Le maillage hybride peut être constitué de différents types de maillages, tels que le maillage tétraédrique, le maillage hexaédrique, le maillage prismatique et le maillage pyramidal. [20]

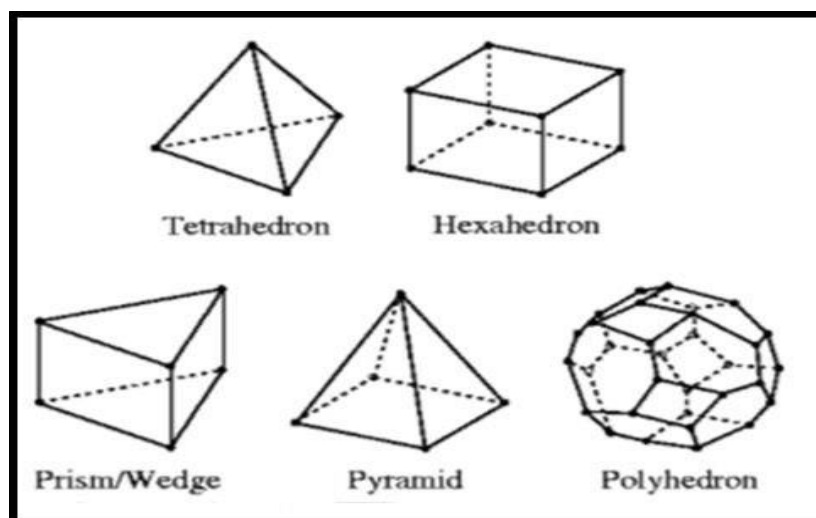


Fig.II.5 : Les types de maillage [21]

II.4.6. Indépendance de maillage :

Le maillage hybride a été choisi pour mailler l'agitateur et une étude a été menée pour tester l'indépendance du maillage en utilisant l'eau (voir Tab.II.3) comme fluide. L'écoulement est en régime turbulent. Le nombre des éléments de six maillages créés ainsi que le temps de calcul de chaque cas, sont résumés dans le tableau II.4.

Tab.II.3 : Les caractéristiques physiques de l'eau.

	L'eau
La masse volumique (ρ) [kg/m³]	998.2
La viscosité dynamique (μ) [kg/m.s]	0.001003
La conductivité thermique (λ) [W/m.s]	0.6
La chaleur spécifique (Cp) [j/kg.K]	4182

Pour choisir le maillage optimal pour réaliser ce travail, des profils de vitesse, pour chaque cas, sont tracés au niveau de la turbine, dans le plan yz.

La figure II.6 montre que tous les profils de vitesse se superposent avec une marge d'erreur très faible.

Le maillage sélectionné pour simuler l'agitateur était celui du troisième cas (voir le tableau II.3), en raison de son temps de calcul le plus court par rapport aux autres cas.

Le maillage du troisième cas comporte 515208 éléments et 119706 mailles avec des raffinements aux niveau des parois du réservoir et du domaine intérieure qui renferme la turbine (voir fig.II.7. a-d).

Tab.II.4 : Récapitulation du maillage traité.

Maillage	Nbr des éléments	Nbr des mailles	Temps de calcul (h:min:s)
Cas 1	461513	100341	07 :05 :00
Cas 2	457526	98008	05 :06 :25
Cas 3	515208	119706	05 :03 :31
Cas 4	502364	112756	05 :04 :05
Cas 5	760053	203478	07 :14 :44
Cas 6	708991	177031	07 :14 :08

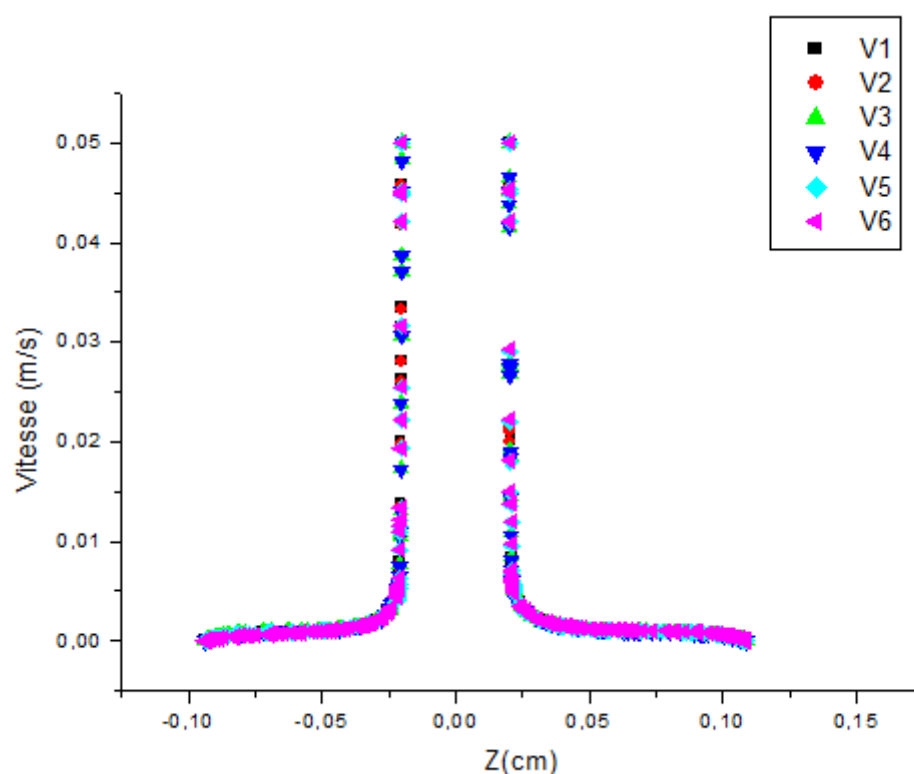


Fig.II.6 : les profils de vitesse, au niveau de la turbine, dans le plan yz, de six cas étudiés.

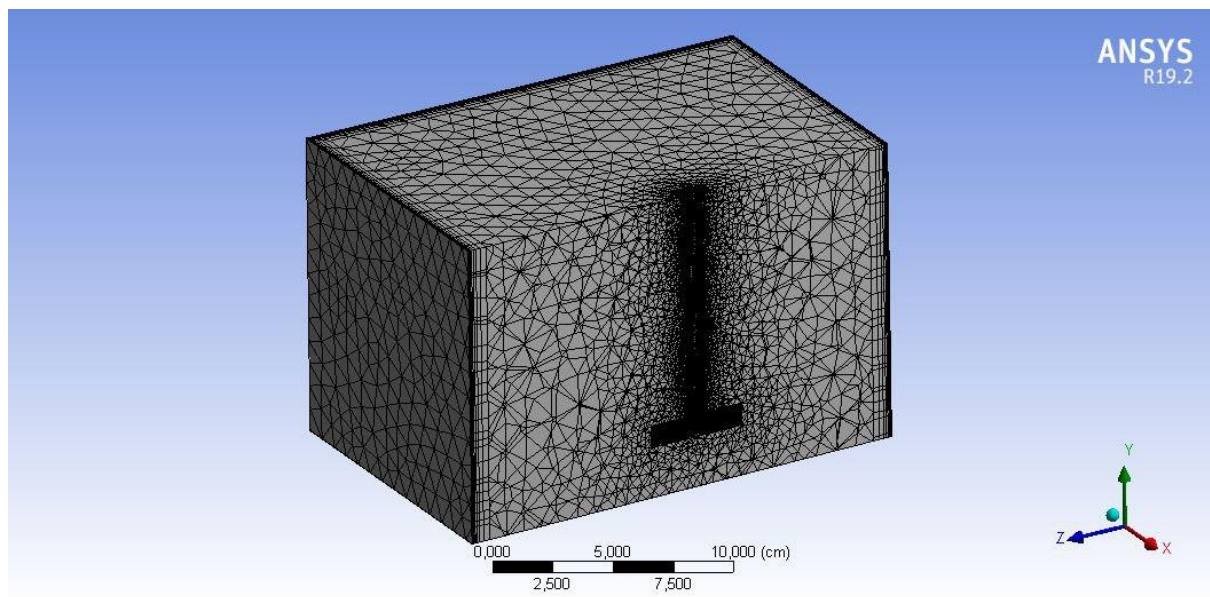


Fig.II.7.a : Le maillage du 3^{ème} cas, une vue tridimensionnelle avec une coupe dans le plan yz.

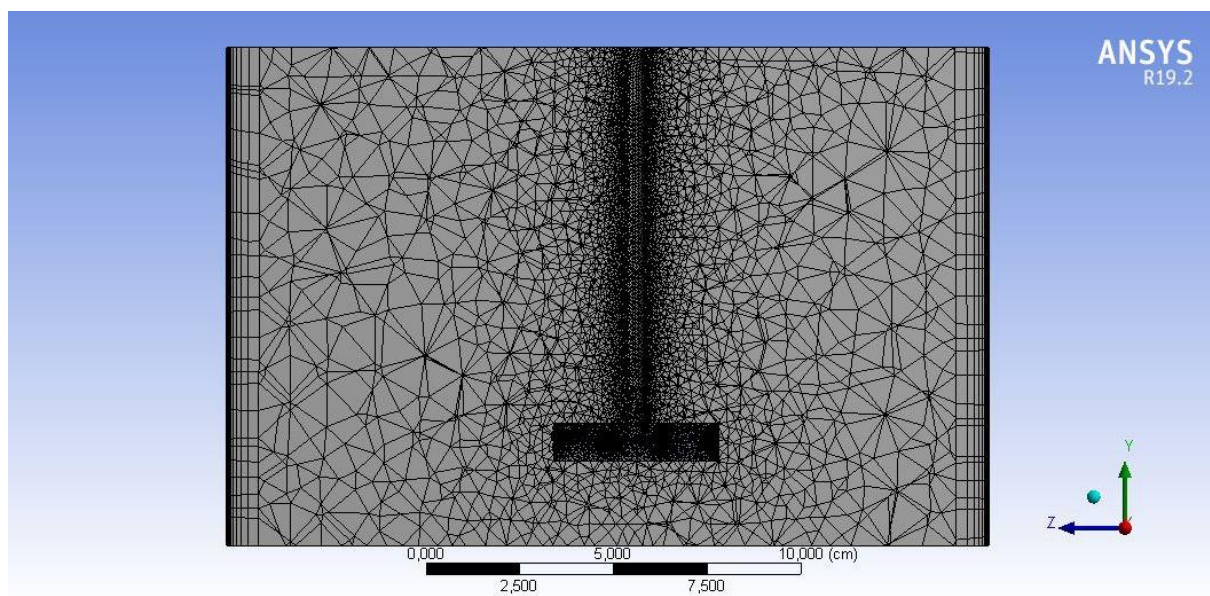


Fig.II.7.b : Le maillage du 3^{ème} cas, projection dans le plan yz.

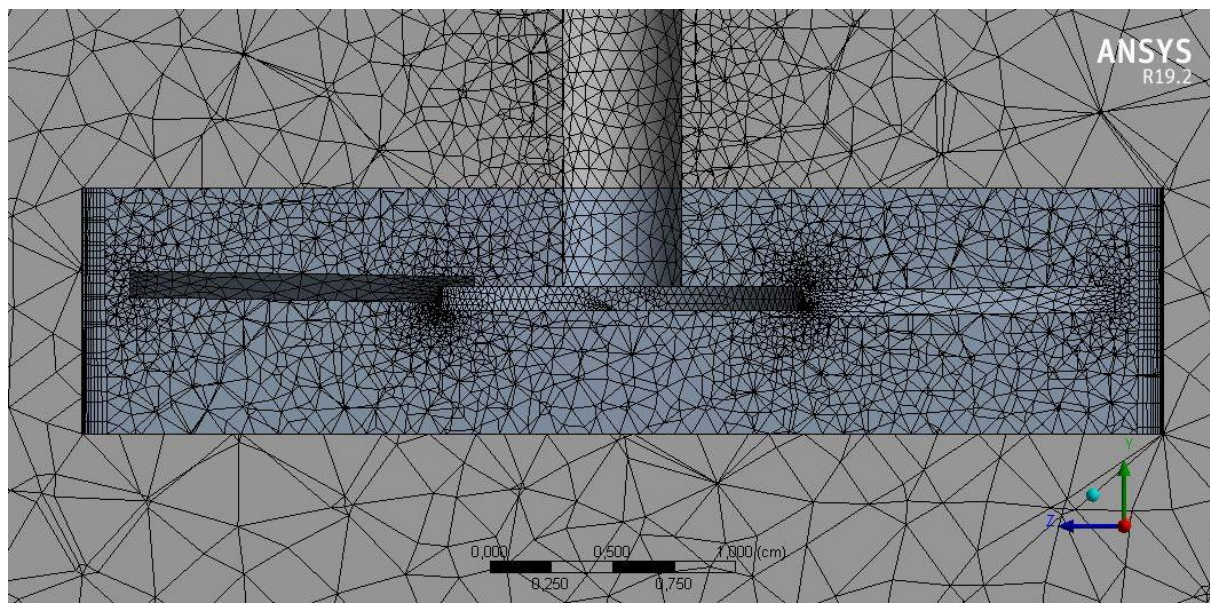


Fig.II.7.c : Le maillage du 3^{ème} cas, projection dans le plan yz, la turbine.

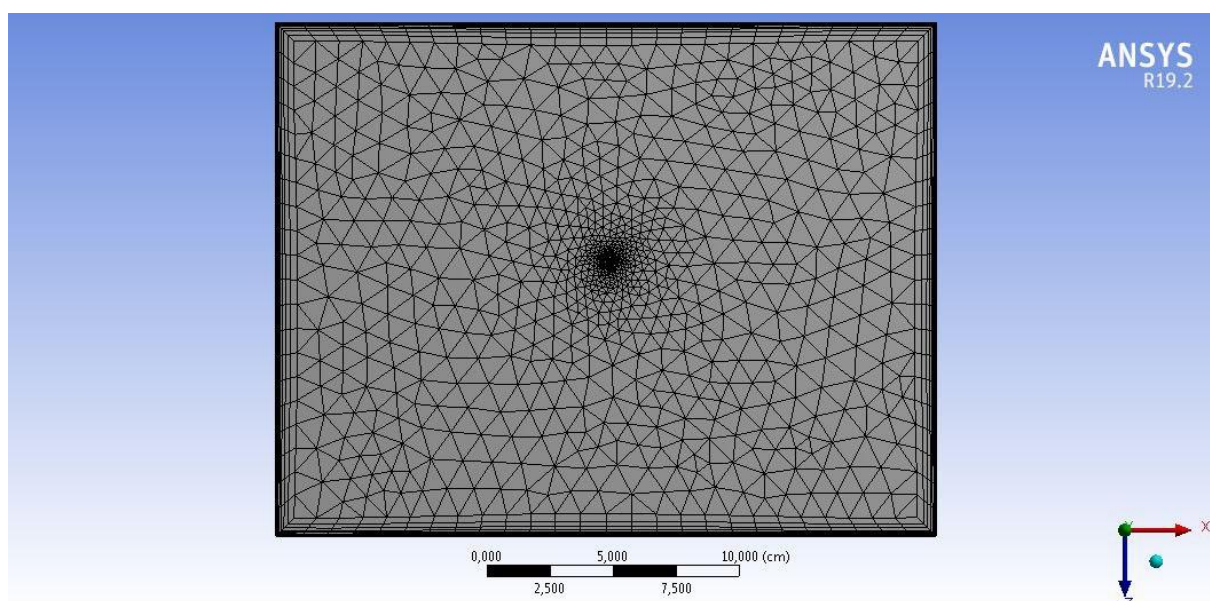


Fig.II.7.d : Le maillage du 3^{ème} cas, projection dans le plan xz.

Chapitre III :

Résultats et discussions

L'inclusion de divers cas dans une étude est cruciale pour appréhender les phénomènes de manière plus approfondie et pour une meilleure interprétation.

Ce chapitre représente l'étude de l'écoulement hydrodynamique turbulent par un agitateur en utilisant la boue de forage.

III.1. Hypothèses et conditions aux limites :

L'écoulement dans le modèle d'agitation est considéré turbulent, incompressible et permanent.

- Le fluide utilisé est non newtonien, obéit par la loi de puissance. Les caractéristiques physiques de ce fluide sont mentionnées dans le tableau III.1.

III.2. Résultats et discussions :

III.2.1. Les profils de vitesse :

Pour comprendre le comportement de la boue de forage durant son agitation, le travail est réparti selon deux propositions :

- Un fluide non newtonien pseudoplastique obéit par la loi de puissance. Les vitesses étudiées sont : la vitesse simulée ($V1$) à la vitesse réelle de l'agitateur étudié, prise du catalogue du matériel utilisé dans la plateforme en question cité précédemment. Plus deux vitesses proposées pour voir les effets d'augmentation ($V2$) et de diminution ($V3$) de cette vitesse sur l'agitation
- Un fluide biphasique, un mélange solide-liquide à la vitesse $V1$

III.2.1.1. Fluide non newtonien pseudoplastique :

Comme ce fluide est homogène et il ne comporte pas des changements physiques significatifs à l'échelle de l'observation. Donc il est considéré comme monophasique où ses propriétés macroscopiques (comme la masse volumique, la viscosité, la pression, etc..) peuvent être comme uniformes. Les caractéristiques de la boue utilisées sont mentionnées dans le tableau III.1.

Tab.III.1 : Les caractéristiques thermos physiques de la boue de forage. [21]

	La boue de forage
La masse volumique (ρ) [kg/m³]	1030
La viscosité dynamique (μ) [kg/m.s]	--
La viscosité plastique (μ_p) [kg/m.s]	0.015
La conductivité thermique (λ) [W/m.s]	0.6
La chaleur spécifique (Cp) [j/kg.K]	4070

Les vitesses sont détaillées dans le tableau III.2, les vitesses réelles sont simulées par l'équation II.2.

Tab.III.2 : Les vitesses et les nombres de Reynolds étudiés.

Vitesses	V1	V2	V3
Réelles [Rpm]	73	120	50
Simulées [Rpm]	1460	2400	1000
Le nombre de Reynolds (Re)	14922	26363	9673

La figure III.2 montre un profil de vitesse radial, qui implique l'utilisation d'une turbine. La turbine, en agitation, produit un fort écoulement radial vers l'extérieur en créant des zones de circulation en haut et en bas du réservoir [1-23], qui est similaire un phénomène de pompage. En s'éloignant de la roue la vitesse du fluide décroît jusqu'elle s'annule auprès des parois du réservoir.

L'inertie conférée au liquide par l'impulseur est suffisante pour faire circuler le liquide dans tout le récipient, puis le fluide retourne vers l'impulseur, de nouveau. Des turbulences peuvent se produire dans tout le réservoir, mais elles seront plus importantes près de la roue.

Le mélange par diffusion tourbillonnaire est beaucoup plus rapide que le mélange par diffusion moléculaire et, par conséquent, le mélange turbulent se produit beaucoup plus rapidement que le mélange laminaire. [24]

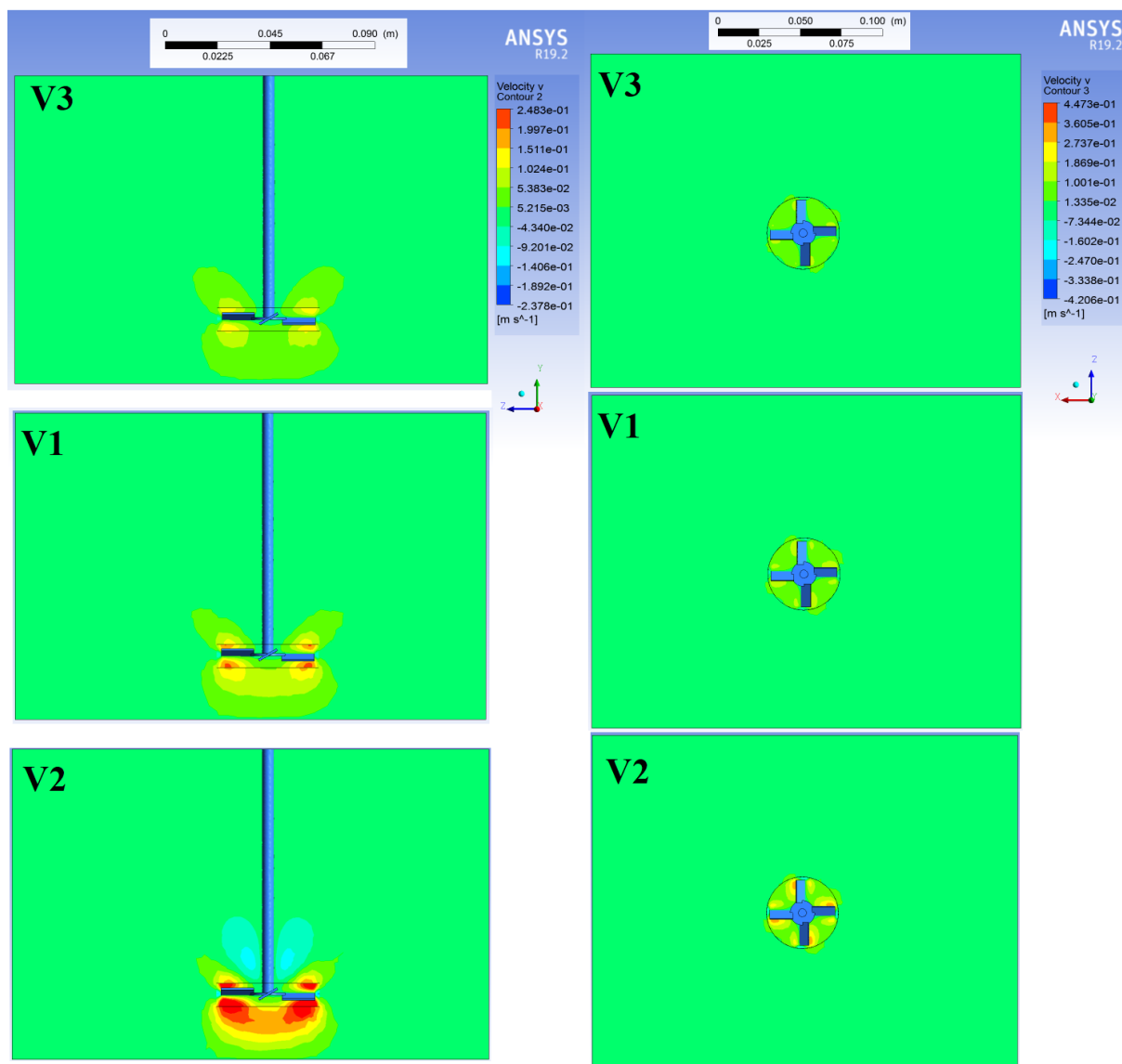


Fig.III.2 : Profile de vitesses radiales, à gauche : la projection verticale dans le plan YZ, à droite : la projection horizontale dans le plan XZ.

En technologie non newtonienne, l'étude de l'écoulement en agitation doit prendre en considération des taux de cisaillement ou contraintes de cisaillement. C'est une conséquence nécessaire du fait que la viscosité du fluide à une contrainte imposée n'est pas une constante mais elle dépend de l'amplitude du taux de cisaillement ou de la contrainte de cisaillement. La valeur ponctuelle du taux de cisaillement du fluide augmente très rapidement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la roue.[25]

Un autre facteur peut s'introduire pour étudier l'écoulement du fluide en agitation est la viscosité apparente, le rapport de la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement.

Généralement, les taux de cisaillement les plus élevés se trouvent dans la région de la roue et ils diminuent vers les parois du réservoir. Ainsi, pour un fluide pseudoplastique, la viscosité apparente est la plus faible dans la région de la roue et le mouvement du fluide diminue beaucoup plus rapidement pour un fluide pseudoplastique que pour un fluide newtonien à mesure que l'on se rapproche des parois du réservoir [24].

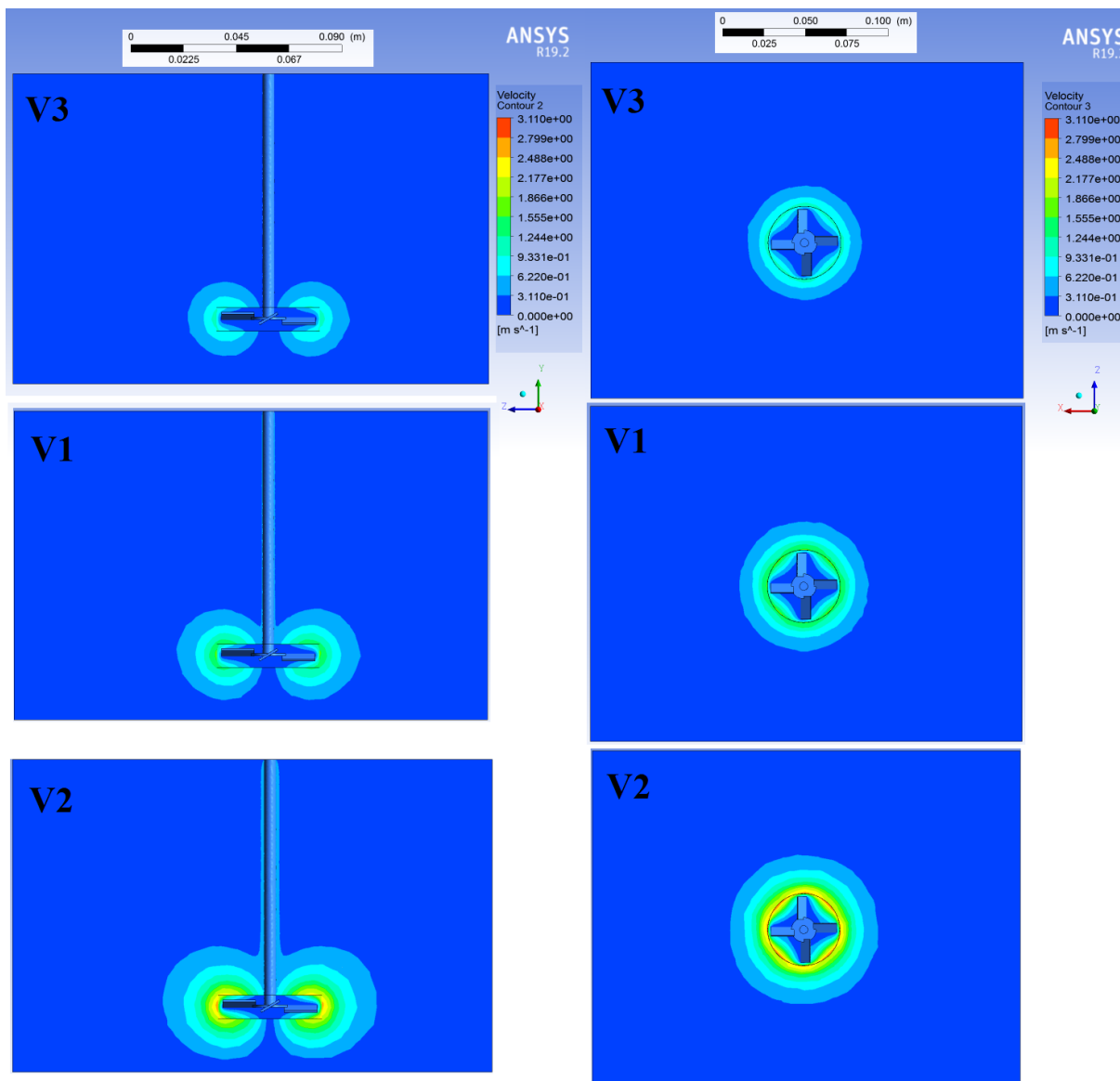


Fig.III.3 : Profile de vitesses, à gauche : la projection verticale dans le plan YZ, à droite : la projection horizontale dans le plan XZ.

Il existe aussi une proportionnalité quantitative entre la vitesse de la turbine et la génération des contraintes de cisaillement, interprété par les deux cas $V2 = 2400$ Rpm, et $V3 = 1000$ Rpm.

Pour un fluide pseudoplastique, l'existence d'un taux de cisaillement élevé auprès de la roue, fait apparaître une cavité, là où le volume du fluide fortement agité est entouré d'une couche stagnante (voir fig.III.4), ce qui signifie l'absence d'échange de matière dans le fluide autrement que par diffusion [12].

De tel phénomène peut se produire, du moins, dans la plupart des situations où l'écoulement du fluide n'est pas uniforme, quand la contrainte de cisaillement minimale devient inférieure à la contrainte d'écoulement du fluide. le mélange se comportera comme un solide dans les régions où la limite d'élasticité dépasse la contrainte de cisaillement, il se comportera comme un fluide dans le cas contraire.

D'après la figure III.2 -V3, deux cavités se situent auprès de l'arbre de rotation, sous forme d'anneau à structure fermée, dit une forme toroïdale. [23]

La dissipation des tourbillons turbulents

Un écoulement turbulent peut être considéré comme si, il contient un spectre de fluctuations de vitesse dans lequel des tourbillons de différentes tailles se superposent à un écoulement moyen global moyenné dans le temps.

Dans une cuve de mélange, il est raisonnable de supposer que les grands tourbillons primaires, d'une taille correspondant approximativement au diamètre de l'impulseur, donneraient lieu à de grandes fluctuations de vitesse avec une fréquence faible. Ces tourbillons sont anisotropes et représentent une grande partie de l'énergie cinétique existante dans le système. L'interaction entre ces tourbillons primaires et les courants lents produit des tourbillons plus petits de fréquence plus élevée qui subissent une désintégration supplémentaire jusqu'à ce que, finalement, les forces visqueuses provoquent la dissipation de leur énergie sous forme de chaleur.

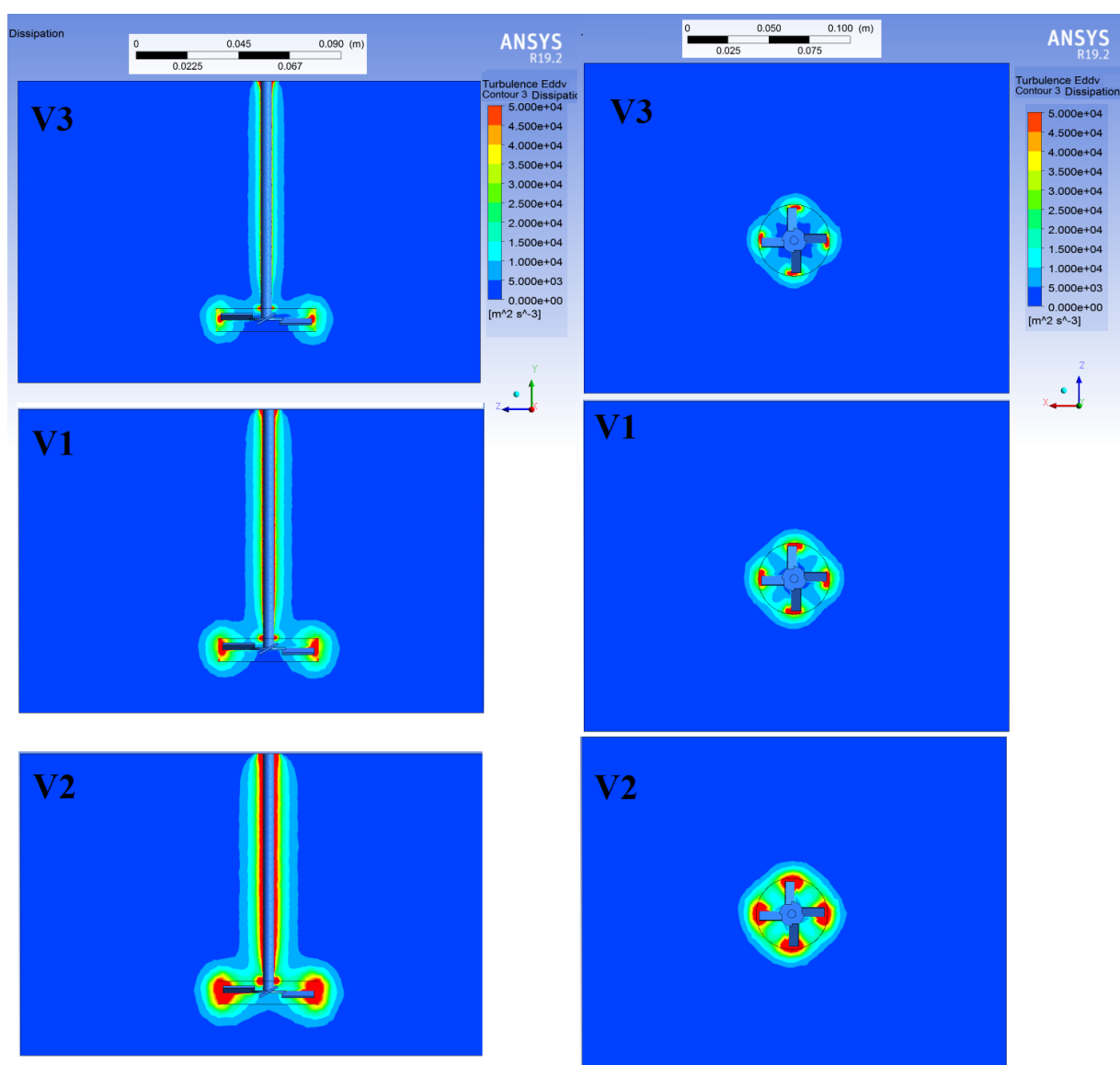


Fig.III.4 : Profile de dissipation des tourbillons, à gauche : la projection verticale dans le plan YZ, à droite : la projection horizontale dans le plan XZ.

Cette description est une grossière simplification, mais elle donne une représentation qualitative des principales caractéristiques du mélange turbulent. L'ensemble de ce processus est similaire à celui de l'écoulement turbulent d'un fluide à proximité d'une surface limite.[25]

Le mélange est plus rapide près d'une turbine en raison des taux de cisaillement élevés et des contraintes de Reynolds associées dans les tourbillons formés aux extrémités des aubes de la roue ; de plus, une grande partie de l'énergie y est dissipée [24], présenté dans la figure III.3, au niveau des pointes des aubes.

Les taux de consommation d'énergie nécessaires pour mettre en mouvement tout le contenu de la cuve est proportionnel au nombre de Reynolds [25]. De plus, il est possible que l'augmentation de la vitesse de rotation engendre une augmentation de la consommation d'énergie ou d'autres contraintes de conception ou de fonctionnement. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la vitesse de rotation de l'agitateur. Car, l'agitation à grande vitesse avec de petites turbines se dissipe inutilement l'énergie au niveau de la partie centrale de la cuve. [24]

En résumé, l'interprétation des profils de vitesse peut aider à évaluer l'efficacité de la conception de l'agitateur et du réservoir et de trouver la vitesse de rotation optimale, en assurant une totale agitation du fluide en minimisant les dissipations.

III.2.1.2. Fluide biphasique, la poudre de bentonite dispersée dans l'eau :

Ce cas est réalisé dans l'objectif de voir le comportement hydrodynamique du fluide de forage, lorsqu'il est considéré comme un fluide biphasique, en le comparant avec le fluide non-newtonien pseudoplastique monophasique, étudié ci-dessus.

La phase liquide est l'eau (voir Tab.II.3) et la phase solide est la poudre de bentonite.

Tab.III.3 : Les caractéristiques de la poudre de bentonite utilisé [26]

	Bentonite (poudre)
La masse volumique (ρ) [g/cm³]	2.6
La viscosité dynamique (μ) [kg/m.s]	1.7894E-05
Le diamètre de grain [cm]	0.001

Le modèle multiphase utilisé est le modèle Eulérien, à la vitesse V1. Les schémas du solveurs fluent utilisés pour résoudre les équations différentielles qui gèrent ces systèmes d'écoulement sous les conditions aux limites citées ci-dessous sont :

- Pour déterminer le couplage champ de pression-champ de vitesse : le schéma Phase Coupled SIMPLE.

- Le schéma seconde ordre upwind, pour la discrétisation des termes convectifs dans l'équation dynamique, l'équation de taux de dissipation et l'équation de l'énergie cinétique.

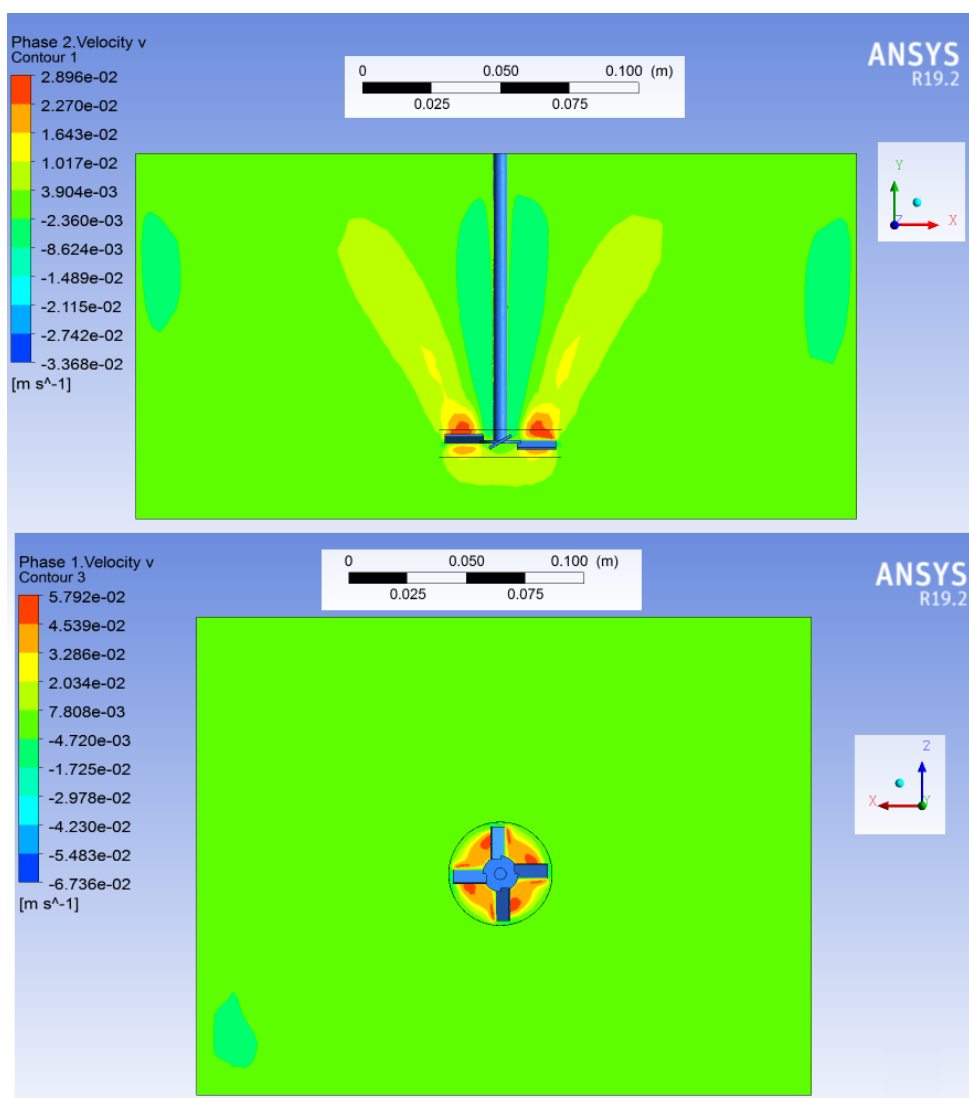


Fig.III.5 : contours de vitesse de fluide biphasique (poudre de bentonite + l'eau).

Discussion :

L'agitation mécanique est utilisée pour mettre en suspension des particules dans un liquide afin de favoriser un transfert de masse ou une réaction chimique. Les liquides impliqués dans telles applications sont généralement de faible viscosité et les particules se déposent lorsque l'agitation cesse. [24]

Le type de flux peut être modifié par la géométrie de la roue, l'inclinaison des aubes de turbine par rapport à la verticale (30°), produit une composante d'écoulement axial plus forte et cela pourrait être avantageux pour les tâches impliquant une suspension de solides. [23] Il conduit à différents comportements hydrodynamiques lors du mélange et affecte l'efficacité de la suspension solide créée. Deux forces agissent ensemble sur les particules pour les suspendre

CHAPITRE.III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

à proximité de la cuve : la force de traînée exercée par le fluide en mouvement et la force de portance créée par l'éclatement de tourbillons turbulents provenant de l'écoulement massif à l'intérieur de la cuve. Ainsi, la suspension de particules dans un écoulement turbulent peut résulter d'un équilibre entre l'énergie fournie par la rotation de la turbine et l'énergie nécessaire pour soulever les particules solides. [17]

La figure III.5 montre un écoulement radial, mais le noyau de ce dernier est plus développé vers la surface du réservoir par rapport à celui du fluide pseudoplastique, qui est plus développé vers le bas. D'après.[25] le développement de flux vers la surface est un bon indice du mélangeage de tout le fluide dans tout le réservoir. L'existence aussi des caves autour de l'arbre de rotation est dans des zones lointaines du système de rotation, pacontre à la même vitesse d'agitation pour le fluide non newtonien, ce phénomène est absent.

A decorative gold frame with a scalloped border and two gold ribbons on the left and right sides. The word "Conclusion" is centered within the frame.

Conclusion

Ce travail étudie le comportement hydrodynamique du fluide de forage lors d'agitation dans les bacs de surface. L'écoulement est considéré turbulent, incompressible et permanent et le fluide est considéré tantôt comme un fluide pseudoplastique obéissant par la loi de puissance et tantôt comme un fluide biphasique sous forme d'un mélange de la poudre bentonitique et l'eau. Le calcul comporte une simulation tridimensionnelle, en utilisant le code Ansys Fluent

Les résultats obtenus et leurs discussions remportent les conclusions suivantes :

Pour un fluide pseudoplastique

- Les contraintes de cisaillement et le taux de cisaillement sont proportionnels à la vitesse de la turbine
- La viscosité apparente est inversement proportionnelle à la vitesse de la turbine
- Les grands tourbillons se génèrent auprès de la turbine, ils se déroissent au-delà de cette dernière (au milieu du réservoir) jusqu'à où elles dissipent auprès des surfaces limites
- Il existe une vitesse optimale qui génère les cisaillements assez suffisants pour agiter le fluide, avec un minimum de dissipation d'énergie
- Le fluide biphasique a montré un flux plus développé vers le haut par contre le fluide pseudoplastique était plus développé vers le bas
- Apparition des cavernes développées autour de l'arbre de rotation et dans d'autres zones éparpillées dans le réservoir, pour un fluide biphasique, tandis que ce phénomène s'est limité que dans la zone habituelle, les alentours de la turbine.

Ce travail nécessite encore d'étude, comme le domaine d'agitation est très vaste. Les recommandations concernent l'influence de :

- La géométrie du réservoir
- La vitesse sur le fluide biphasique
- Les dissipations d'énergie



Références

- [1] N Harnby, M F Edwards, A W Nienow, Mixing in the Process Industries. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] Manas, I. Zloczower, Mixing and compounding of polymers: Theory and practice. Munich: Hanser. (2009).
- [3] Manas, I. Zloczower, Analysis of mixing in polymer processing equipment. Rheology Bulletin, 66(1). Retrieved from.(1997).
- [4] M. Khodja, Les fluide de forage : Etude des performances et considérations environnementales l'Université des sciences et de Technologie Houari Boumediene d'Alger – Algérie.
- [5] Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel comité des techniciens, Drilling Mud and Cement Slurry Rheology, Springer Science & Business Media, 1982.
- [6] BenTech :instruction de service, BA_Mud Tank_System_DR523-DR526_FR_REV00, ENAFOR.
- [7] S. Bridges, L. Robinson, A practical handbook for drilling fluids processing, Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2020.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Agitateur_industriel ,(1/05/2023 à 11:00)
- [9] <https://www.slideshare.net/WASSAN14CH18/agitation-and-mixing> ,(2/05/ 2023 à 15:00)
- [10] <http://m.fr.aliexpress.com> ,(2/05/2023 à 15:00)
- [11]https://fr.made-in-china.com/tag_search_product/Drilling-Mud-Agitator_usrrnisl_1.html, (10/05/ 2023 à 15:30)
- [12] Filip Kars-Jardon Petri Hiltunen, Agitation Handbook, KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44 STOCKHOLM, 2007.
- [13] <https://www.agitec.fr/agitateurs> (10/06/ 23 à 13:00)
- [14] J. P. Duroudier , Solid–Solid, Fluid–Solid, Fluid–Fluid Mixers , Louis Pasteur (11 September 1871)
- [15] <https://chemsept.in/Views/Products/PitchedBladeTurbineType> (10/06/ 2023 à 13:00)

REFERENCES

- [16] S. Bridges and L. Robinson, practical handbook for drilling fluids processing, Gulf professional publishing .
- [17] M. Jaszczur , A. Mlynarczykowska, A General Review of the Current Development of Agitated Vessels, Processes 2020,8,98;MDP
- [18] km. Saqr, Fluid Mechanics - Laminar Flow, Université de Californie à Berkeley. 2020.
- [19] LP. Wang, Fluid Mechanics – Tubulence, Université de Cambridge, 2006.
- [20] M. Reberol. Maillage hex-dominants : génération, simulation et évaluation, Université de Lorraine
- [21] <https://www.padtinc.com/2021/05/11/comparison-ansys-fluent-meshing-ansys-meshing-cfd/> ,(11/06/ 2023 à 17:00)
- [22] M. E. Attalah, F. Ben Ali, S. Diab, S. HADJADJ, simulation d'un mélangeur de fluide de forage, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022
- [23] S. M. Kresta, A. W. Etchells III, D. S. Dickey, advances in industrial mixing a companion to the handbook of industrial mixing, John Wiley & Sons, 2016
- [24] R.P. Chhabra J.F. Richardson, Non-Newtonian flow and applied rheology : Engineering Applications, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 2008
- [25] A. B. METZNER and R. E. OTTO, Agitation of Non-Newtonian Fluids, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 3, No. 1, pp3-10, March, 1957.
- [26]<http://www.bentonite.it/whatisbentonite.php#:~:text=Its%20density%20when%20dry%20varies,to%201.8%20g%2Fcm%203> (12/06/ 2023 à 10:15)