

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENE**

**USTHB/ALGER
Faculté de Génie des Procédés / Génie Mécanique**

Thèse

Présentée pour l'obtention du grade de :

**MAGISTER
En chimie industrielle**

Spécialité : "Procédés Chimiques et Environnement"

Par
ATMANI FATIHA

Sujet

*Etude d'un réacteur torique ouvert
Comparaison avec un réacteur agité continu*

Soutenue publiquement le 24 octobre 2002, devant le jury composé de :

S. BELAADI, Professeur, U.S.T.H.B
A. BENSMAILI, Professeur, U.S.T.H.B
F. BENTAHAR, Professeur, U.S.T.H.B
S. HANINI, Maître de conférence, Univ de Médéa
K. BETAIMI, Chargé de cours, U.S.T.H.B

Président
Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au laboratoire de Génie de la Réaction. Je tiens à exprimer mes remerciements les plus vifs au Professeur Aïcha BENSMAILI, responsable du laboratoire, pour m'avoir dirigé dans mes travaux et pour son écoute et sa confiance tout au long de ce travail.

Monsieur BELAADI m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du Jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Que Madame BENTAHAR, Professeur à l'U.S.T.H.B, Monsieur HANINI et Monsieur BETAIMI, reçoivent ici l'expression de tous mes remerciements pour s'être intéressés à mon travail et pour avoir participé à ce Jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Rafika pour sa grande disponibilité et le soin qu'elle a apporté à la mise en forme du manuscrit.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma sympathie à Monsieur GHIAT, à Salim et à Rachid.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à :

⊗ Mes très chers parents, à qui je dois tout.

⊗ Mes sœurs Fatma et Sarah.

⊗ Mon frère Mohamed.

⊗ Mon beau frère Ahmed.

⊗ Mes neveux Mehdi, Maroua et Abderrahmane

⊗ Mes amis.

Nomenclature

Lettres latines

- b : largeur des chicanes (m).
B₀ : nombre de Bodenstein ($B_0 = U_c L_t / Dax$).
C : concentration du traceur (mol/l).
C₀ : concentration du traceur à l'homogénéité (mol/l).
Dax : coefficient de dispersion axiale (m²/s).
d₁ : diamètre extérieur du mobile d'agitation (m).
d₂ : diamètre intérieur du mobile d'agitation (m).
Dr : diamètre du réacteur agité (m).
dt : diamètre du tore (m).
E : coefficient d'efficacité du mélange $E = P_{dtm}$ (W.s).
E(t) : fonction de distribution des temps de séjour.
H : hauteur du liquide dans le réacteur agité (m).
Hm : position du mobile d'agitation par rapport au fond du réacteur (m).
Lt : longueur moyenne du tore (m).
n_p : nombre de pâles.
N : vitesse d'agitation du mobile d'agitateur (tr/s).
N_θ : nombre de circulation.
N_p : nombre de puissance.
P_d : puissance dissipée par le mobile d'agitation (J/s).
P₀ : puissance dissipée dans le réacteur ouvert (J/s).
P_f : puissance dissipée dans le réacteur fermé (J/s).
P_{ext} : pression qui règne dans la région externe du tore (cm Ceau)
P_{int} : pression qui règne dans la région interne du tore (cm Ceau)
ΔP : pression différentielle (cm Ceau).
Q : débit d'alimentation (l/s).
Q_c : débit de circulation (l/s).
Q_{cf} : débit de circulation en système fermé (l/s).
Q_{co} : débit de circulation en système ouvert (l/h).
R : taux de recyclage.
Rt : Rayon de courbure du réacteur (m)
R_e : nombre de Reynolds d'écoulement ($R_e = U_c d_t / \nu$).
R_{em} : nombre de Reynolds de mélange ($R_{em} = N d_1^2 / \nu$).
t : temps (s).
t_c : temps de circulation (s).
t_{co} : temps de circulation en système ouvert (s).
t_{cf} : temps de circulation en système fermé (s).
t_m : temps de mélange (s).
 \bar{t}_s : temps de séjour moyen (s).
U_c : vitesse moyenne de circulation (m/s).
V : volume du réacteur (l).
V_m : volume mort (l).

Lettres grecques

- σ^2 : variance (s²).
- θ : temps réduit.
- α : angle d'inclinaison des pâles du mobile d'agitation (degré).
- ν : viscosité cinématique (m²/s).
- ρ : masse volumique (kg/m³).
- τ : temps de passage (s).
- ε_p : taux d'énergie dissipée.
- μ : viscosité dynamique (Pa.s).

Sommaire

Introduction générale.	01
<i>CHAPITRE I Etude de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique ouvert</i>	
I-1. Introduction	02
I-2. Synthèse bibliographique.	02
I-3. Etude expérimentale.	07
I-3.1. Détermination expérimentale de la distribution des temps de séjour.	07
I-3.2. Définition des paramètres hydrodynamiques.	07
I-3.3. Description du montage expérimental.	10
I-3.4. Etude préliminaire.	14
I-3.5. Résultats expérimentaux et discussion.	15
I-3.5.1. Influence des caractéristiques du mobile d'agitation.	15
I-3.5.2. Influence du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation.	16
I-3.5.3. Influence de la position de soutirage.	18
I-3.5.4. Comparaison avec le réacteur fermé.	19
I-3.6. Corrélation des résultats sous forme adimensionnelle.	21
I-4. Conclusion.	24
Annexe I.	25
Références bibliographiques.	34
<i>CHAPITRE II Evaluation de la puissance dissipée dans un réacteur torique ouvert</i>	
II-1. Introduction.	38
II-2. Etude bibliographique.	38
II-3. Dispositif expérimental.	41
II-4. Résultats et discussion.	42
II-4.1. Evaluation de la pression différentielle entre la paroi extérieure et la paroi intérieure.	42
II-4.2. Estimation de la puissance dissipée.	45
II-4.3. Comparaison de la puissance dissipée dans le réacteur torique ouvert et fermé.	46
II-4.4. Nombre de puissance.	47
II-4.5. Fonctionnement optimal du réacteur torique ouvert.	48
II-5. Conclusion.	49
Références bibliographiques.	50

CHAPITRE III *Modélisation du réacteur torique ouvert*

III-1. Introduction.	51
III-2. Définition de la dispersion axiale.	51
III-3. Choix des modèles.	51
III-3.1. Le réacteur torique fermé.	51
III-3.2. Le réacteur torique ouvert.	52
III-3.2.1. Modèle piston avec dispersion axiale et recyclage partiel.	52
III-3.2.2. Modèle piston avec dispersion axiale à deux zones et recyclage partiel	53
III-4. Application du modèle piston avec dispersion axiale et recyclage partiel.	53
III-5. Conclusion.	59
Annexe III.	60
Références bibliographiques.	64

CHAPITRE IV *Caractérisation du réacteur agité, comparaison avec le réacteur torique*

IV-1. Introduction.	65
IV-2. Synthèse des travaux antérieurs.	65
IV-3. Généralités sur la cuve agitée.	67
IV-4. Etude expérimentale.	69
IV-4.1. Description du montage expérimental.	69
IV-4.2. Résultats et discussion.	72
IV-4.2.1. Influence des paramètres hydrodynamiques.	73
IV-4.2.2. Caractérisation globale du mélange.	77
IV-4.2.3. Comparaison des performances des réacteurs agité et torique.	80
IV-5. Conclusion.	81
Annexe IV.	82
Références bibliographiques.	84
Conclusion générale.	86

Introduction générale

Le génie des procédés connaît, depuis les vingt dernières années, un développement de plus en plus important. Ce développement est directement lié à la diminution de ressources naturelles, au faible rendement de certains procédés, au coût énergétique élevé et à l'accroissement inquiétant de la pollution.

Ces problèmes sont à l'origine de la conception et de l'étude de nouveaux types de réacteurs, des réacteurs de forme originale présentant des potentialités pour leurs applications en milieu industriel. Les réacteurs de forme toroïdale sont considérés comme des réacteurs à boucle qui, de par leur construction simple, leurs conditions d'écoulement à peu près identiques en tout point, leur puissance consommée relativement faible, apparaissent comme une alternative prometteuse aux réacteurs classiques de type cuve agitée ou réacteur piston.

L'étude entreprise dans ce mémoire a été effectuée au laboratoire de génie de la réaction pour analyser l'hydrodynamique dans un réacteur torique ouvert afin de contribuer à une meilleure connaissance des caractéristiques de l'écoulement et du mélange dans ce nouveau type de réacteur, cette étude est conçue en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré dans un premier temps à une synthèse bibliographique relative aux différents travaux effectués dans les réacteurs à boucles. Dans un second temps, l'étude expérimentale a porté sur la caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique ouvert en adoptant la méthode conductimétrique pour la détermination de la distribution des temps de séjour. Les courbes expérimentales obtenues permettent de déterminer les temps de circulation et les temps de mélange.

Les caractéristiques hydrodynamiques du réacteur en fonctionnement fermé et en fonctionnement ouvert sont comparées.

Afin d'étudier l'influence, d'un point de vue énergétique, du débit d'alimentation sur la circulation, la puissance dissipée à l'intérieur du réacteur a été déterminée dans le deuxième chapitre. L'évaluation de la puissance consommée dans le réacteur torique a été estimée par la mesure de la différence de pression entre la paroi intérieure et la paroi extérieure du tore.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, les courbes expérimentales sont modélisées à l'aide du modèle piston avec dispersion axiale et recirculation partielle. Le coefficient de dispersion axiale est ainsi obtenu.

Dans le quatrième chapitre, le but de l'étude est double, d'une part caractériser le réacteur agité classique ouvert et d'autre part comparer ses performances avec celles du réacteur torique.

Le mémoire se termine par une conclusion qui rassemble les résultats obtenus durant cette étude et trace les perspectives qui pourront être envisagées pour le futur.

I-1 INTRODUCTION

Le développement du génie des procédés ainsi que les demandes industrielles de plus en plus fréquentes auprès des laboratoires pour la résolution des problèmes pratiques rencontrés sur une chaîne de production ou pour la mise au point et l'optimisation d'un procédé, montrent la nécessité de développer cette discipline et l'intérêt croissant qu'elle suscite.

Le réacteur torique a été entrepris en alternative au réacteur classique, vu qu'il présente des caractéristiques de mélange intéressantes pour d'éventuelles applications industrielles.

Pour contribuer à une meilleure connaissance des caractéristiques de l'écoulement et du mélange dans ce nouveau type de réacteur, des travaux ont été menés pour caractériser le réacteur en fonctionnement continu. La méthode conductimétrique, basée sur la détermination des temps de séjour, est adoptée pour estimer les paramètres caractérisant l'écoulement et le mélange à l'intérieur du réacteur.

I-2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Selon **Levenspiel** [1], le réacteur chimique est une enceinte où se produit une réaction nécessitant plusieurs composants de base pour obtenir un certain produit. Dans cette étude, nous nous limitons à étudier en fonctionnement continu, le réacteur qui a été proposé par **Norwood** [2] en 1962 pour la polymérisation des oléfines et qui prend ces derniers temps une ampleur grandissante. La mise en œuvre de ce nouveau type d'appareil se développe particulièrement dans les procédés du secteur agro-alimentaire. Suivant la géométrie recherchée, le réacteur torique est constitué à partir de coudes à 90° reliés ou non par des longueurs droites de même diamètre. Le mélange et la recirculation des fluides sont assurés par un mobile d'agitation. Le réacteur est caractérisé par une hydrodynamique d'écoulement bien définie [3]. Il peut se présenter sous forme torique (R.P.T) (Figure 1), rectangulaire (R.T.L.D) (Figure 2) ou de forme L (Figure 3).

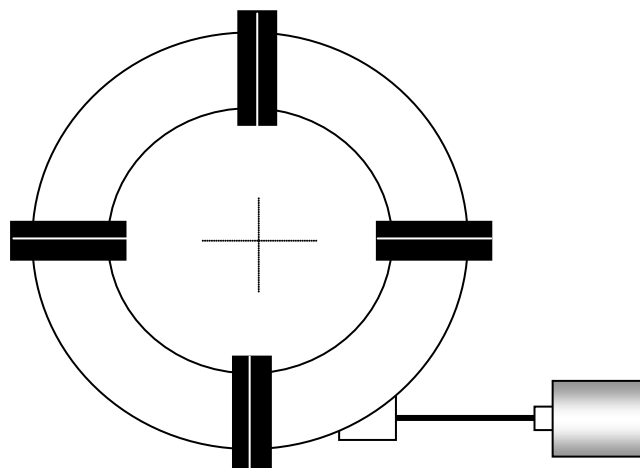


Figure 1 : Réacteur à boucle de forme parfaitement torique.

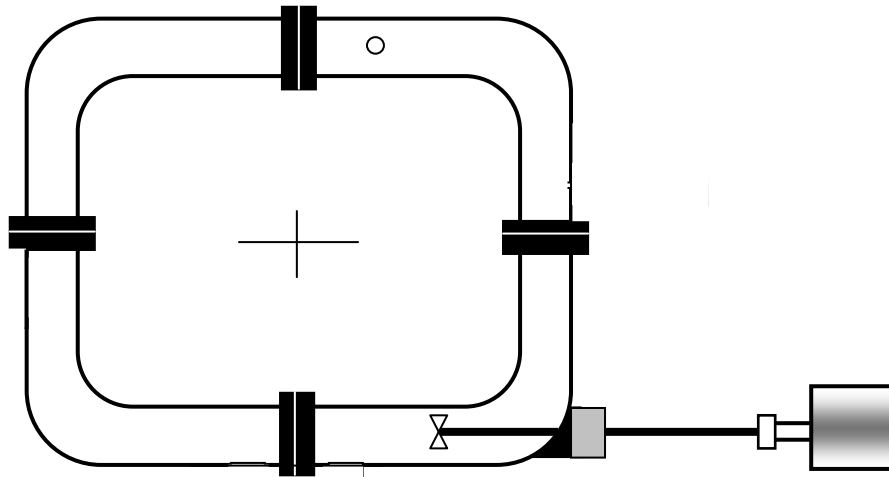


Figure 2 : Réacteur à boucle de forme rectangulaire.

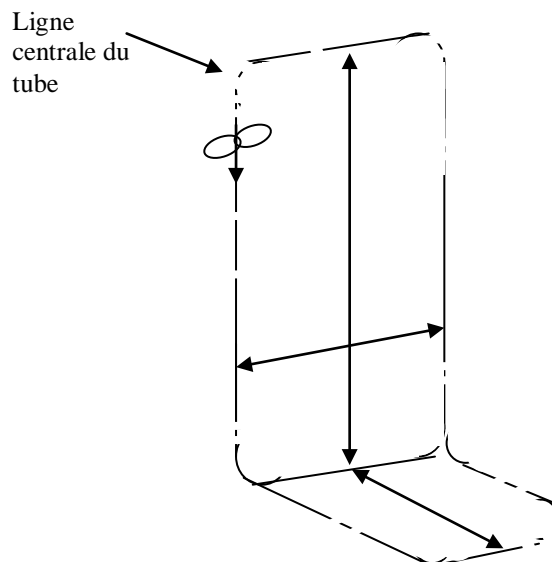


Figure 3 : Schéma d'un réacteur à boucle de forme L.

Laederach et Widmer [4], en testant le réacteur torique en fonctionnement discontinu sur la croissance de culture par fermentation, ont montré que la production de biomasse était d'environ 40% plus élevée dans ce réacteur que celle obtenue avec un réacteur agité. De plus à la différence du réacteur agité, aucune croissance ne s'est produite à la paroi du réacteur, permettant ainsi à toute la biomasse présente dans le volume réactionnel de prendre une part active au transfert de matière.

Gerda et coll [5] ont étudié l'hydrodynamique d'un bioréacteur continu à boucle de 15 litres. Ils ont caractérisé l'hydrodynamique et le mélange dans le réacteur par le modèle de N réacteurs agités en série. Il ressort de leur étude que le bioréacteur continu à boucle peut être modélisé par 100 réacteurs agités en série.

Kresber et coll [6] ont mis en évidence l'importance du bioréacteur torique pour la production de xanthane. Ils ont utilisé des bioréacteurs toriques pour la culture du *xanthomonas campestris*, en comparant leurs performances sur le taux de transfert en oxygène et la production de xanthane. Ils ont trouvé que la quantité de glucose transformée en

xanthane est plus importante dans le cas du bioréacteur torique que le réacteur parfaitement agité.

Le réacteur à boucle en fonctionnement continu a été utilisé par **Der-Yuan** et coll [7] dans la polymérisation. Ils ont constaté que le taux de conversion du styrène et la taille des particules varient proportionnellement en fonction du temps de séjour dans le réacteur.

Alder et **Fiechter** [8] ont étudié différents types de bioréacteurs à l'aide d'un système de test de croissance microbiologique. Ils ont montré l'intérêt du réacteur torique par rapport au réacteur parfaitement agité pour des systèmes avec formation de mousse. De plus, ils ont montré que pour cette bioréaction, l'extrapolation du réacteur agité n'était pas possible.

Tanaka et **O'shima** [9] se sont intéressés à l'étude de la polymérisation en suspension du styrène dans un réacteur torique de forme rectangulaire en fonctionnement discontinu. Ils ont établi une expression corrélant la taille moyenne finale des particules avec les conditions opératoires, telles que les propriétés physico-chimiques initiales des suspensions et les conditions de mélange dans la zone d'agitation. D'autre part, ils ont montré l'effet des grandes vitesses de circulation sur la suppression des dépôts de polymères sur la paroi du réacteur.

Pour mieux caractériser le réacteur à boucle, **Murakami** et coll [10] ont réalisé une étude portant sur l'aspect énergétique. Ils ont étudié l'influence de différents paramètres géométriques sur la puissance dissipée tels que le diamètre et l'angle d'inclinaison des pâles du mobile d'agitation, la présence des chicanes et le mode de fonctionnement du réacteur (ouvert ou fermé). Ils ont constaté que la présence des chicanes dans le réacteur torique n'a pas une influence sur la puissance dissipée et que cette dernière est légèrement supérieure dans le système ouvert que celle évaluée dans le système fermé.

Hosogai et **Tanaka** [11] ont étudié l'influence de la vitesse de l'agitateur et le rapport entre le diamètre du mobile et le diamètre de la conduite sur la taille finale des particules en suspension. Ils ont établi une expression corrélant le diamètre final des particules en fonction de la puissance dissipée.

Belleville et coll [12, 13] ont analysé l'influence de la viscosité de la solution et de la géométrie de l'agitateur sur la vitesse moyenne de circulation dans un réacteur parfaitement torique. Ils ont aussi caractérisé la vitesse d'écoulement dans le réacteur en fonction de la vitesse de rotation du mobile d'agitation par une corrélation empirique et le mélange par un modèle représentatif de type piston avec dispersion axiale et recirculation.

L'acétylation des petits pois a été entreprise par voie chimique dans un microréacteur torique par **Legrand** et coll [14] en fonctionnement ouvert et fermé. Les performances du microréacteur ont été évaluées à partir du temps de mélange et du degré d'acétylation qui a été mesuré toutes les cinq minutes par la détermination du groupement trinitro benzène sulfonique. Ce microréacteur s'est avéré particulièrement adapté à cette réaction biochimique caractérisée par une rhéologie complexe.

Plus récemment, **Tanaka** et coll [15] ont montré l'intérêt d'utiliser une double agitation pour augmenter la vitesse de circulation et la dispersion durant la polymérisation du styrène dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire équipé de deux mobiles d'agitation de type turbine à pâles inclinées à 45°.

Carlos et coll [16] ont étudié la copolymérisation en émulsion de l'acétate de vinyle en utilisant deux types de réacteurs : un réacteur parfaitement agité et un réacteur torique. Les réactions sont réalisées dans des conditions comparables (la même vitesse d'agitation et le même débit d'alimentation). Le comportement des deux réacteurs est presque le même c'est à dire qu'il n'y a pas de différence entre le réacteur torique et le réacteur agité sur la base du taux de conversion des particules.

Iabbadene et coll [17] ont étudié la polymérisation en émulsion de l'acétate de vinyle en utilisant trois types de réacteurs : un réacteur agité fermé, un réacteur tubulaire et un réacteur torique. Les résultats obtenus montrent que la géométrie du réacteur n'influe pratiquement pas sur le mécanisme réactionnel de cette polymérisation.

Benzemel [18] a étudié les écoulements diphasiques liquide/liquide (eau et huile) dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire et parfaitement torique de volume égal à 9,2 litres. La technique d'anémométrie laser à effet doppler (LDA) a été mise en œuvre pour mesurer la vitesse locale au sein du réacteur et de voir l'influence de la viscosité du fluide sur la circulation. Une corrélation liant la vitesse de circulation à la vitesse d'agitation a été proposée. Il a également constaté que la présence d'une phase dispersée réduit l'utilisation de la technique d'anémométrie laser.

Une étude comparative des caractéristiques hydrodynamiques et de mélange d'un réacteur torique fermé et continu a été réalisé par **Nouri** et coll [19, 20]. Les résultats ont montré que les principales caractéristiques du mélange ainsi que l'écoulement de type piston du réacteur torique fermé sont conservés en fonctionnement continu. Les potentialités du réacteur torique dans le domaine de l'agro-alimentaire ont été testées sur l'hydrolyse des protéines végétales. Les performances de ce réacteur sont comparables à celles d'une cuve agitée de même volume selon un critère reposant sur le nombre de Reynolds de mélange (Rem) et la puissance dissipée.

L'étude de la modélisation de l'écoulement dans le réacteur torique à partir de la détermination expérimentale des temps de séjour, pour les deux configurations fermée et ouverte, a été entreprise par **Benkhelifa** [21]. L'écoulement dans ces deux types de réacteurs a été caractérisé par le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation. Par ailleurs, ils ont étudié la transformation des protéines dans le réacteur torique à l'aide d'enzymes immobilisées [22]. Différents systèmes enzymes-support ont été testés, leur résistance thermique a été étudiée pour différentes vitesses d'agitation. Les degrés d'hydrolyse les plus élevés ont été obtenus pour une vitesse d'agitation élevée correspondant à une meilleure homogénéisation au sein du réacteur torique fermé.

Les principales études effectuées dans des réacteurs à boucle, sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des principales études.

Réacteur	Mobile utilisé	Etude effectuée	Référence
Réacteur à boucle fermé	- Hélice marine	Comparaison de l'écoulement à celui d'un réacteur à jet	Blenke (1979) [23]
Réacteur à boucle fermé rectangulaire	- Hélice marine	Détermination de la vitesse de circulation	Sato et coll (1979) [3]
Réacteur à boucle de forme rectangulaire	- Turbine à pale inclinée	Mesure de la puissance consommée dans un réacteur fermé et ouvert	Murakami et coll (1982) [10]
Réacteur à boucle fermé circulaire	- Turbine à pale droite / inclinée	Détermination des caractéristiques du mélange	Tanaka et coll (1988) [9]
Réacteur à boucle ouvert	- Hélice marine	Polymérisation du styrène	Der -Yuan et coll (1990) [7]
Réacteur torique fermé circulaire	- Hélice marine	Modélisation de l'écoulement	Belleville et coll (1992) [13]
Réacteurs toriques fermés circulaire et rectangulaire	- Hélice marine	Etude des performances du réacteur, application à l'hydrolyse enzymatique des protéines végétales.	Nouri (1994) [19, 20]
Réacteur torique ouvert et fermé	- Hélice marine	Acétylation des petits pois	Legrand et coll (1997) [14]
Réacteur torique fermé	- Hélice marine - Turbine à pale inclinée	Etude hydrodynamique	Hamani (1999) [24]
Réacteur torique fermé	- Hélice marine - Turbine à pale inclinée	Caractérisation de l'écoulement et du mélange	Kaoua (2000) [25]
Réacteur torique fermé et ouvert	- Hélice marine	Etude des régimes d'écoulement	Benkhelifa (2000) [22]
Réacteur torique fermé	- Hélice marine - Turbine à pales inclinées	Saponification de l'acétate d'éthyle par la soude	Rihani (2002) [26]

I-3 ETUDE EXPERIMENTALE

I-3-1 Détermination expérimentale de la distribution des temps de séjour

Le concept de la distribution des temps de séjour (DTS) a été introduit par **Danckwerts** en 1953 [27] afin d'étudier et de caractériser les réacteurs réels.

La description du fonctionnement de ces réacteurs peut s'appuyer sur la notion de réacteur idéal, qui fait appel aux deux états limites de macro-mélange correspondant aux modèles d'écoulement suivants[28] :

- L'écoulement piston, où toutes les molécules ont le même temps de séjour.
- L'écoulement parfaitement agité, où les temps de séjour sont quelconques et où les compositions et la température sont uniformes en tout point du réacteur.

Dans un réacteur réel, les molécules séjournent dans le volume réactionnel pendant des temps différents qui dépendent entre autres de la géométrie du système, des conditions opératoires, des caractéristiques physico-chimiques du fluide,...etc, et qui peuvent s'écarter notablement du temps de séjour moyen. Il existe donc une distribution des temps de séjour qui est une caractéristique de l'état de macro-mélange du fluide dans le système et qui permet de rendre compte du fonctionnement hydrodynamique des réacteurs au moyen de modèles mathématiques représentatifs adaptés à l'exploitation [29].

La distribution des temps de séjour du fluide peut être atteinte expérimentalement par diverses techniques et qui sont toutes basées sur l'utilisation des traceurs [30].

La méthode des traceurs consiste à marquer des molécules entrant dans le réacteur et à suivre leur déplacement au sein du réacteur. Pour cela on utilise une substance radioactive, colorée ou chimique, ayant les mêmes propriétés hydrodynamiques que le fluide, mais décelable par une propriété caractéristique telle que la conductivité électrique, thermique, etc..

On applique un certain signal à l'entrée du réacteur, telle qu'une injection sous forme d'impulsion on échelon, de façon à ne pas perturber l'écoulement, et on mesure à la sortie l'évolution temporelle de la concentration de ce traceur. On en déduit ainsi des renseignements sur le comportement interne du fluide.

La méthode conductimétrique est une des méthodes permettant la détermination expérimentale de la DTS. En général, elle est choisie pour sa facilité d'utilisation nécessitant des capteurs simples et des produits accessibles commercialement. De plus elle a été utilisée dans de nombreux travaux [31 - 33].

Cette technique consiste à mesurer la conductivité électrique du fluide après y avoir introduit une petite quantité d'électrolyte fort (acide, base). La conductivité électrique étant directement proportionnelle à la concentration, cette mesure permet l'obtention de l'évolution temporelle de la concentration du traceur, représentative de la DTS au sein du réacteur.

I-3-2 Définition des paramètres hydrodynamiques

a - Temps de circulation

Le temps de circulation t_c est défini comme le temps nécessaire à un élément fluide pour parcourir une circulation complète dans le réacteur. Il est fonction de la vitesse d'agitation, des caractéristiques du fluide, de la géométrie du réacteur et du mobile d'agitation [34].

Le temps de circulation est obtenu dans le réacteur torique à partir de la courbe donnant l'évolution de la concentration du traceur en réponse à une injection de type impulsion.

Cette courbe a une forme périodique (Figure 4) en raison du passage répété dans le réacteur d'un même élément fluide. Le temps de circulation correspond alors à l'intervalle de temps séparant deux pics successifs de la courbe.

Le temps de circulation peut être utilisé, pour calculer de façon très simple la vitesse moyenne de circulation dans le réacteur, d'après la relation :

$$U_c = \frac{L_t}{t_c} \quad (1)$$

Où L_t est la longueur du réacteur.

Ainsi, pour caractériser l'écoulement dans le réacteur torique en fonction des conditions d'agitation, **Tanaka** et coll [35], **Hosogai** et coll [11] ont introduit le nombre de Reynolds d'écoulement Re et le nombre de Reynolds de mélange Rem , tels que :

$$Re = \frac{\rho U_c d_t}{\mu} \quad (2)$$

et

$$Rem = \frac{N \rho d_1^2}{\mu} \quad (3)$$

b - Temps de mélange

Il est souvent nécessaire d'avoir recours au temps de mélange pour caractériser le processus du mélange dans les réacteurs. Le temps de mélange est une grandeur caractéristique de l'agitation. Il est défini comme étant l'intervalle de temps s'écoulant entre l'injection du traceur et sa répartition dans tout l'espace réactionnel, pour atteindre un degré d'homogénéité souhaité.

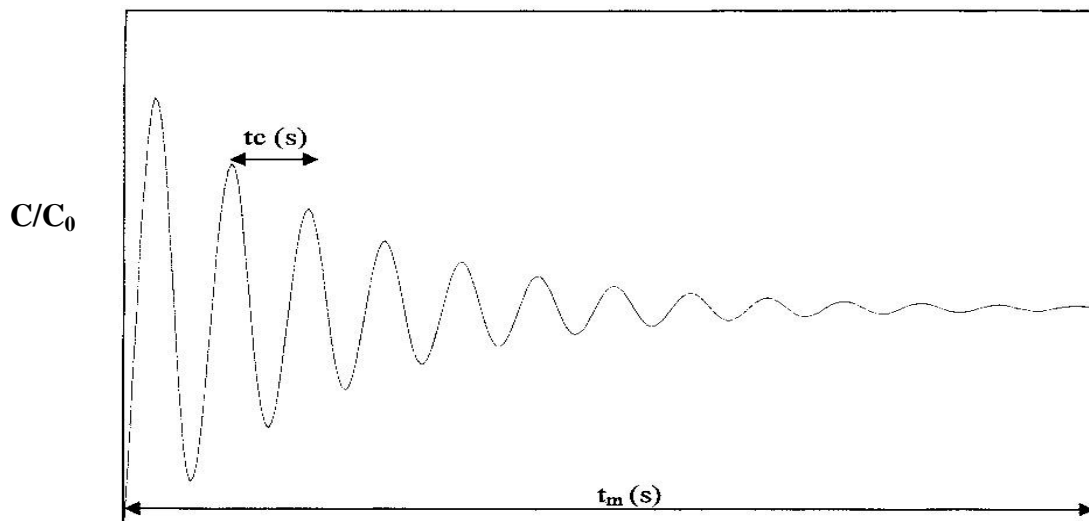


Figure 4 : Représentation graphique du temps de circulation et du temps de mélange à partir de la courbe de DTS.

c - Débit de circulation

Dans le réacteur torique ouvert, une partie du fluide en circulation est soutirée de manière continue par la tubulure de sortie, l'autre partie reste dans le réacteur et vient se mélanger au nouveau flux arrivant par la tubulure d'entrée (Figure 5).

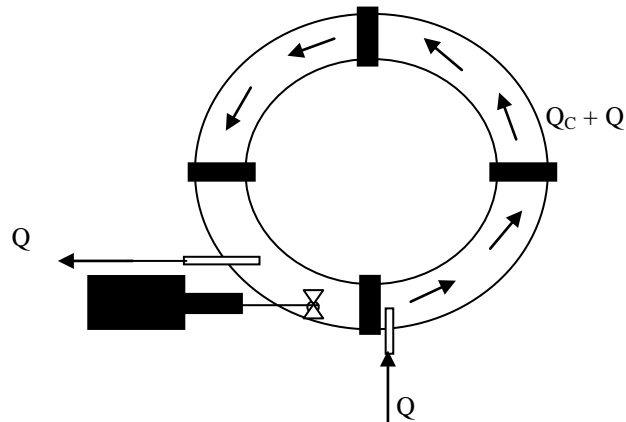


Figure 5 : Représentation de la recirculation dans le réacteur torique ouvert.

Compte tenu des positions respectives de l'alimentation et du soutirage, deux zones peuvent être définies dans le réacteur torique :

- La première correspond à la partie de réacteur traversée par le débit de circulation. Cette zone représente pour le réacteur étudié un volume égal au quart du volume total du réacteur.
- La seconde zone est celle où le débit d'alimentation Q s'ajoute au débit de circulation Q_c et correspond à un volume égal au trois quarts du volume total du réacteur [22].

Le temps de circulation dans le réacteur torique ouvert est alors défini par :

$$t_{c0} = \frac{1V}{Q_c} + \frac{3V}{Q_c + Q} \quad (4)$$

Lorsque le débit d'alimentation Q est faible par rapport au débit de circulation, cette équation se réduit à une équation plus simple permettant une détermination directe du débit de circulation :

D'où :

$$Q_c = \frac{V}{t_{c0}} \quad (5)$$

Avec V : le volume du réacteur torique

t_{c0} : le temps de circulation dans le réacteur torique ouvert

d - Taux de recyclage

Le taux de recyclage R est défini comme le rapport du débit de circulation Q_c au débit total dans le système :

$$R = \frac{Q_c}{Q_c + Q} \quad (6)$$

La détermination du taux de recyclage permet de caractériser le fonctionnement continu du réacteur torique.

Pour $R = 0$, le réacteur est totalement ouvert
Pour $R = 1$, le réacteur est fermé

I-3-3 Description du montage expérimental

a - Le réacteur

Pour notre étude, nous avons utilisé un réacteur torique à section circulaire composé de quatre coudes en PVC à 90° reliés par des brides. Il est placé horizontalement et comporte un mobile d'agitation.

L'entrée du fluide se situe en aval de l'agitateur par une tubulure placée verticalement et de petite taille afin de perturber le moins possible l'écoulement. La tubulure de sortie se situe dans le dernier quadrant du tore en trois positions différentes, en amont du mobile d'agitation. Le réacteur est muni aussi de deux positions pour l'injection et l'introduction de la sonde conductimétrique (Figure 6).

Les informations recueillies par la sonde à l'intérieur du réacteur sont transmises à un conductimètre marque Tacussel (CD 6N), relié à un enregistreur marque Tacussel.

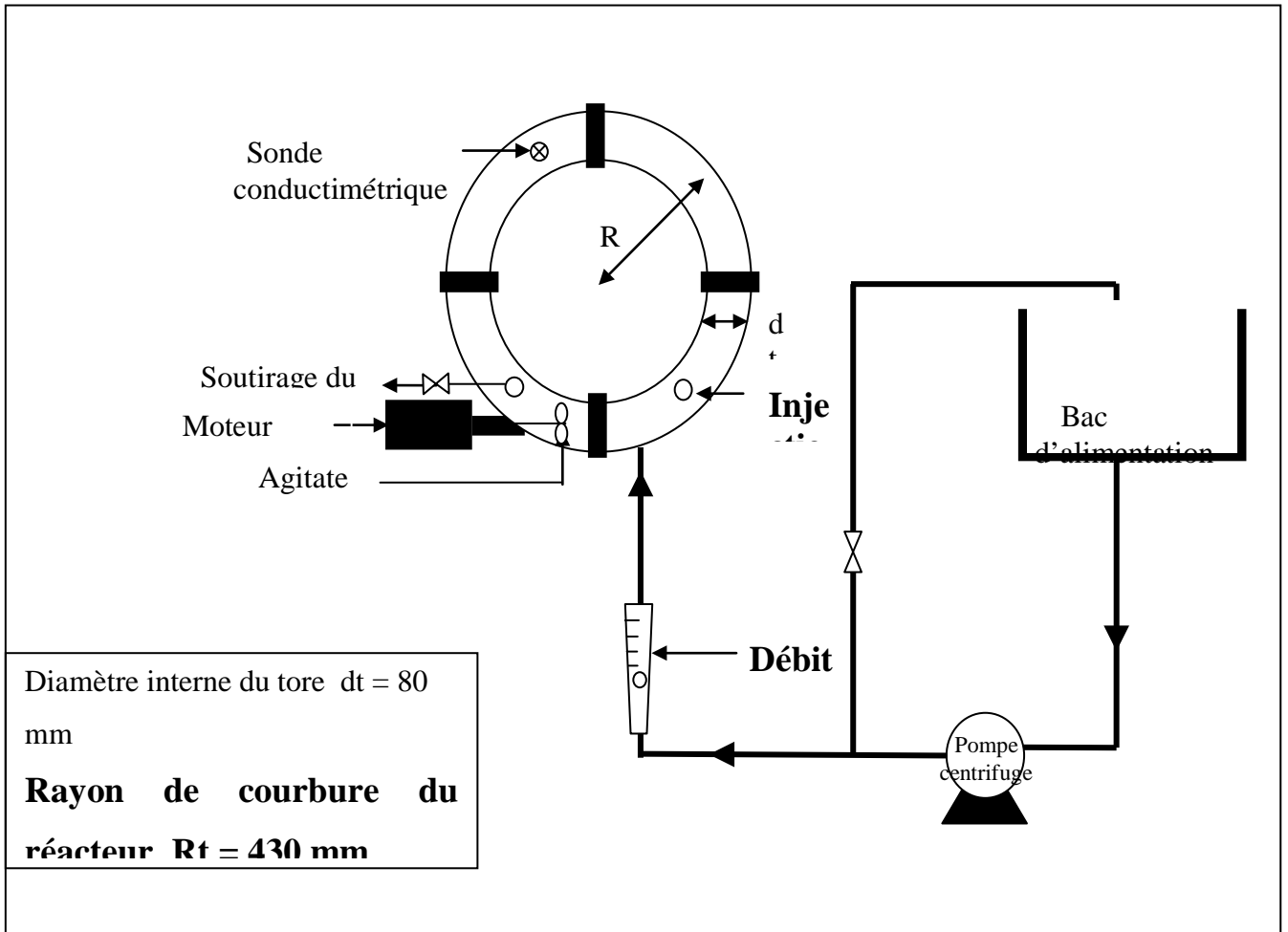


Figure 6 : Schéma représentatif du réacteur torique en fonctionnement continu.

b - Le circuit hydraulique

Le circuit hydraulique (Figure 6) comprend essentiellement les éléments suivants :

- Un bac d'alimentation.
- Un débitmètre à flotteur conique.
- Une vanne pour le recyclage du débit.
- Une vanne de contrôle est placée à la sortie du réacteur.
- Une pompe centrifuge.

c - Le circuit électrique

Le circuit électrique est composé de :

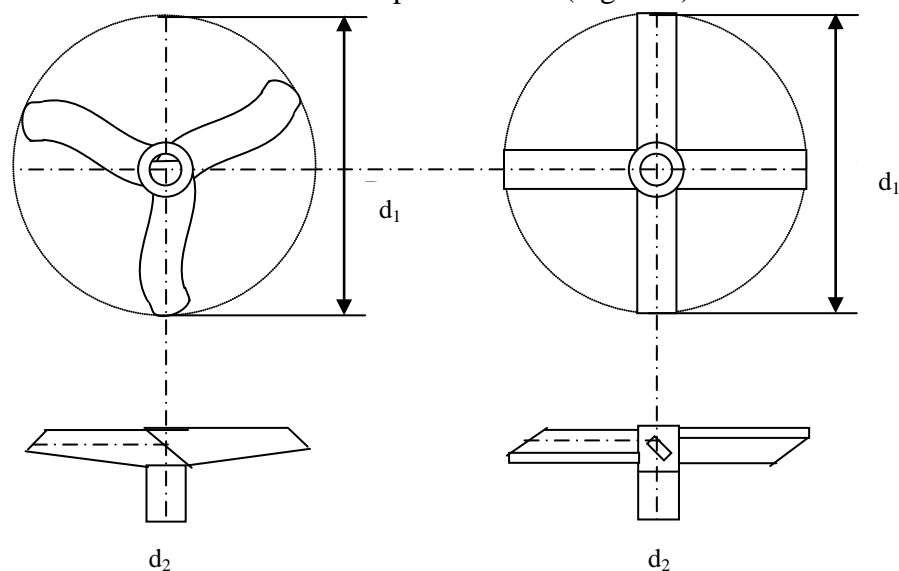
- Un moteur électrique MB25 de vitesse de rotation allant de 50 à 2500 tr/mn
- Une sonde conductimétrique Tacussel
- Un conductimètre marque CD6N Tacussel
- Un enregistreur Tacussel permettant de tracer les courbes de DTS en fonction du temps.

La courbe d'étalonnage de la sonde conductimétrique est donnée en Annexe I.1.

d - Le système d'agitation

Le calcul prévisionnel des appareils, leur contrôle et la commande de leur fonctionnement nécessitent une bonne connaissance des divers phénomènes mis en cause par l'opération réalisée. Les techniques d'agitation mécanique sont donc un moyen de créer et/ou d'accélérer les transferts de matière et d'énergie soit à l'intérieur d'une même phase soit entre différentes phases mises en présence. Depuis 1975 environ, ces techniques d'évaluation sont en train de se modifier car le problème est toujours de choisir, compte tenu des conditions du fonctionnement du réacteur, le meilleur agitateur et les critères font appel le plus souvent à la qualité du mélange et à la puissance consommée [36].

Les mobiles d'agitation utilisés dans cette étude appartiennent à deux grandes classes suivant le mouvement du fluide engendré dans le réacteur par rapport à l'axe de rotation du mobile. Ce sont l'hélice marine et la turbine à pale inclinée (Figure 7).



Hélice marine à trois pales

Turbine à pale inclinée

Figure 7 : Schéma représentatif des différents mobiles d'agitation utilisés, [37].

Les caractéristiques géométriques des mobiles d'agitation utilisés sont portées dans le tableau ci-après.

Tableau 2 : Caractéristiques géométriques des mobiles d'agitation, [37].

Agitateur	Géométrie	d_1 (mm)	d_2 (mm)	α (degré)
I	Hélice marine	25	12	30
II	Hélice marine	50	12	30
III	Hélice marine	50	12	45
IV	Hélice marine	75	12	30
V	Turbine à pâles inclinées	50	15	45

d_1 : diamètre externe de l'agitateur.

d_2 : diamètre interne de l'agitateur.

α : angle d'inclinaison des pâles de l'agitateur.

e - Méthode de mesure

La détermination de la distribution des temps de séjour est obtenue en mettant en œuvre une méthode conductimétrique. Une solution concentrée de soude est injectée sous forme d'une impulsion dans le réacteur et ensuite détectée par une sonde conductimétrique. Le fluide qui circule dans le réacteur est de l'eau.

Les figure 8 et 9 représentent des exemples de courbes obtenues expérimentalement. Nous constatons sur celle-ci une décroissance de la concentration en traceur au sein du réacteur. Sa concentration devient égale à zéro lorsque tout le traceur a traversé le réacteur.

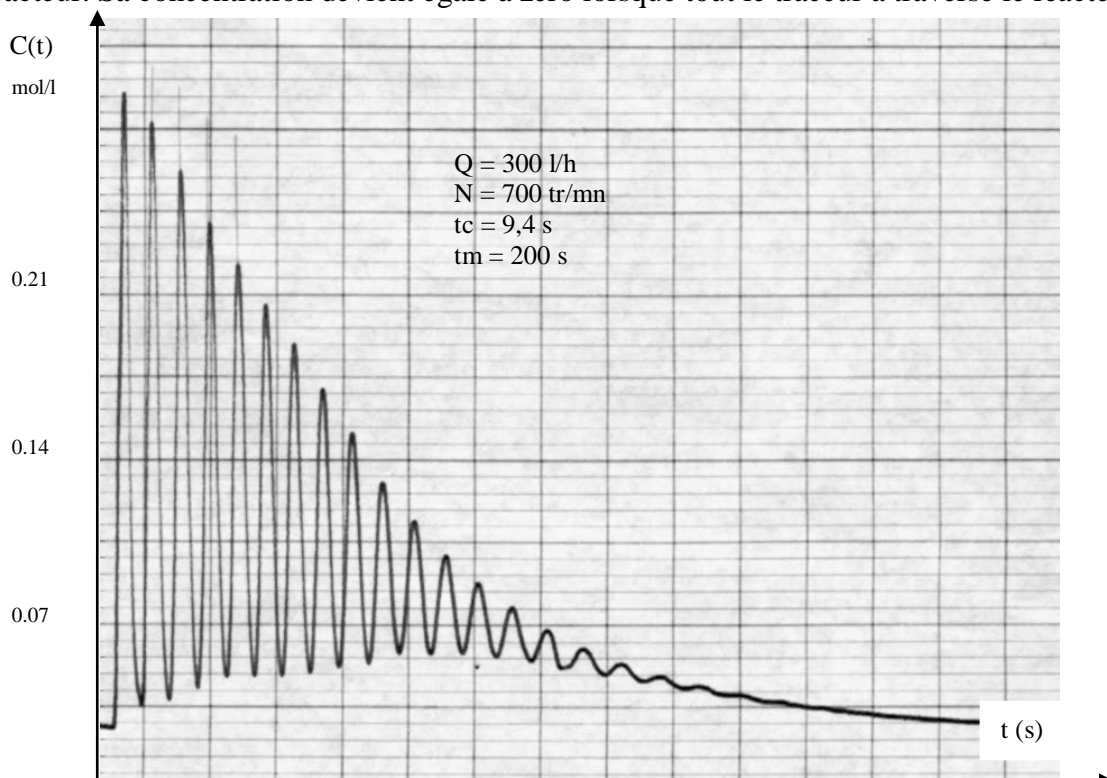


Figure 8 : Exemple d'une courbe expérimentale de DTS.

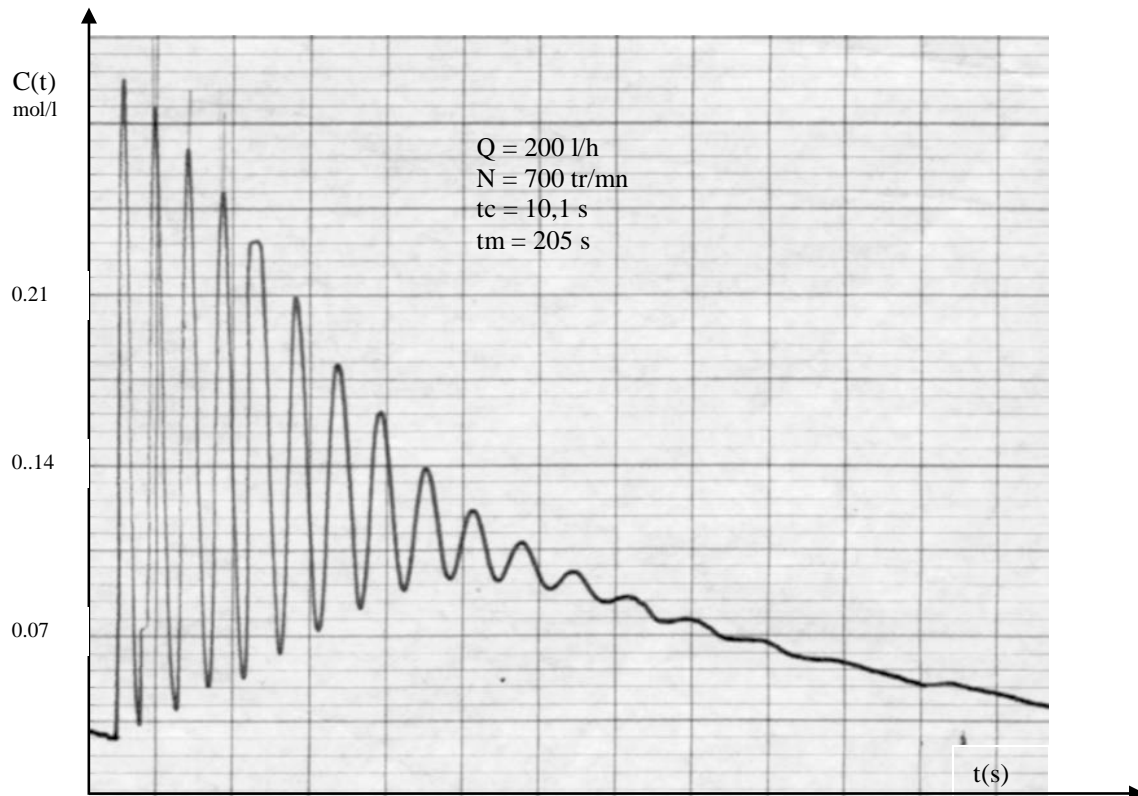


Figure 9 : Exemple d'une courbe expérimentale de DTS.

D'après ces courbes de DTS, on peut déterminer le temps de circulation t_c et le temps de mélange t_m . Les autres courbes sont données en Annexe I.2.

I-3-4 Etude Préliminaire

Avant d'entamer l'étude expérimentale et pour un déroulement optimal de nos expériences, il a été nécessaire de déterminer les conditions opératoires optimales telles que :

- Le volume et la concentration optimums du traceur à injecter.
- La position circonférentielle de la sonde de détection du traceur à l'intérieur du réacteur.
- La position radiale de l'élément de mesure.
- La position du mobile d'agitation à l'intérieur du réacteur.

Les résultats ainsi obtenus sont donnés en Annexe I-3.

Nous avons constaté à travers les mesures de la DTS que :

- Le volume injecté et la concentration du traceur n'influent pas sur l'hydrodynamique et le mélange dans le réacteur torique.
- La position longitudinale du détecteur n'a pas d'influence sur l'hydrodynamique du réacteur.
- La position de l'agitateur à l'intérieur du réacteur est indépendante des paramètres d'écoulement.
- La position de la sonde conductimétrique dans le réacteur ne révèle pratiquement aucune variation des temps de mélange et de circulation quelles que soient les valeurs du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation.

I-3-5 Résultats expérimentaux et discussion

Les caractéristiques de l'écoulement et du mélange sont déterminées dans le réacteur torique ouvert en position horizontale. Ces caractéristiques sont obtenues en analysant la distribution des temps de séjour (DTS).

Les différents points de l'étude sont les suivants :

- Influence du mobile d'agitation.
- Influence de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation.
- Influence de la position de soutirage.
- Comparaison avec le réacteur torique fermé.

I-3-5-1 Influence des caractéristiques du mobile d'agitation

L'influence du type de mobile d'agitation a été effectuée pour les cinq mobiles d'agitation considérés. Les résultats expérimentaux pour les différents mobiles sont donnés en Annexe I-4 et illustrés sur les figures 10 et 11 où nous avons représenté respectivement la variation du temps de circulation t_c et de mélange t_m en fonction de la vitesse d'agitation.

Nous constatons d'après ces figures que les temps de circulation et de mélange augmentent avec la diminution du diamètre du mobile d'agitation. Ceci s'explique par le fait que plus la surface balayée par les pâles du mobile augmente plus le fluide a tendance à s'intermélanger et par conséquent le mélange devient meilleur. Par contre l'angle d'inclinaison des pâles a une faible influence sur les caractéristiques de l'écoulement et du mélange au sein du réacteur.

Quand à l'utilisation de deux types de mobile d'agitation (hélice marine et turbine à pale inclinée) nous avons remarqué que l'hélice marine donne des temps de circulation et de mélange inférieurs à ceux de la turbine. A partir de toutes ces constatations, nous avons utilisé pour la suite de notre travail l'hélice marine III.

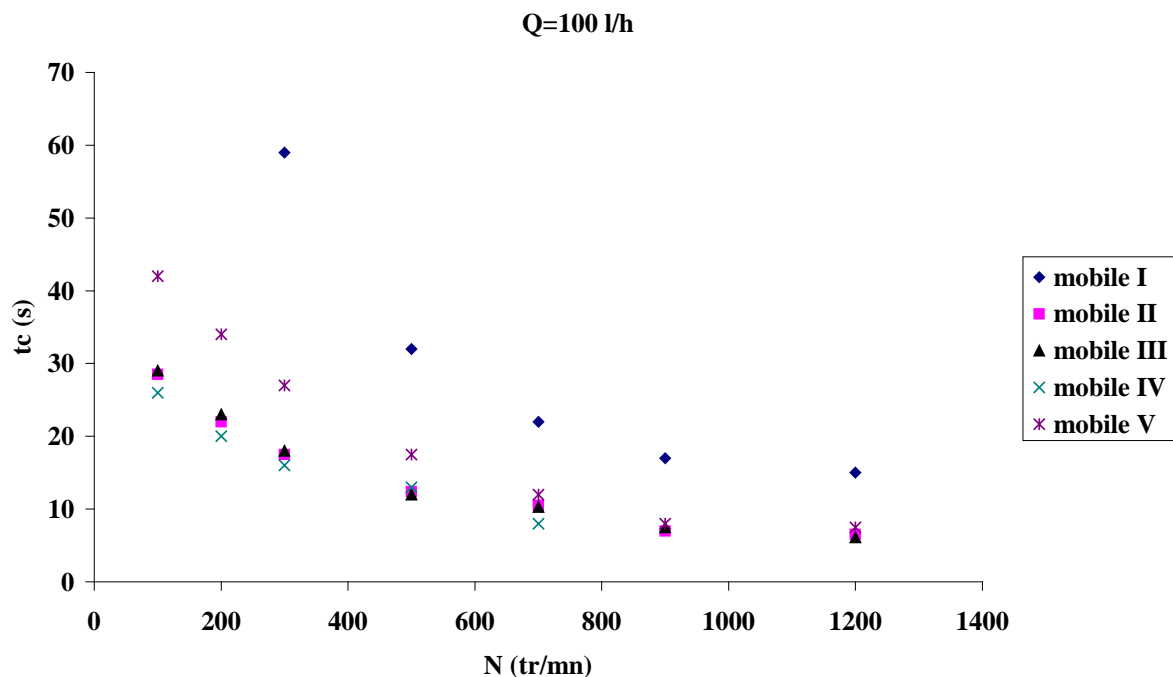


Figure 10 : Variation du temps de circulation en fonction de la vitesse d'agitation.

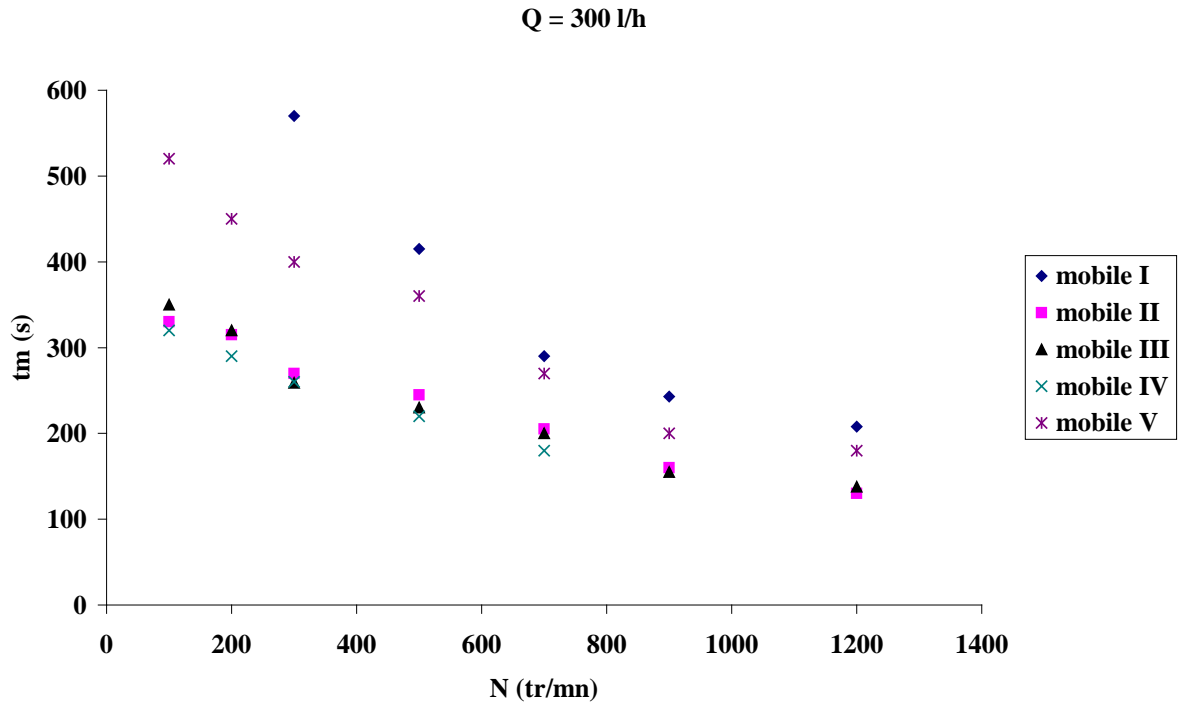


Figure 11 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation.

I-3-5-2 Influence du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation

L'étude du réacteur torique continu a été menée en injectant et en détectant le traceur à l'intérieur du réacteur en position horizontale. La sortie du fluide se fait en position 1 (Figure 12).

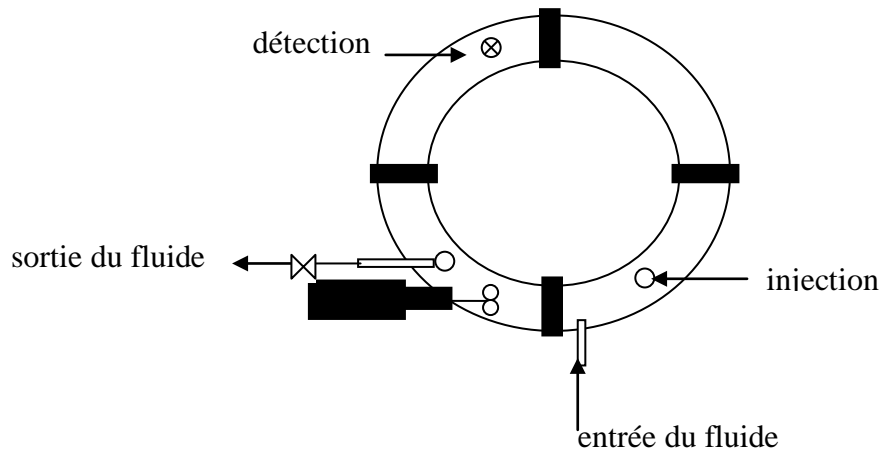


Figure 12 : Schéma du réacteur.

Sur les figures 13 et 14, nous avons représenté respectivement la variation du temps de circulation t_c et du temps de mélange t_m en fonction de la vitesse d'agitation pour différents débits d'alimentation. Les résultats expérimentaux sont donnés en annexe I-5.

Nous constatons que pour une vitesse d'agitation inférieure à 500 tr/mn, le débit d'alimentation, s'il est suffisamment élevé a donc une influence sur la circulation dans le réacteur. La circulation du fluide est accélérée et le temps de circulation est réduit.

Pour une vitesse d'agitation supérieure à 500 tours/mn, le débit d'alimentation a peu d'influence sur le temps de circulation.

Ce résultat est similaire à celui trouvé par **Benkhelifa** [22]. Quant aux résultats concernant le temps de mélange, nous remarquons que ce dernier diminue lui aussi d'une façon sensible avec l'augmentation du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation.

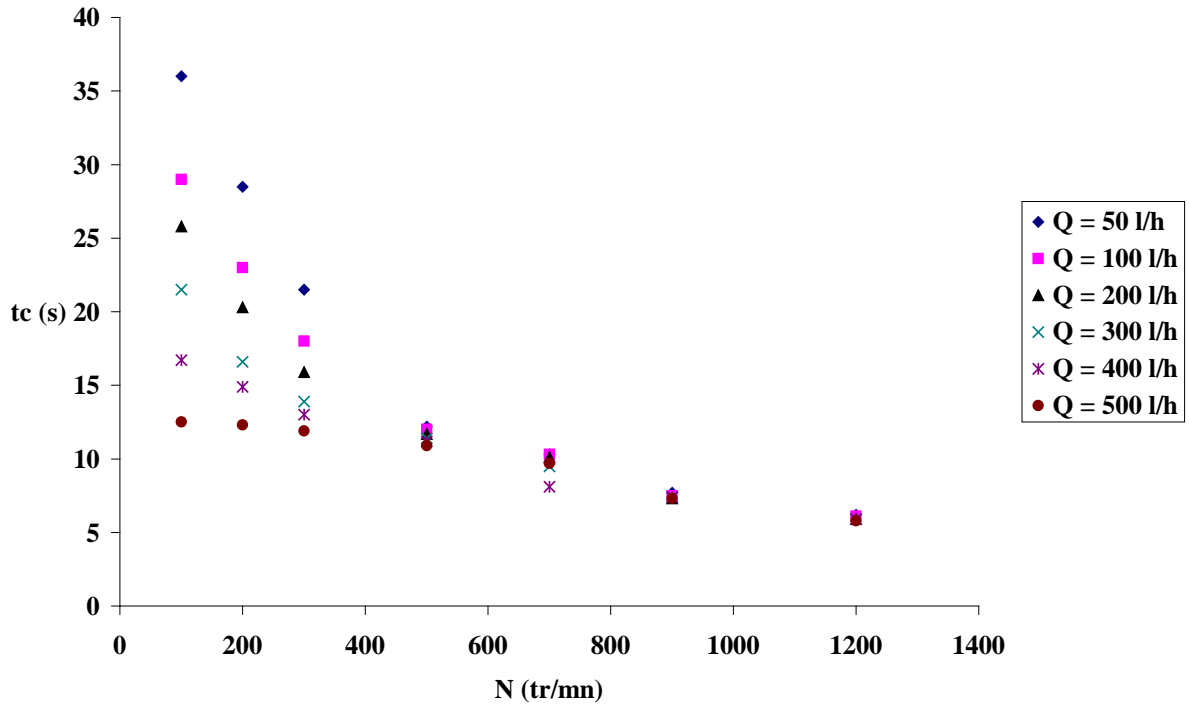


Figure 13 : Variation du temps de circulation en fonction du débit d'alimentation.

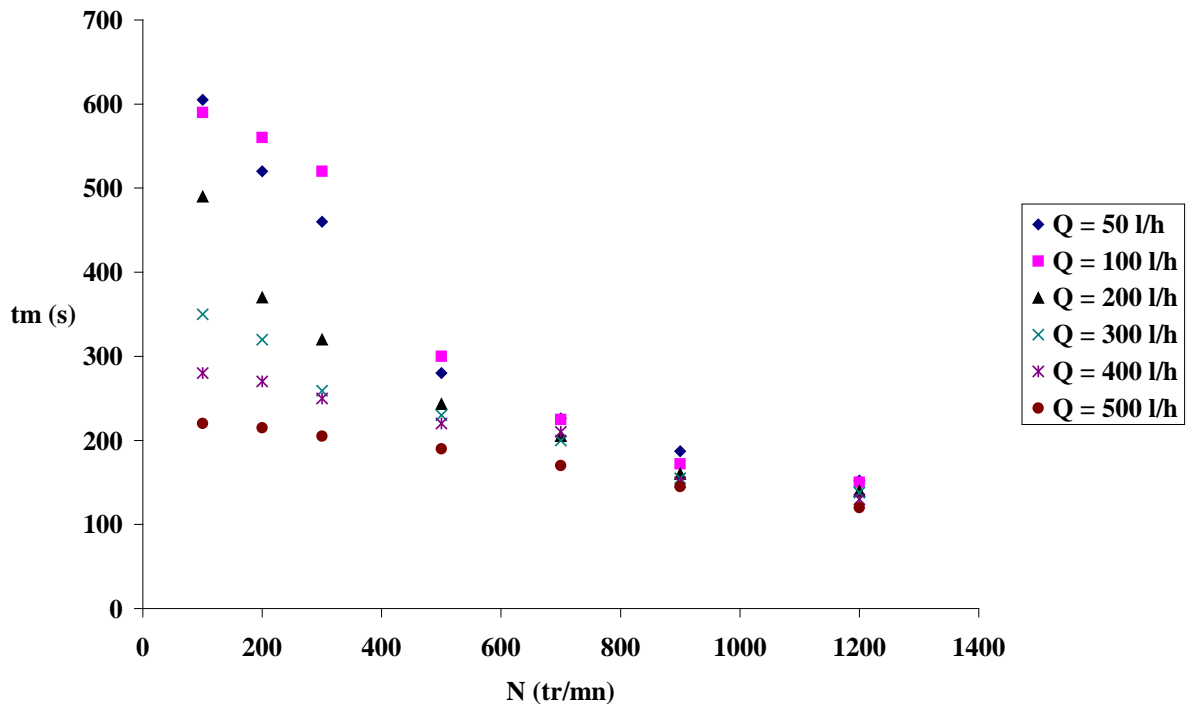


Figure 14 : Variation du temps de mélange en fonction du débit d'alimentation.

I-3-5-3 Influence de la position de soutirage

Nous avons étudié l'influence de la position de soutirage sur les caractéristiques d'écoulement et du mélange dans le réacteur torique. Les résultats ont été obtenus lorsque le soutirage du fluide a lieu en position 1, 2 ou 3. Nous avons dénommé, successivement, la position 1, celle située à 175 mm, la position 2 à 350 mm et la dernière position, celle qui est à 525 mm. Les distances sont données par rapport à la position du mobile d'agitation, prise comme origine d'espace dans la circonférence du coude. Ces différentes positions de soutirage sont situées dans le dernier quadrant du tore afin d'avoir le plus grand volume utile du réacteur (Figure 15).

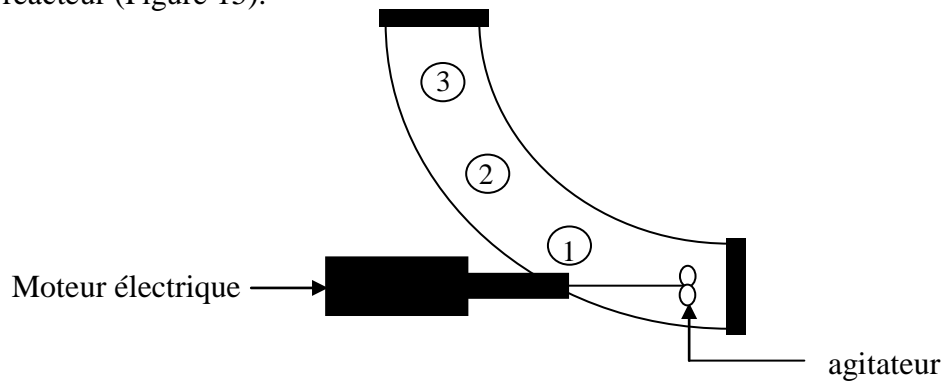


Figure 15 : Schéma représentatif du réacteur torique avec les différentes positions de soutirage.

Ces résultats sont réunis dans les tableaux de l'annexe I.6 et sont illustrés sur les figures 16 et 17 qui montrent de manière assez claire que la position de soutirage n'a pas d'influence sur les valeurs de t_c et de t_m . Ce résultat montre la stabilité hydrodynamique de l'écoulement à l'intérieur du réacteur torique. Par contre il est préférable de prévoir un soutirage en position 1 de manière à maximiser le volume utile du réacteur.

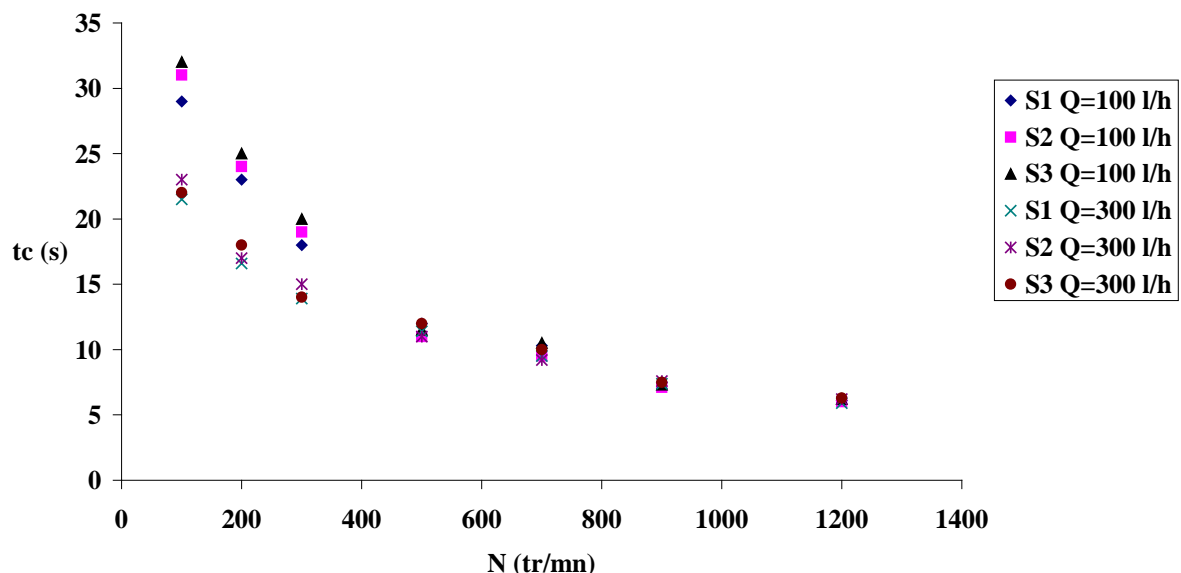


Figure 16 : Variation du temps de circulation avec la position de soutirage.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de **Nouri** [37] dont l'étude a porté sur un réacteur torique de volume égal à 5.4 litres et un domaine de variation du débit d'alimentation de 0 à 60 l/h.

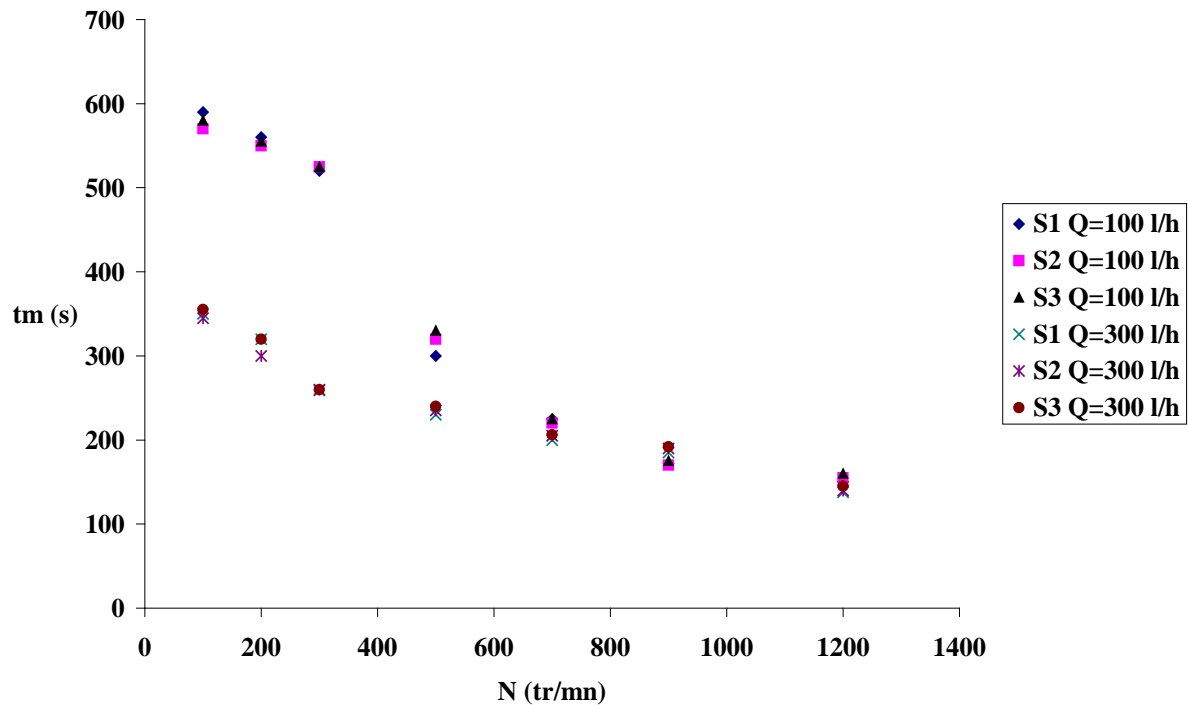


Figure 17 : Variation du temps de mélange avec la position de soutirage.

I-3-5-4 Comparaison avec le réacteur fermé

a- Comparaison des temps de circulation en fonction de la vitesse d'agitation

Afin d'étudier l'influence du passage du fonctionnement fermé au fonctionnement ouvert sur la circulation au sein du réacteur, nous avons comparé les temps de circulation obtenus dans ces deux configurations. L'évolution du rapport des temps de circulation t_{co} et t_{cf} en fonction de la vitesse d'agitation et pour différents débits d'alimentation est représentée sur la Figure 18.

Nous constatons d'après la Figure 18 que ce rapport s'éloigne de 1 quand le débit d'alimentation est élevé et la vitesse d'agitation est faible. En dessous de $N = 500$ tr/mn, l'augmentation du débit d'alimentation fait diminuer le temps de circulation. Ce phénomène est particulièrement important quand le débit est supérieur à 200 l/h. Dans ce cas, le temps de circulation en fonctionnement ouvert t_{co} peut être jusqu'à trois fois inférieur à celui en fonctionnement fermé t_{cf} . La valeur de ce rapport dépend donc du débit d'alimentation ainsi que de la vitesse d'agitation dans ce domaine.

Pour les fortes valeurs de la vitesse d'agitation, nous constatons que le réacteur torique est caractérisé par une même hydrodynamique en configuration ouverte et fermée.

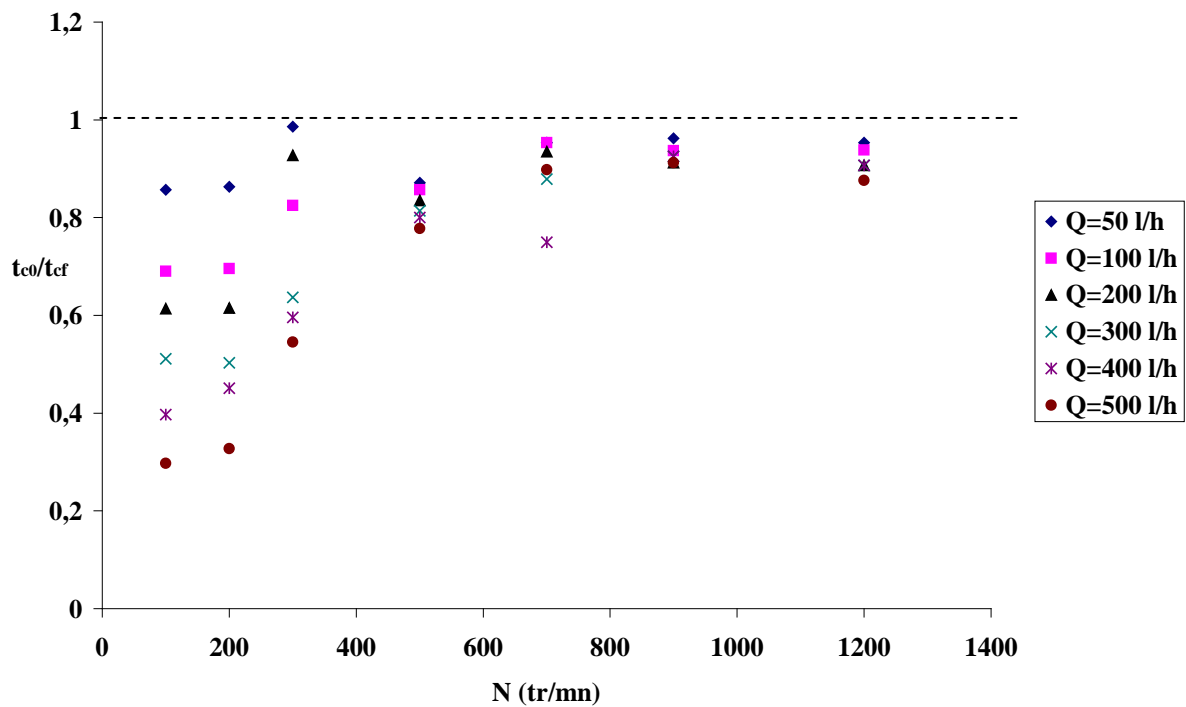


Figure 18 : Comparaison des temps de circulation en fonctionnement fermé et ouvert en fonction de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation.

b- Comparaison des temps de circulation en fonction du temps de passage

Le rapport du temps de passage τ ($\tau = V/Q$) sur le temps de circulation en fonctionnement ouvert t_{co} est un paramètre important pour la comparaison des résultats obtenus en réacteurs ouvert et fermé. Ce rapport caractérise l'importance relative du débit d'alimentation sur la circulation.

La figure 19 représente le rapport t_{co}/t_{cf} en fonction du rapport τ/t_{co} . Le rapport τ/t_{co} varie entre 8 et 168. Ce dernier est toujours inférieur à 20 lorsque la différence entre t_{co} et t_{cf} est significative ($t_{co}/t_{cf} < 0.8$), dans ce cas le débit d'alimentation a un effet considérable sur la circulation au sein du réacteur.

Cet effet devient négligeable lorsque τ/t_{co} est supérieur à 20. On peut donc considérer, que dans ce domaine, d'une part le rapport t_{co}/t_{cf} devient indépendant de la valeur du débit d'alimentation et que d'autre part, les caractéristiques d'écoulement dans le réacteur torique sont conservées lorsque le réacteur fonctionne en continu. Le rapport τ/t_{co} est donc un paramètre important pour la comparaison des résultats obtenus en réacteurs ouvert et fermé. Nos résultats expérimentaux avoisinent ceux trouvés par la littérature [22].

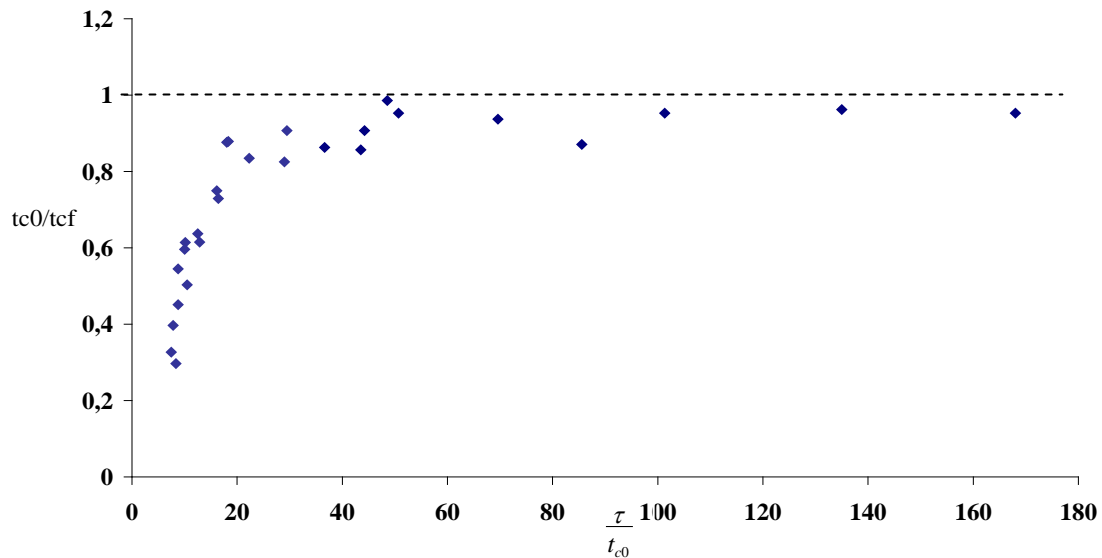


Figure 19 : Variation de $\frac{t_{c0}}{t_{cf}}$ en fonction de $\frac{\tau}{t_{c0}}$.

I-3-6 Corrélation des résultats sous forme adimensionnelle

a - Caractérisation globale de l'écoulement

La détermination expérimentale des temps de mélange et de circulation nous a permis de caractériser le mélange et l'écoulement dans le réacteur torique ouvert. Afin d'établir une relation adimensionnelle entre la vitesse moyenne de circulation et la vitesse d'agitation, nous avons introduit les nombres de Reynolds d'écoulement R_e et le nombre de Reynolds de mélange R_{em} .

La figure 20 caractérise la variation de nombre de Reynolds d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de mélange pour différents débits d'alimentation.

Cette représentation graphique nous a permis de mettre en évidence l'existence d'une zone de transition caractérisée par un nombre de Reynolds de mélange d'environ 18000

D'après cette figure, nous remarquons que pour R_{em} supérieur à 18000 et quelle que soit la valeur du débit d'alimentation, R_e est proportionnel à R_{em} , ce qui nous a permis d'établir une corrélation empirique dans ce domaine :

$$\text{Pour : } R_{em} > 18000 \quad R_e = (10,70 \pm 0,06) R_{em}^{(0,75 \pm 0,01)} \quad (7)$$

Pour R_{em} inférieur à 18000, il apparaît d'après la figure 20 que, R_e augmente avec l'augmentation du débit d'alimentation et par conséquent, ce dernier a une influence considérable sur la vitesse de circulation.

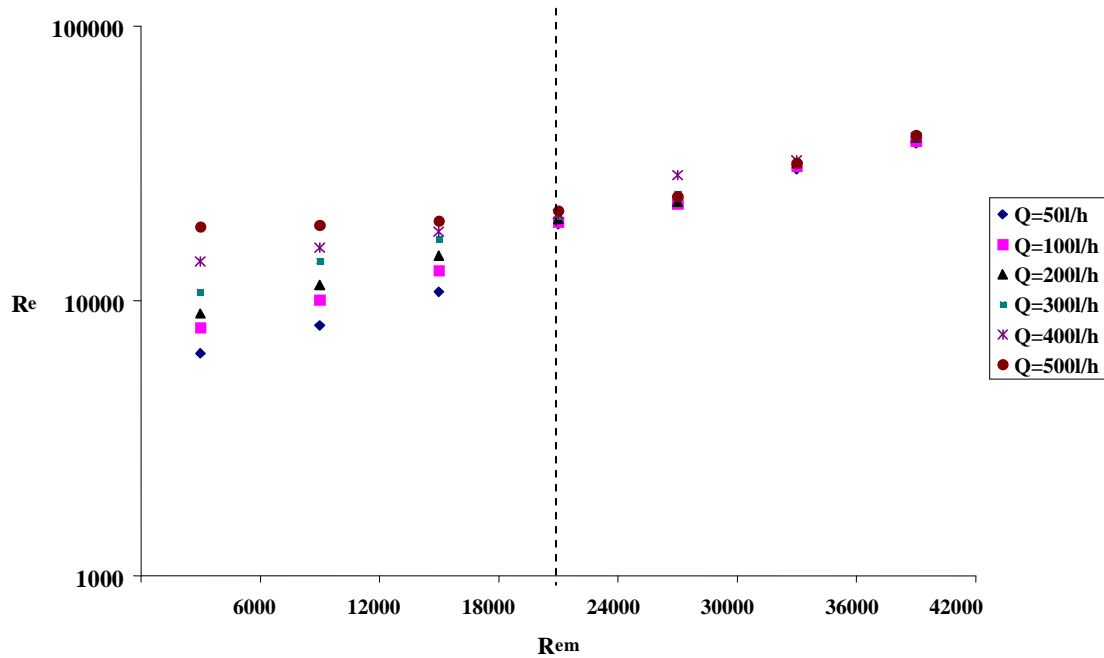


Figure 20 : Variation du nombre de Reynolds d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de mélange en fonctionnement continu.

b - Caractérisation globale du mélange

La caractérisation globale du mélange dans le réacteur torique en fonctionnements ouvert et fermé est définie à l'aide de deux paramètres adimensionnels qui sont :

- Le nombre de circulation : N_{θ}

Le nombre de circulation N_{θ} est déterminé comme étant le rapport entre le temps de mélange et le temps de circulation :

$$N_{\theta} = \frac{t_m}{t_c} \quad (8)$$

La représentation graphique de ce dernier (Figure 21), montre que l'introduction d'un débit d'alimentation dans le réacteur torique influe peu sur les caractéristiques du mélange. N_{θ} tend vers une valeur moyenne égale à 22. D'autre part, en comparaison avec le réacteur fermé, il en ressort que N_{θ} est légèrement plus faible en réacteur torique ouvert, ainsi la valeur de N_{θ} passe de 24 pour un débit nul à 21 pour un débit égal à 500 l/h. Ces résultats restent très grands devant celui obtenu dans un réacteur agité qui est de l'ordre de 5 [36].

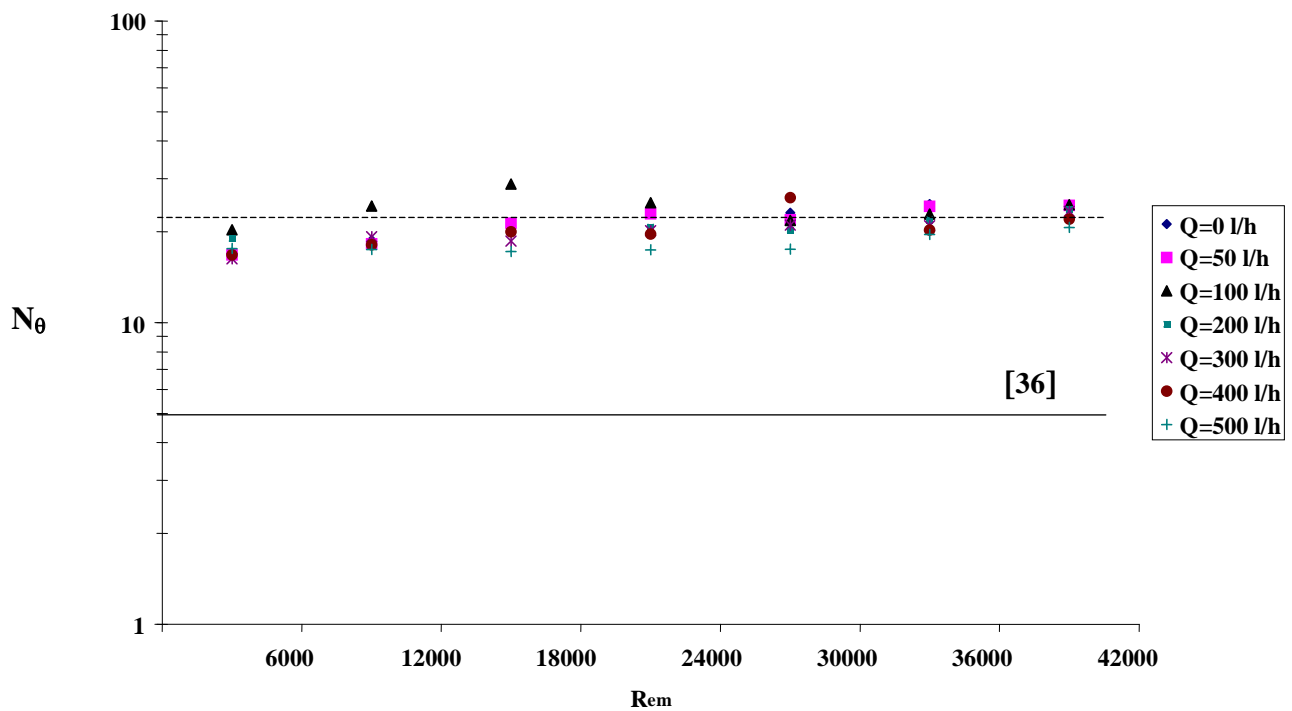


Figure 21 : Variation de N_{θ} en fonction de R_{em} pour différents débits d'alimentation.

- Le produit $N.t_m$

La plupart des travaux de la littérature ont caractérisé les réacteurs toriques par le produit $N.t_m$.

Belleville et coll [13] ont proposé une corrélation reliant les caractéristiques géométriques du mobile d'agitation et du réacteur torique au produit $N.t_m$. Ils ont trouvé que ce produit est compris entre 1300 et 2700.

Hamani [24] a trouvé que ce produit est relativement constant et égal à 3071 pour $R_{em} > 10^4$ dans un réacteur torique fermé de volume égal à 14.5 litres.

Toutes ces valeurs sont largement plus élevées devant celles obtenues dans le réacteur agité.

Kawase et **Mooyoung**[38] ont trouvé que ce produit tend vers 42.7 pour un réacteur agité en régime turbulent.

Rachez et coll [29] ont montré que dans le cas d'une cuve agitée munie de chicanes, $N.t_m = 15.6$ pour une turbine à six pâles type Rushton et $N.t_m = 5.8$ pour une hélice marine.

Cette caractérisation nous a permis d'obtenir la représentation graphique (Figure 22) de ce produit en fonction de R_{em} . D'après cette figure, nous remarquons que ce produit est relativement constant à partir de $R_{em} > 20000$ pour toutes les conditions expérimentales étudiées. Dans ce domaine ce produit est relativement indépendant du débit d'alimentation. Nos résultats expérimentaux ont le même ordre de grandeur que ceux donnés par **Hamani** [24] dans un réacteur torique fermé. Cependant il faut insister sur le fait qu'il existe des écarts importants entre les différents travaux, ce qui rend délicat l'utilisation des résultats expérimentaux issus de la littérature.

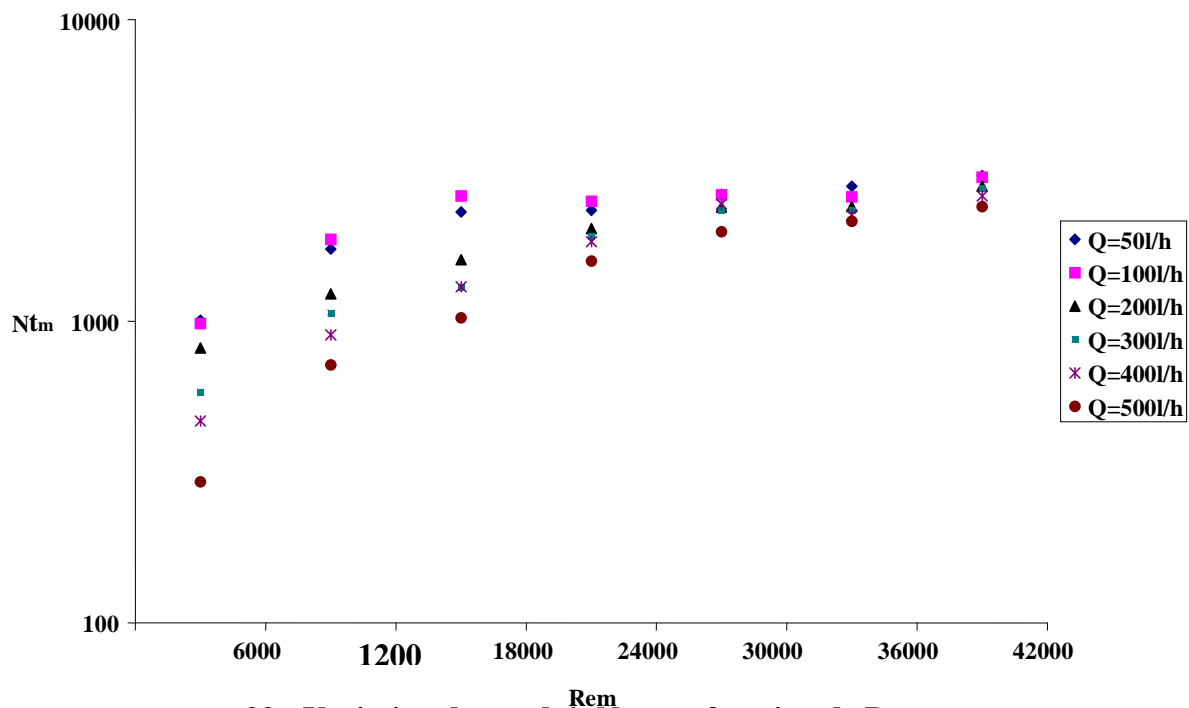


Figure 22 : Variation du produit Nt_m en fonction de Re_m .

I-4 CONCLUSION

La détermination des courbes expérimentales de la distribution des temps de séjour à l'aide de la méthode conductimétrique a été utilisée pour caractériser l'écoulement et le mélange dans le réacteur torique ouvert.

Cette étude nous a permis de caractériser l'écoulement et le mélange au sein de notre réacteur et par conséquent nous recommandons l'hélice marine à la turbine à pale inclinée.

Les temps de mélange et de circulation dans le réacteur torique ouvert ne sont pas influencés par la position de soutirage. Par contre nous suggérons une position de soutirage la plus proche de l'entrée du fluide afin de maximiser le volume utile du réacteur.

L'influence du débit d'alimentation au sein du réacteur a été étudiée. Il a été montré

que, pour un rapport $\frac{\tau}{t_c} < 20$ en fonctionnement ouvert, le débit d'alimentation accélère la

circulation. A débit d'alimentation élevé et à faible vitesse d'agitation, on remarque qu'un apport énergétique supplémentaire a lieu, ce qui a un effet bénéfique sur la circulation au sein du réacteur. Pour un temps de passage rapporté au temps de circulation supérieur à 20, cet effet n'est plus observé et par conséquent, le réacteur torique ouvert conserve approximativement les mêmes caractéristiques d'écoulement que le réacteur torique fermé.

D'autre part, une représentation adimensionnelle a permis de proposer une corrélation entre le nombre de Reynolds d'écoulement et le nombre de Reynolds de mélange.

Les résultats des caractéristiques du mélange montrent que le rapport entre le temps de mélange et celui de la circulation du fluide peut atteindre une valeur égale à 22 et décroît légèrement avec l'augmentation du débit d'alimentation. Le produit Nt_m est relativement constant à partir d'un nombre de Reynolds d'environ 20000.

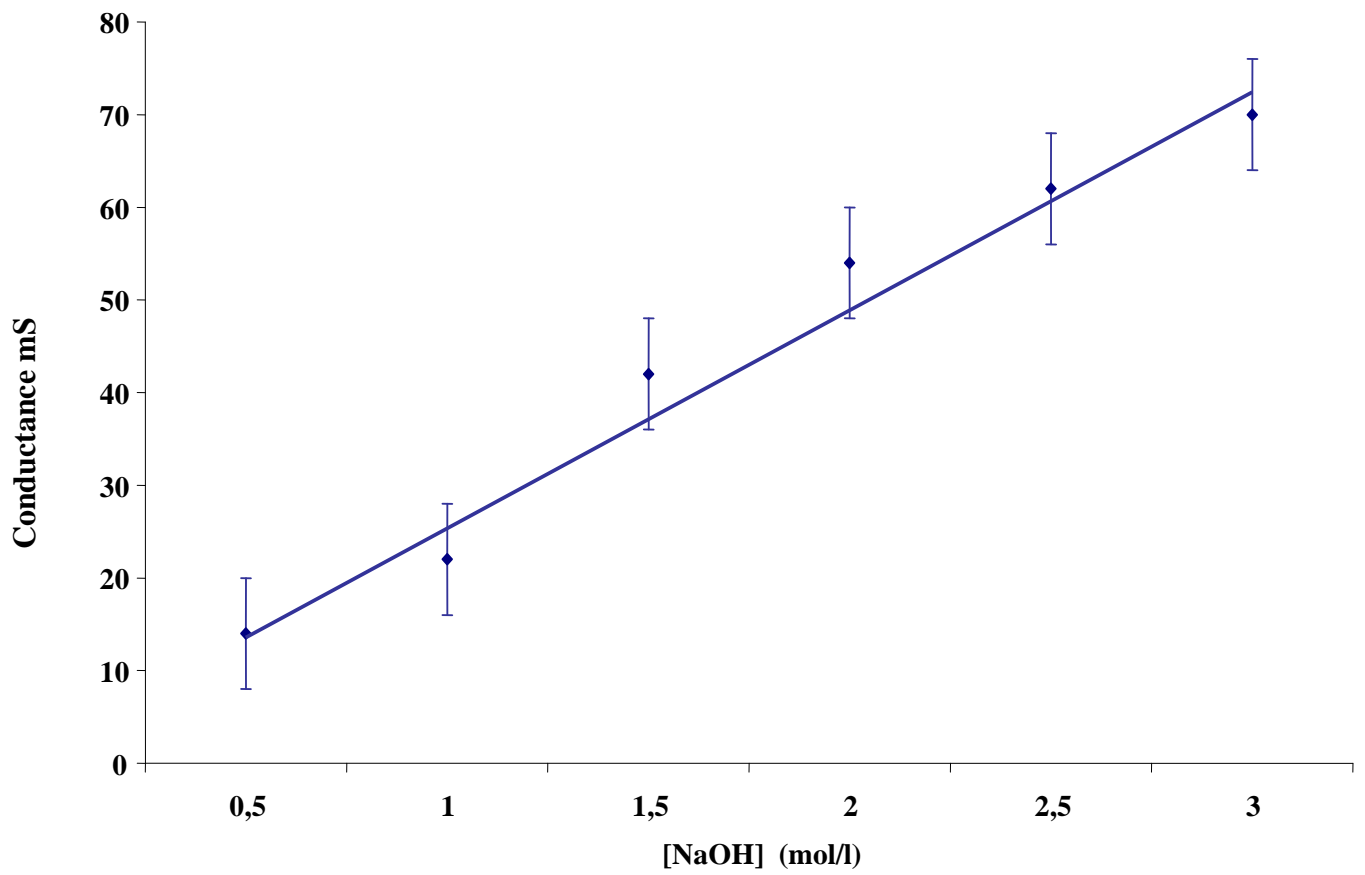
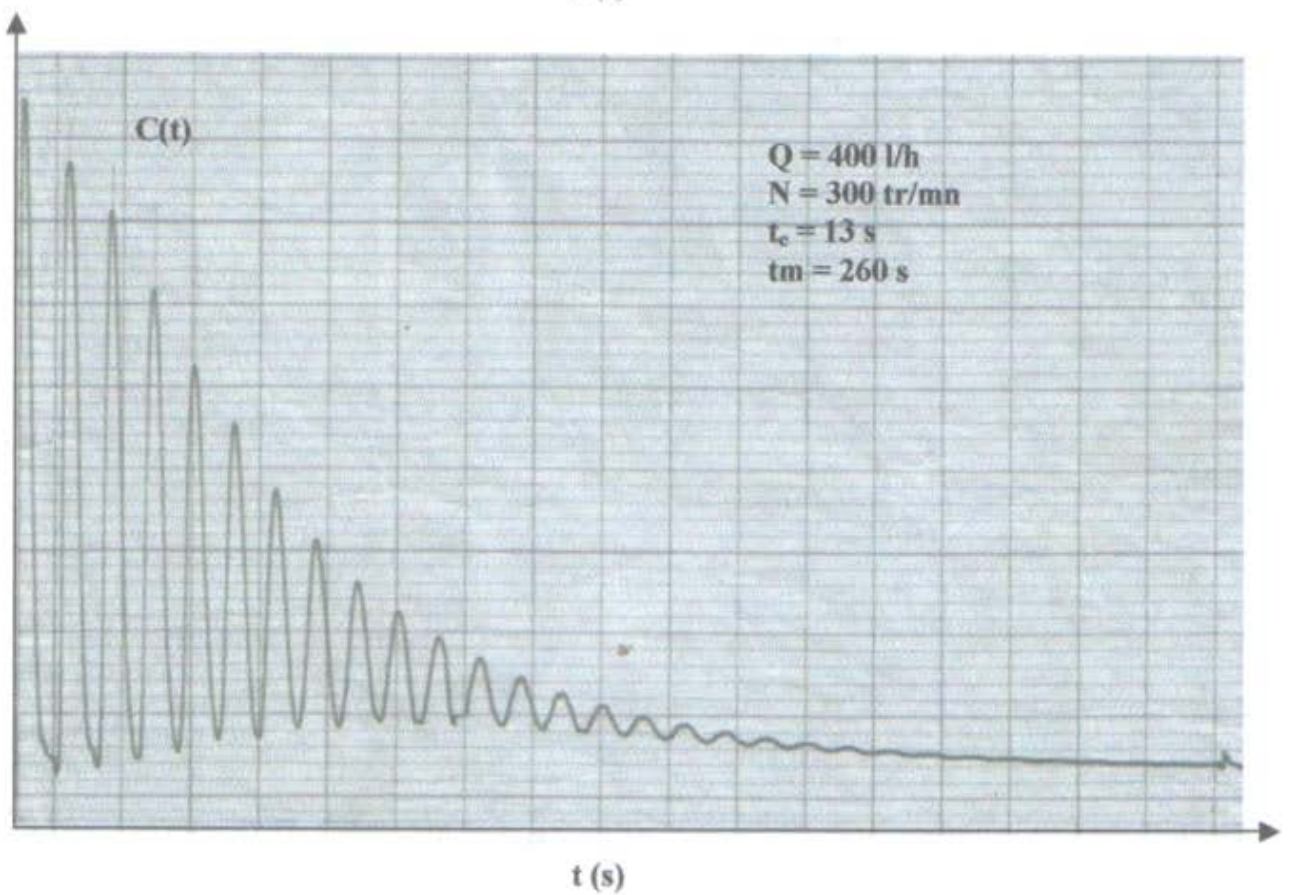
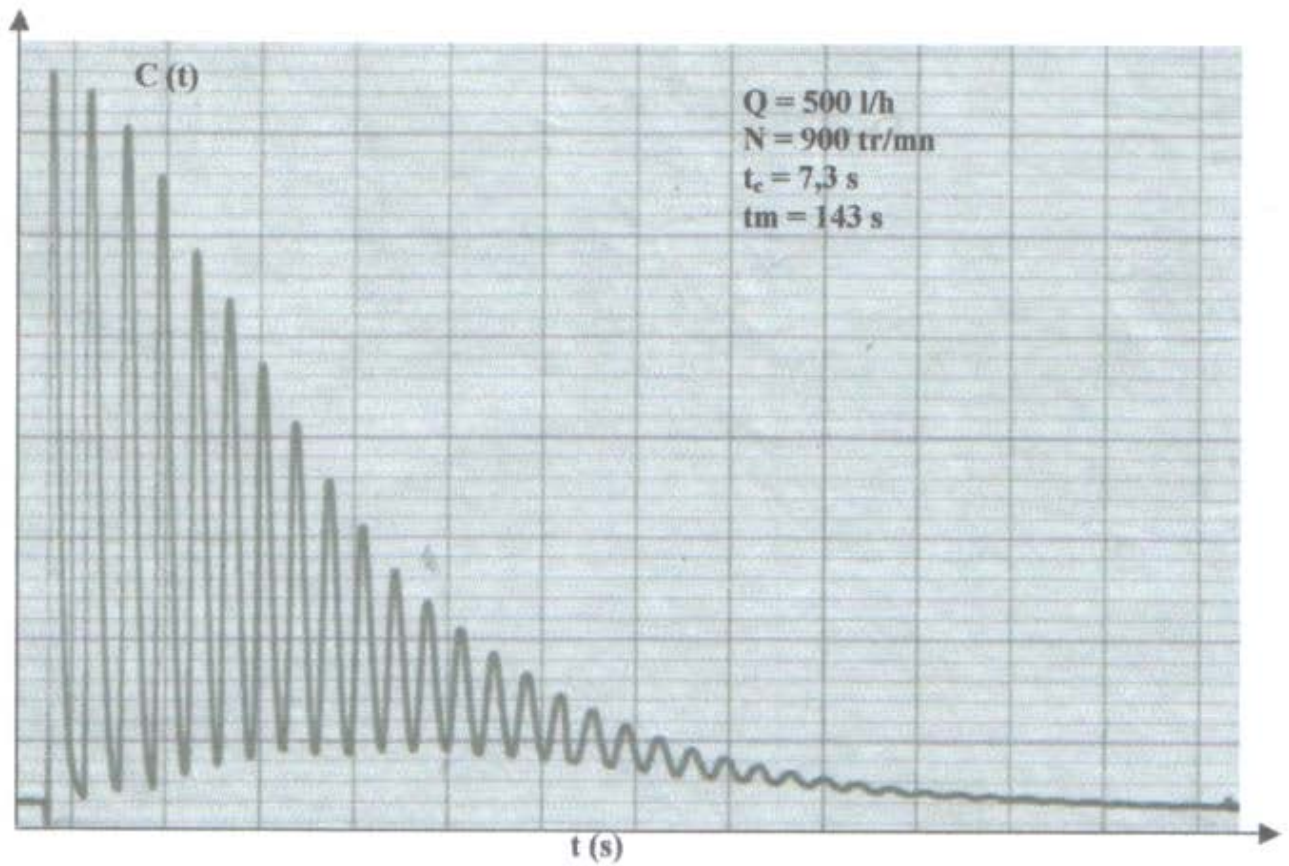
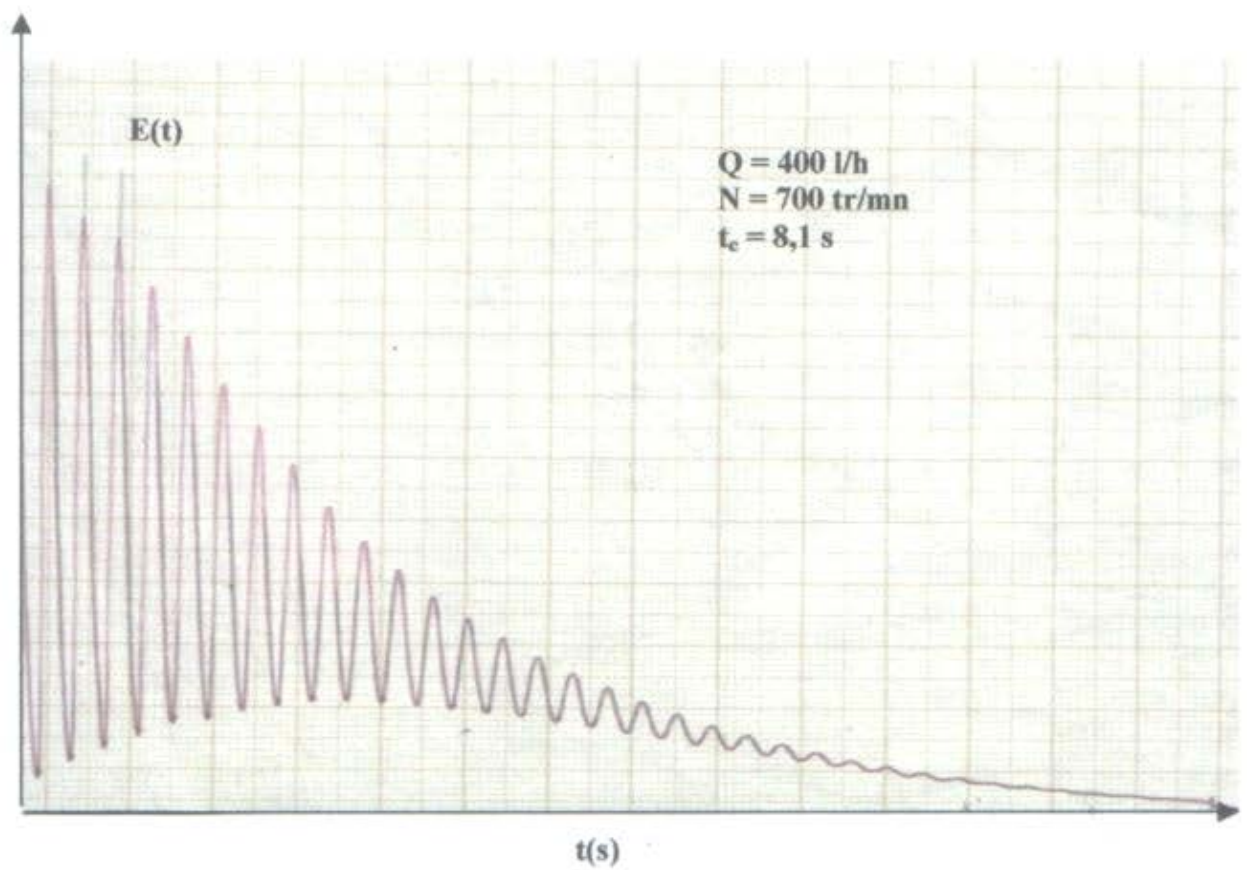
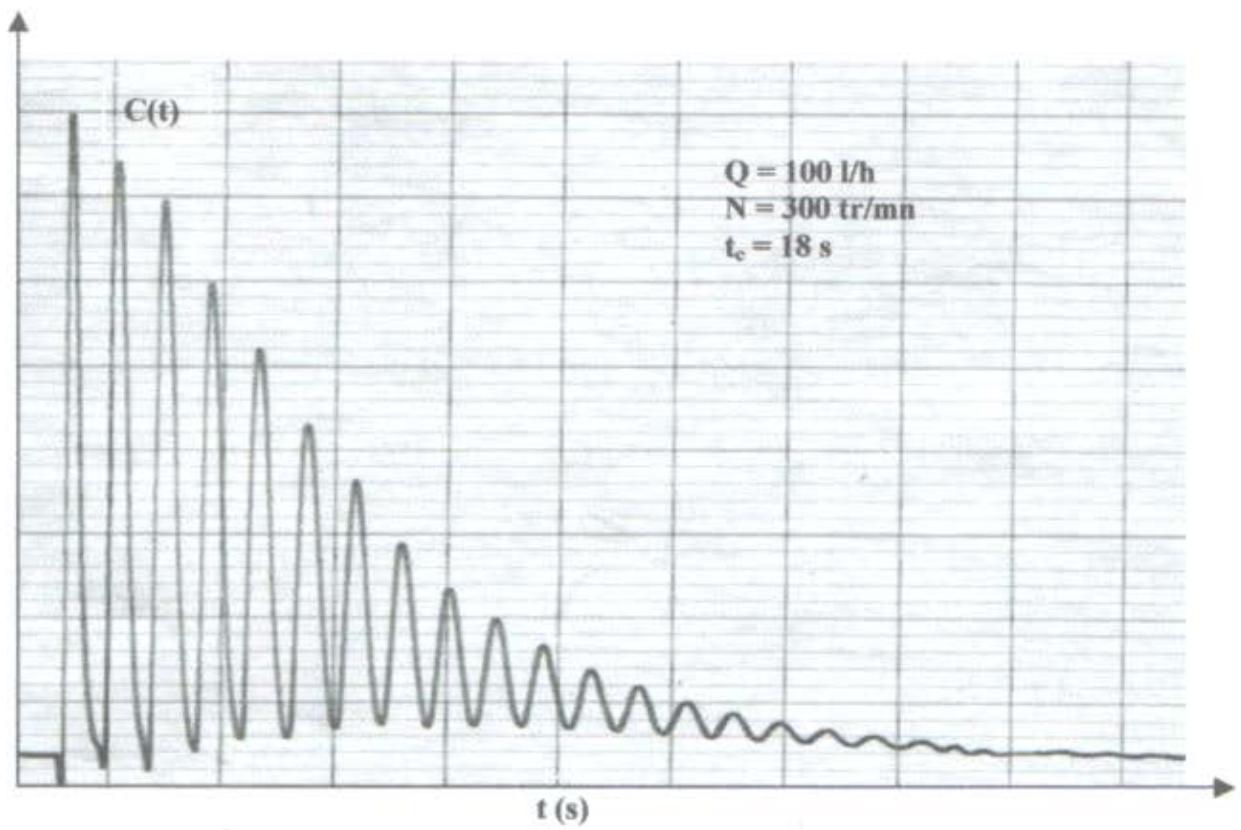
Annexe I-1.

Figure 1 : Courbe d'étalonnage de la sonde conductimétrique.

Annexe I-2.

Représentation des courbes expérimentales pour différents débits d'alimentation et vitesses d'agitation.





Annexe I-3. Etude préliminaire

Il est important de déterminer les conditions opératoires pour un fonctionnement optimal des expériences.

1- Détermination du volume et de la concentration optimums du traceur :

a- Détermination de la concentration du traceur :

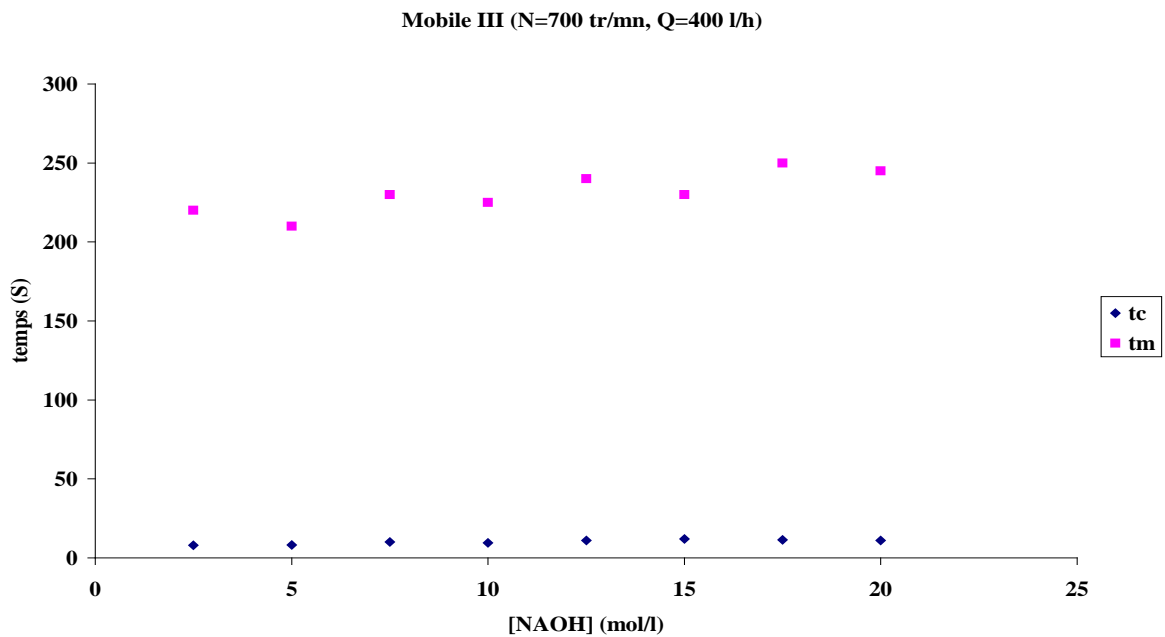


Figure 2 : Influence de la concentration du traceur injecté sur t_c et t_m .

b- Détermination du volume injecté :

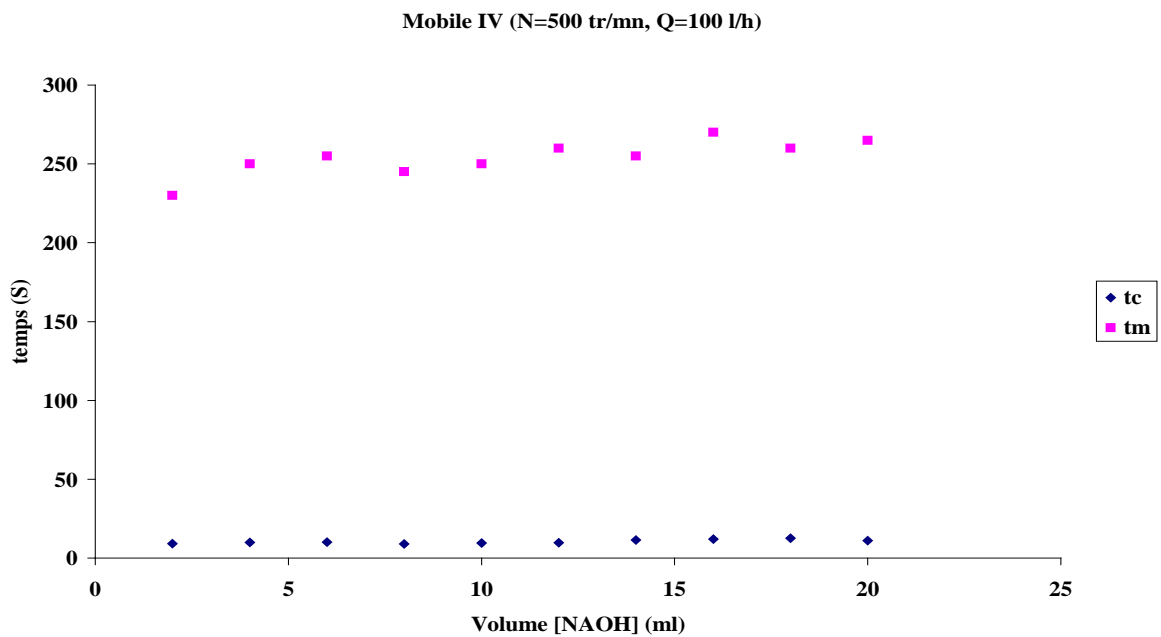


Figure 3 : Influence du volume du traceur injecté sur t_c et t_m .

D'après les figures 2 et 3, nous constatons que le volume injecté et la concentration du traceur n'influent pratiquement pas sur l'hydrodynamique et le mélange dans le réacteur torique. Pour notre étude nous avons choisi une solution de soude de 5 N et un volume de 6 ml est injecté au sein du réacteur entraînant un minimum de perturbation de l'écoulement.

2- Influence de la position circonférentielle de l'élément de mesure :

Nous avons conçu deux positions pour la sonde, l'une à 800 mm de l'agitateur et l'autre à une distance de 2000 mm c'est à dire à deux zones loin du mobile d'agitation. Nous constatons d'après la figure 4 que le temps de circulation et le temps de mélange pour plusieurs débits d'alimentation et différentes vitesses d'agitation sont les mêmes pour les deux positions, ce qui signifie que la position longitudinale du détecteur n'a pas d'influence sur l'hydrodynamique du réacteur, donc nous pouvons détecter dans n'importe quelle zone du réacteur sauf celle qui se trouve au voisinage du mobile d'agitation. Ce phénomène a été visualisé dans un réacteur à longueur droite en fonctionnement fermé par **Khalid** et coll [39].

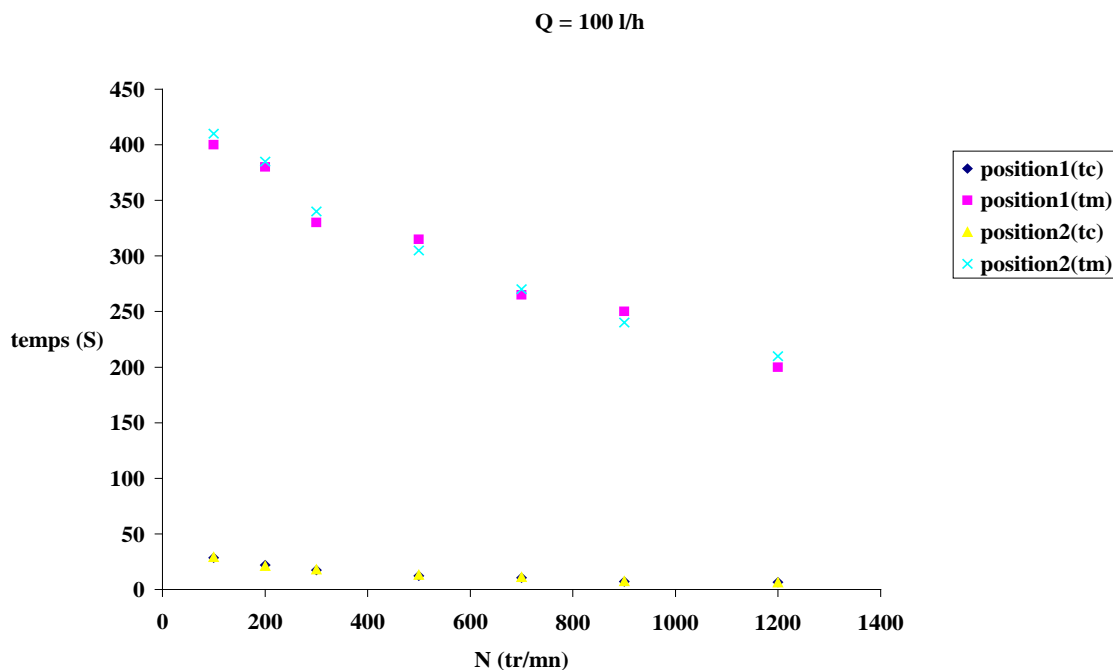


Figure 4 : Influence de la position de la sonde sur t_c et t_m .

3- Influence de la profondeur de l'agitateur :

L'ensemble des résultats expérimentaux est rapporté sur la figure 5 où l'on présente les courbes donnant les temps de circulation et de mélange pour chaque position du mobile d'agitation à l'intérieur du réacteur. Nous constatons d'après cette figure que la position de l'agitateur à l'intérieur du réacteur est pratiquement indépendante des paramètres d'écoulement. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux trouvés dans la cuve agitée d'après **Rachez** et coll [30] où l'agitateur est placé de manière à ce que les volumes du liquide au dessus et au dessous soient égaux.

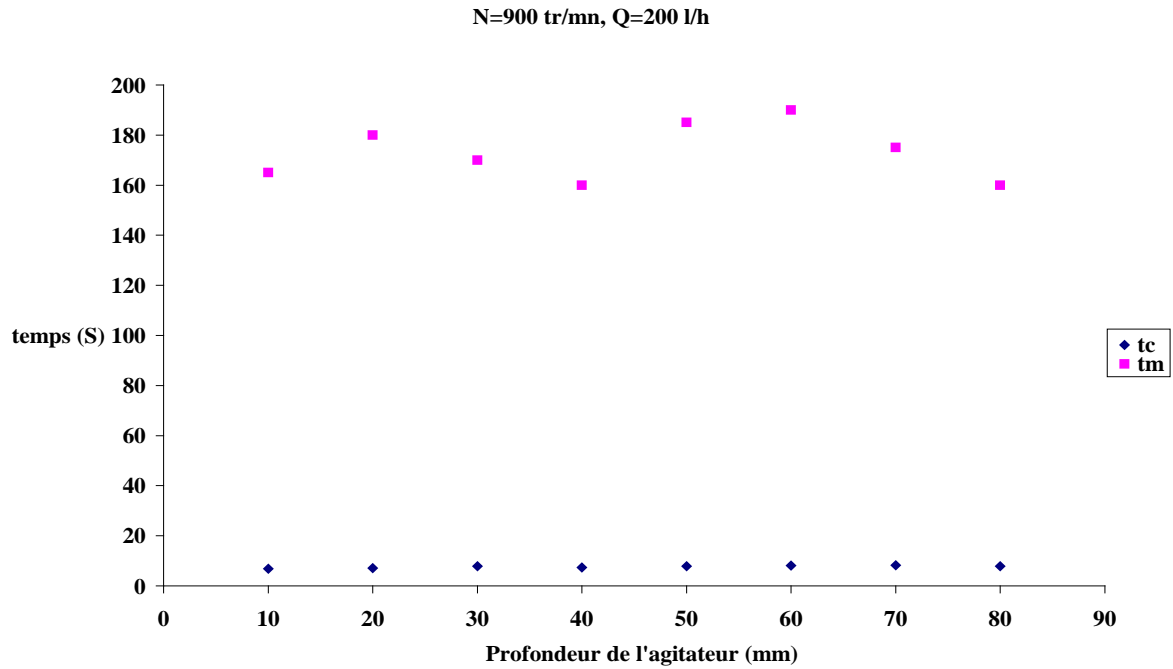


Figure 5 : Influence de la position de la sonde sur t_c et t_m .

4- Influence de la position de l'élément de mesure :

Dans un réacteur de forme torique, le mélange radial défini comme l'aptitude à la dispersion du traceur dans la direction radiale, est déterminé en plaçant la sonde dans plusieurs positions radiales. Nous constatons d'après la figure 6 que les résultats sont les mêmes pour les différentes positions. Ceci démontre l'efficacité du mélange radial à l'intérieur du réacteur. Cette constatation permet de confirmer l'absence de volume mort à l'intérieur du réacteur, ceci est en accord avec les travaux de la littérature [24, 25, 37, 39].

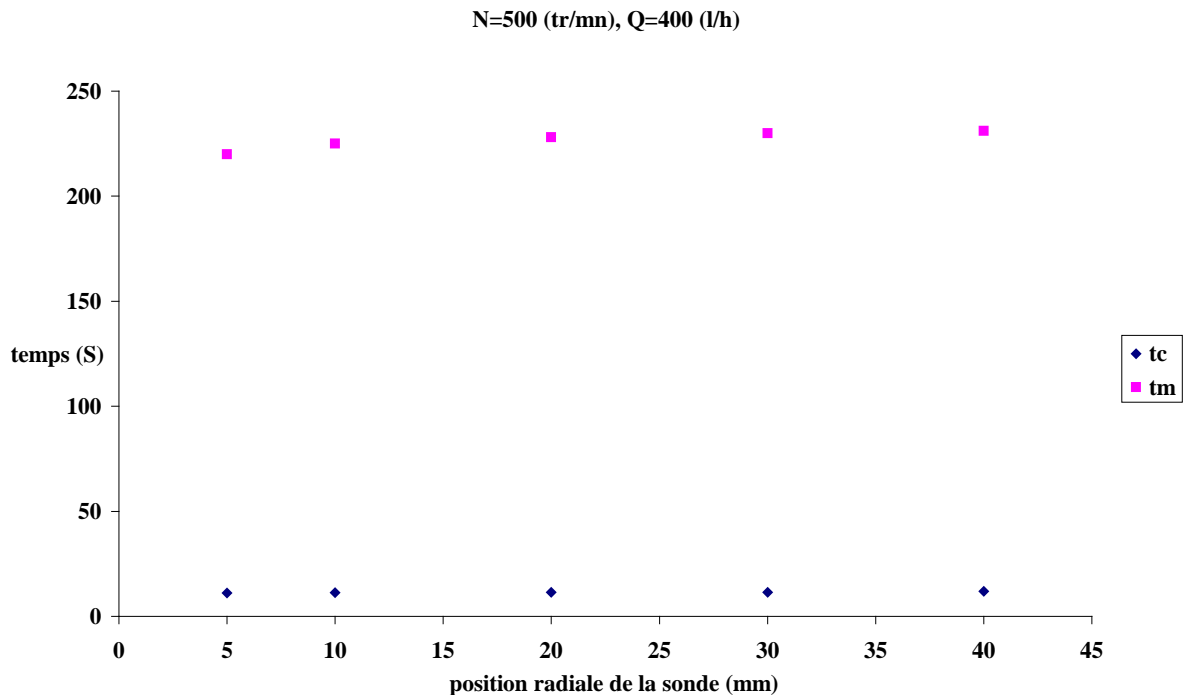


Figure 6 : Influence de la position radiale de la sonde sur t_c et t_m .

Annexe I-4.**Résultats expérimentaux :****Tableau N°1 : Valeurs expérimentales du temps de circulation t_c (s) pour tous les mobiles utilisés, $Q = 100$ l/h.**

N (tr/mn)	t_c (s)				
	Mobile I	Mobile II	Mobile III	Mobile IV	Mobile V
100		28.5	29	24	42
200		22	23	19	34
300	59	17.5	18	12	27
500	32	12.4	12	9.5	17.5
700	22	10.5	10.3	6.5	12
900	17	7	7.5	5.5	8
1200	15	6.5	6.1	5	7.5

Tableau N°2 : Valeurs expérimentales du temps de mélange t_m (s) pour tous les mobiles utilisés, $Q = 300$ l/h.

N (tr/mn)	t_m (s)				
	Mobile I	Mobile II	Mobile III	Mobile IV	Mobile V
100		330	350	320	520
200		315	320	290	450
300	570	270	259	260	400
500	415	245	230	220	360
700	290	205	200	180	270
900	243	160	155		200
1200	208	130	138		180

Annexe I-5.**Résultats expérimentaux :****Tableau N°3 : Variation du temps de circulation en fonction de la vitesse d'agitation pour différents débits d'alimentation en utilisant l'agitateur III.**

N(tr/mn) Q(l/h)	t_c (s)						
	100	200	300	500	700	900	1200
50	36	28.5	21.5	12.2	10.3	7.7	6.2
100	29	23	18	12	10.3	7.5	6.1
200	25.8	20.3	15.9	11.7	10.1	7.3	5.9
300	21.5	16.6	13.9	11.4	9.5	7.4	5.9
400	16.7	14.9	13	11.2	8.1	7.4	5.9
500	12.5	12.3	11.9	10.9	9.7	7.3	5.8

Tableau N°4 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation pour différents débits d'alimentation en utilisant l'agitateur III.

N(tr/mn) Q(l/h)	t_m (s)						
	100	200	300	500	700	900	1200
50	605	520	460	280	226	187	152
100	590	560	520	300	225	172	150
200	490	370	320	243	205	160	140
300	350	320	259	230	200	155	138
400	280	270	260	220	210	150	130
500	220	215	205	190	170	143	120

Annexe I-6.

Dans les tableaux ci dessous, nous avons donné les valeurs du temps de circulation (t_c) et du temps de mélange (t_m) pour les trois positions de soutirage considérées en utilisant l'agitateur III.

Tableau N°5 : Influence de la position de soutirage sur le temps de circulation pour deux débits d'alimentation.

		Q = 100 l/h					
N(tr/mn)	100	200	300	500	700	900	1200
$t_c (s_1)$	29	23	18	12	10.3	7.5	6.1
$t_c (s_2)$	31	24	19	11	9.5	7.1	6
$t_c (s_3)$	32	25	20	11.5	10.5	7.3	6.2

		Q = 300 l/h					
N(tr/mn)	100	200	300	500	700	900	1200
$t_c (s_1)$	21.5	16.6	13.9	11.4	9.5	7.4	5.9
$t_c (s_2)$	23	17	15	11	9.2	7.6	6.2
$t_c (s_3)$	22	18	14	12	10	7.5	6.3

Tableau N°6 : Influence de la position de soutirage sur le temps de mélange pour deux débits d'alimentation.

		Q = 100 l/h					
N(tr/mn)	100	200	300	500	700	900	1200
$t_m (s_1)$	590	560	520	300	225	172	150
$t_m (s_2)$	570	550	525	320	220	170	155
$t_m (s_3)$	580	555	524	330	225	175	160

		Q = 300 l/h					
N(tr/mn)	100	200	300	500	700	900	1200
$t_m (s_1)$	350	300	259	230	195	155	138
$t_m (s_2)$	345	304	255	230	190	154	130
$t_m (s_3)$	340	305	250	232	194	150	135

Références bibliographiques

- [1] Levenspiel O. , chemical reaction engineering.
Edition. Jhon Wiley et Sons, New York, (1999).
- [2] Norwood D. , et coll. , Japan Patent, Showa 37, 10087, (1962) , (cité dans [3])
- [3] Sato Y. , Murakami Y. , Hirose T. , Hashiguchi Y. ,
"flow pattern, circulation velocity and pressure loss in loop reactor"
J.chem. Eng. Japan, vol 12, N° 6, 448, (1979).
- [4] Laederach H. , Widmen F. ,
"le bioréacteur torique"
Information chimie N°249, 157, (1984).
- [5] Gerda H.S. , R UVD P.G. , Gerard J.Z. , Karel C.A.M, A comparative study of a
fluidised bed reactor and a gas lift loop reactor for the IBE process.
Part II : hydrodynamics and reactor modelling
J.chem. Tech. Biotech. , 36, 415, (1986).
- [6] Kresber U. , Meyer H.P. and Fiechter A.
A comparison between the performance of continuously stirred tank bioreactor and a
torus bioreactors with respect to highly viscous culture broth.
J.chem. Tech. Biotech., 43, 107, (1988).
- [7] DER. Yvan L. , KUO. JF. , Wang J.H. , CHEN C.Y. ,
"study on the continuous loop tubular reactor for emulsion polymerisation of styrene",
polymer. Eng. Sci.
Vol 30, N° 3, 187, (1990).
- [8] Alder I., Fiechter A ,
"Valuation of bioreactors demand"
Bioprocess Engn. 1. 51, (1986).
- [9] Tananka M. , O'shima E. ,
"Dispersing behaviour of droplets in suspension polymerisation of styrene in a loop
reactor", Can.J.chem.Eng , vol 66, 29, (1988).
- [10] Murakami Y. , Hirose T. , ONO S. , Nishijima T. ,
"power conception and pumping characteristics in a loop reactor"
Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev, 21, 273, (1982).
- [11] Hosagai K. , Tanaka M. ,
"study of suspension polymerisation of styrene with a circular loop reactor".
Polymer Eng. Sci. Vol 32, N°6, 431, (1992).
- [12] Belleville P. , Le grand J. ,
"étude de la vitesse de circulation interne dans un système agité en géométrie toroïdale"
Rapport interne N°99. (1996).

- [13] Belleville P. , Nouri L. , Le grand J. ,
"mixing characteristics in the tours reactor"
Chem. Eng. Technol. 15, 282 (1992).
- [14] Le grand J. , Gueguen J. , Berots. ,
"acetylation of pea isolate in a tours micro reactor"
Bio and bio engineering, 53, 4, 410, (1997).
- [15] Tanaka M. , Takahashi T. , Kimura I. ,
"effect of double agitation on particle size in suspension polymerisation of styrene with a loop reactor"
Chem. Eng Technol. , vol 19, 97, (1996).
- [16] Carlos A. , José C. , José M. ASUA.
"emulsion copolymerisation of vinyl esters in continuous reactors : comparison between loop and continuous stirred tank reactors"
Journal of applied polymer sciences, vol 56, 419, (1995).
- [17] Iabbadene A., Bataille P.,
"emulsion polymerisation of vinyl acetate in tubular loop reactor"
Journal of applied polymer-science, vol 51, 503, (1994).
- [18] Benzemel H. ,
"écoulement dispersé dans un réacteur à boucle granularité et turbulence"
Thèse de doctorat, université de Nantes (1999).
- [19] Nouri L. , Belleville P. , Le grand J. , Popineau Y. ,
"présentation du réacteur torique, application à l'hydrolyse enzymatique des protéines de blé". Rapport interne N°23 (1994).
- [20] Nouri L. , Le grand J. , Popineau. Y,
"enzymatic hydrolysis of wheat proteins"
Part I : Enzymatic kinetics and study of limited hydrolysis in a bath stirred reactor
Chem. Eng. Journal, 65, 187, (1997).
- [21] Benkhalifa H., Le Grand J., Legentilhomme P.,
"modelling of continuous torroïdal reactors"
Récents progrès en génie des procédés, 11, 51, 19, (1997).
- [22] Benkhalifa H. ,
Etude du réacteur torique : Modélisation et application à la transformation de protéines.
Thèse de doctorat. Université de Nantes (2000).
- [23] Blenke H. ,
"advances in biochemical engineers"
Loop reactor, 13-121. (1979).

- [24] Hamani S. ,
"caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique"
Mémoire de Magister. EMP Bordj el bahri. (1999).
- [25] Kaoua. GH,
"caractérisation et modélisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur à
boucle de forme torique"
Mémoire de Magister. U.S.T.H.B, (2000).
- [26] Rihani R.
Eude de réaction de saponification
Mémoire de Magister. EMP Bordj El Bahri
- [27] Danckwerts PV. ,
"continuous flow systems. Distribution of residence limes".
Chem. Eng. Sci, vol 2, N°1, 1, (1953).
- [28] Ronze D. , Pierrard P. , Zonlaliana A. ,
"influence de la DTS du fluide sur la détermination de la conductance globale de
transfert thermique entre un fluide en écoulement et la paroi d'un système ouvert"
Entropie N°166, 21, (1991).
- [29] Villiermaux J. ,
"génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs"
Edition technique et documentation, Lavoisier (1982).
- [30] Rachez D. , David R. , Villiermaux J. ,
"un nouveau modèle de circulation interne dans une cuve agitée de type industriel"
Entropie N°101, 32. (1981).
- [31] Gibson C.H. , schartz W.H. ,
"detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field"
J. fluid. Mech, 16, 357, (1963).
- [32] Brodberger J.F. , valentin G. , stock G. ,
"a conductimetric method for the study of mixing phenomena in liquids".
Electrochimica. Acta, 28, 5, 619, (1983).
- [33] Lamb DE. , Maning FS. , Wilhelm RH. ,
"measurement of concentration fluctuation with an electrical conductivity probe".
Aiche Journal, 6, 4, 682, (1960).
- [34] Stern C.H. , GREIF R. , Humphrey J.A.C
"an experimental study of natural convection in a toroidal loop"
Journal of heat transfer. 110, 877. (1988).
- [35] Tanaka M. , Sendai T. , Hosogai K. ,
"flowing characteristics in a circular loop reactor"
Chem. Eng. Res, vol 67, 423, (1989).

- [36] Gelus M. , Cardinal L.E. ,
"choix d'un agitateur lorsque la viscosité varie de 1 centipoise à 2000 poises".
Entropie N°88. (1979).
- [37] Nouri. L,
"étude des performances du réacteur torique, application à l'hydrolyse enzymatique des
protéines végétales"
Thèse de doctorat, Université de Nantes, (1994).
- [38] Kawase . Y. , Moo-Young. M,
"mixing time in bioreactors"
Journal. Chem. Tech. Biotech, 44, 63, (1989).
- [39] Khalid. A,
"transfert de matière au point d'arrêt dans un écoulement turbulent établi"
Récent progrès en génie des procédés, 5,13, 109, (1991).

II-1 INTRODUCTION

Après avoir étudié les caractéristiques de l'écoulement et du mélange dans le réacteur torique en fonctionnement ouvert, dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude de la distribution de pressions suivant la circonférence du réacteur. Ces informations permettent de suivre l'évolution de la puissance dissipée au sein du réacteur torique ouvert en fonction du nombre de Reynolds de mélange.

Ce chapitre sera donc consacré à l'étude énergétique dans le réacteur torique muni d'un mobile d'agitation. Ce dernier a été choisi dans le chapitre I. L'étude s'achèvera par une comparaison de la puissance consommée dans le réacteur en fonctionnement ouvert et fermé.

II-2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La majorité des études faites sur les pertes de charge ont été réalisées dans des conduites droites ou dans des coudes. En revanche, très peu d'études ont été réalisées sur une série de coudes formant un système fermé tels que le réacteur à boucle.

Sato et Coll [1] ont mesuré expérimentalement les pertes de charge dans les coudes et les longueurs droites et ils les ont comparé aux valeurs calculées. Ils ont constaté que les pertes de charge globales sont en bon accord avec celles calculées respectivement dans une conduite et un coude.

Tanaka et Coll [2] ont montré que pour un nombre de Reynolds d'écoulement (Re_c) donné, les chutes de pression ΔP occasionnées dans le réacteur torique augmentent en fonction de la distance par rapport au mobile d'agitation.

Les résultats obtenus (figure 1) montrent que les ΔP dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire sont importantes par rapport à celles mesurées dans un réacteur parfaitement torique et notamment au niveau des coudes où les pertes de charge subissent des variations brutales.

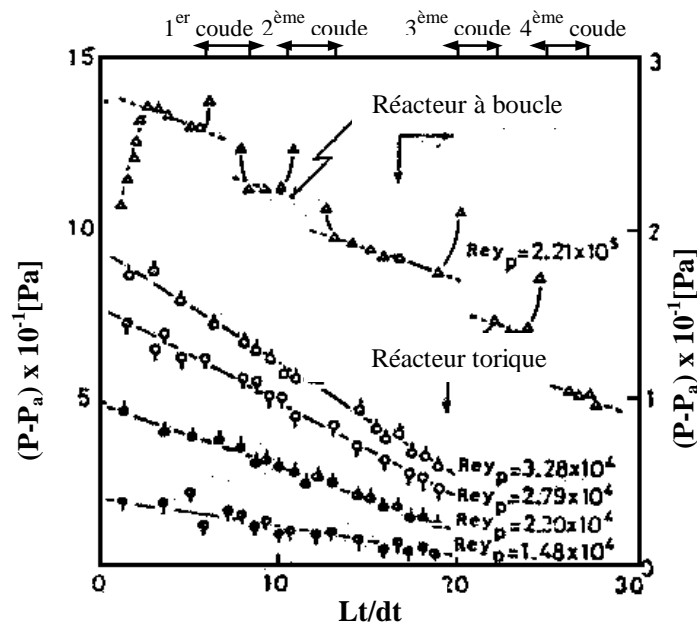


Figure 1 : Variation de la chute de pression dans le réacteur à boucle de forme rectangulaire et torique, [2].

Laederach et Coll [3] ont mis en évidence l'intérêt du bio réacteur torique par rapport au bio réacteur agité en prenant comme critère la consommation d'énergie.

Murakami et Coll [4] ont mesuré la puissance dissipée dans le réacteur à boucle de forme rectangulaire.

$$P_d = N_p \cdot \rho \cdot d_1^5 \cdot N^3 \quad (1)$$

Où N_p est le nombre de puissance ou coefficient de traînée de l'agitateur.

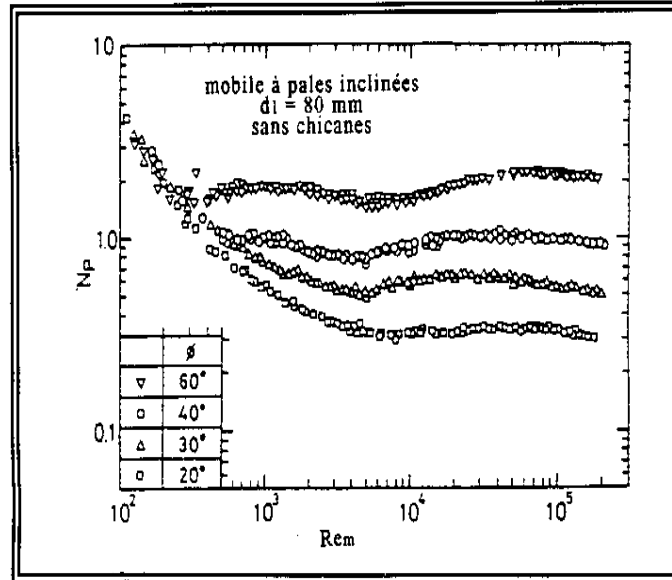


Figure 2 : variation du nombre de puissance N_p en fonction de Re_m et des caractéristiques géométriques des mobiles d'agitation dans les réacteurs à boucle, [4].

D'après la figure 2, on peut constater que pour Re_m inférieur à 1000, la puissance consommée est très peu influencée par la variation de l'angle d'inclinaison des pâles du mobile d'agitation. Pour $10^3 < Re_m < 10^4$, ils ont trouvé que le nombre de puissance est proportionnel à $(\sin \alpha)^2$. Ces courbes montrent qu'au-delà d'une certaine valeur du nombre de Reynolds de mélange, le nombre de puissance N_p peut être considéré comme constant et est une caractéristique de la géométrie du système mobile / réacteur. Ceci est en accord avec les travaux de **Lelan** et coll [5] dans un réacteur agité.

Ces auteurs [4] ont aussi constaté que la puissance dissipée dans le réacteur torique ouvert est légèrement supérieure à celle du réacteur fermé.

Une autre étude portant sur l'aspect énergétique a été réalisée par **Hosogai** et Coll [6]. Ils ont montré que dans le cas d'un réacteur torique, le nombre de puissance N_p était proportionnel à la vitesse d'agitation au cube (N^3). Cette dépendance est en accord avec celle observée dans les réacteurs agités. Ils ont aussi établi une relation empirique (équation 2) permettant de calculer le taux d'énergie dissipée ε_p .

$$\varepsilon_p = \frac{8,8 \cdot 10^{-2} Re^{-0,25} U_c^3}{d_t} \quad (2)$$

Nouri [7] a étudié l'influence de la position du réacteur torique sur les pertes de charge occasionnées au sein du réacteur. La représentation graphique donnée par la figure 3 caractérise l'influence des pertes de charge sur la vitesse moyenne de circulation. Il a été

constaté que pour une même vitesse moyenne de circulation, les pertes de charge sont plus importantes dans le réacteur en position verticale par rapport à celle du réacteur en position horizontale. D'une autre manière, pour une même vitesse moyenne de circulation, la puissance dissipée dans le réacteur torique est plus importante en configuration verticale qu'horizontale.

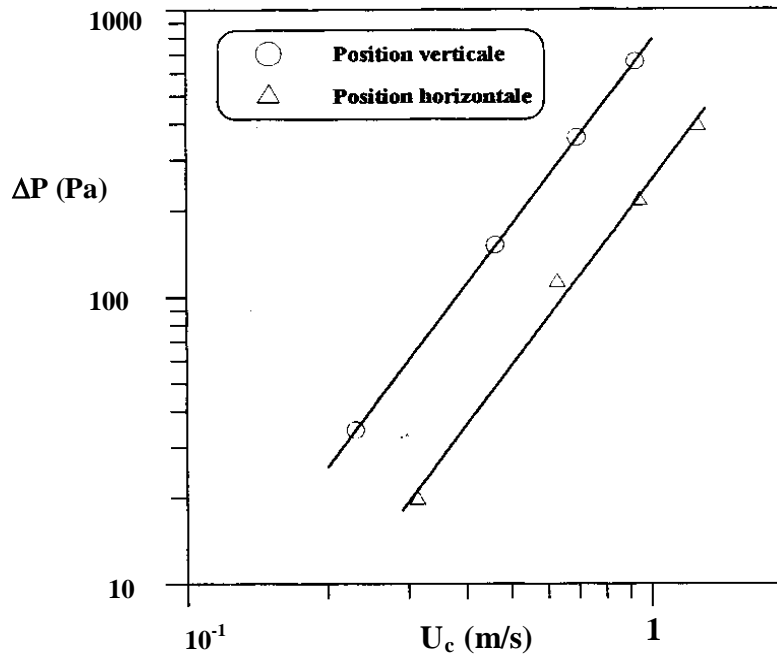


Figure 3 :Variation de la vitesse moyenne de circulation en fonction des pertes de charge pour les deux configurations, [7] .

La puissance dissipée dans un réacteur torique à longueur droites (R.T.L.D) a été estimée par **Khalid** et Coll [8] .

Cette puissance dissipée est directement liée aux chutes de pression dans le réacteur, ΔP , au volume du réacteur, V_R , à la vitesse moyenne de circulation du fluide, U_c , et inversement proportionnelle à la longueur totale du réacteur, L_t , tel que :

$$P_d = U_c \frac{\Delta P}{L_t} \cdot V_R \quad (3)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 4 et comparés ceux de **Tanaka** et Coll [2], qui ont corrélié la puissance dissipée à la vitesse d'agitation dans un réacteur parfaitement torique. La différence constatée entre les deux types de réacteurs, pour différents nombres de Reynolds de mélange, est probablement due à la contribution des parties droites sur les pertes de charge dans le réacteur torique à longueur droites et par conséquent sur la puissance dissipée dans cette région du tore.

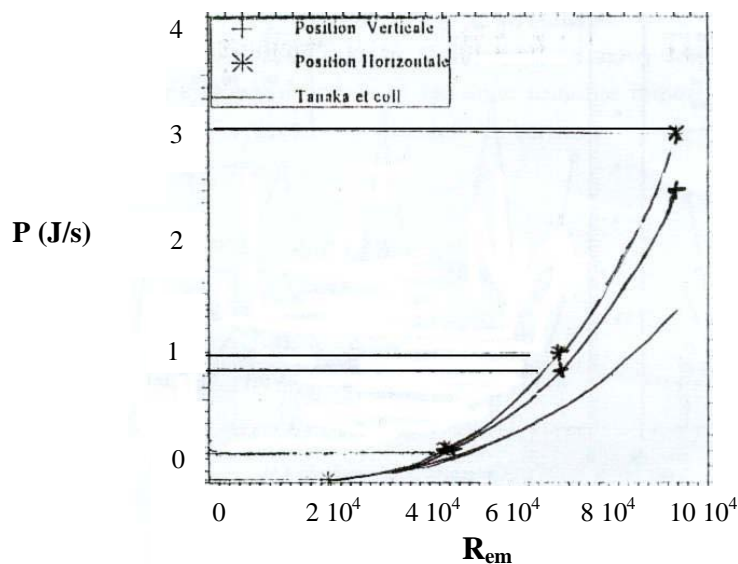


Figure 4: Influence du nombre de Reynolds de mélange Re_m sur la puissance dissipée dans le réacteur torique d'après [8].

II-3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Pour cette étude, le réacteur utilisé est le même que celui décrit dans le chapitre I. Il est placé horizontalement (figure 5).

La circulation du fluide à l'intérieur du réacteur est assurée par la rotation d'un mobile d'agitation à débit axial de type hélice marine à trois pâles, les dimensions de l'hélice correspondent à un diamètre extérieur (d_1) de 50 mm et intérieur (d_2) de 12 mm, et un angle d'inclinaison de 45° . Ce mobile d'agitation a été choisi dans le chapitre précédent, en se basant sur les temps de mélange et de circulation.

Pour les mesures des pertes de charge le long de la circonférence du réacteur, nous avons effectué 16 connections piézométriques, celles ci sont numérotées de 1 à 8 sur la paroi extérieure et de 9 à 16 sur la paroi intérieure. Ces prises de pression sont connectées par un flexible transparent à des tubes en verre de forme U dans un banc d'essai permettant la mesure de la pression différentielle.

La différence de pression ΔP a été mesurée pour différents débits d'alimentation et différentes vitesses d'agitation.

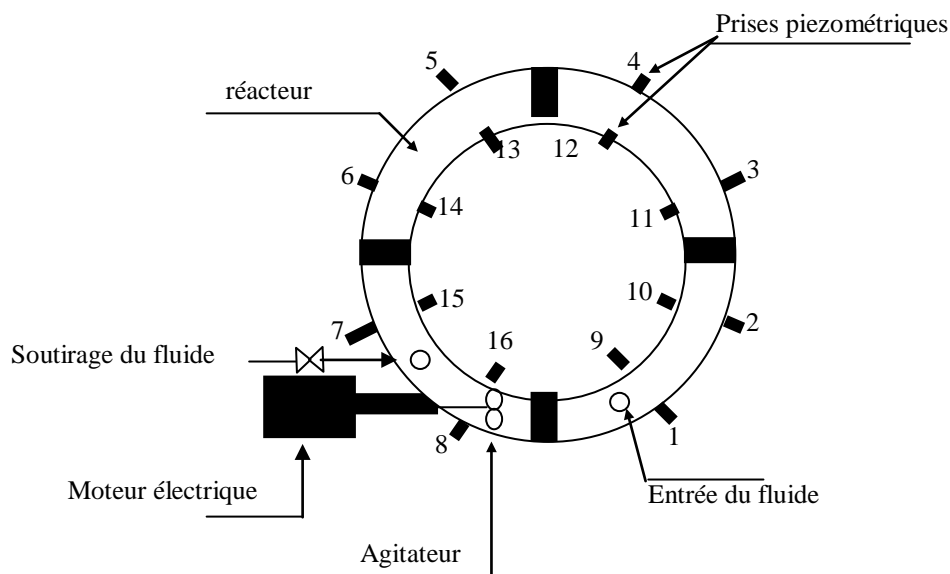


Figure 5 : Montage expérimental pour l'étude des pertes de charge dans le réacteur torique ouvert.

II-4 RESULTATS ET DISCUSSION

II-4-1 Evaluation de la pression différentielle entre la paroi extérieure et la paroi intérieure :

Les mesures concernant la variation de la pression différentielle entre la paroi extérieure et la paroi intérieure en fonction de la distance longitudinale dans le réacteur torique rapportée au diamètre du tore sont données sur les figures 6 et 7.

Sur ces figures, les résultats sont donnés pour différentes vitesses d'agitation et différents débit d'alimentation. Nous remarquons que l'existence des courbures provoque une perte de charge entre le côté extérieur et le côté intérieur du tore. Cet écart augmente avec l'élévation de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation. Ceci est dû à l'existence du mouvement secondaire créée par la courbure, qui a tendance à accélérer le mouvement dans la région externe. Donc ces figures permettent de montrer la présence d'un gradient de pression qui fait accélérer les molécules se trouvant près de la paroi extérieure.

Nos résultats sont en bon accord avec ceux de **Khalid** et coll [8] réalisés dans un réacteur torique à longueurs droites en système fermé, la seule différence enregistrée est au niveau des longueurs droites où l'écart entre les pressions prises à l'intérieur et à l'extérieur du tube se réduit, cette atténuation montre la dégénérescence tourbillonnaire dans les parties droites du tore.

Nos résultats sont aussi comparables à ceux de **Sato** et coll [1] dans un réacteur de forme rectangulaire et **Hamani** [9] dans un réacteur parfaitement torique en fonctionnement fermé.

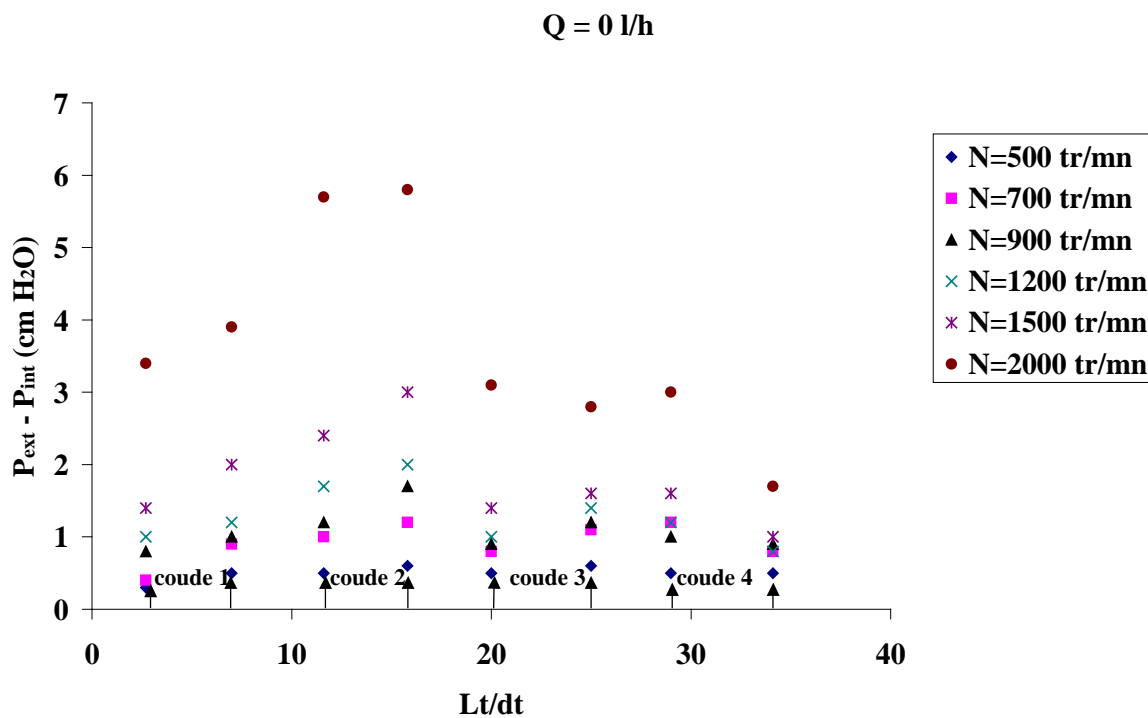


Figure 6 : Evolution de la pression différentielle ΔP dans le réacteur torique fermé pour différentes vitesses d'agitation.

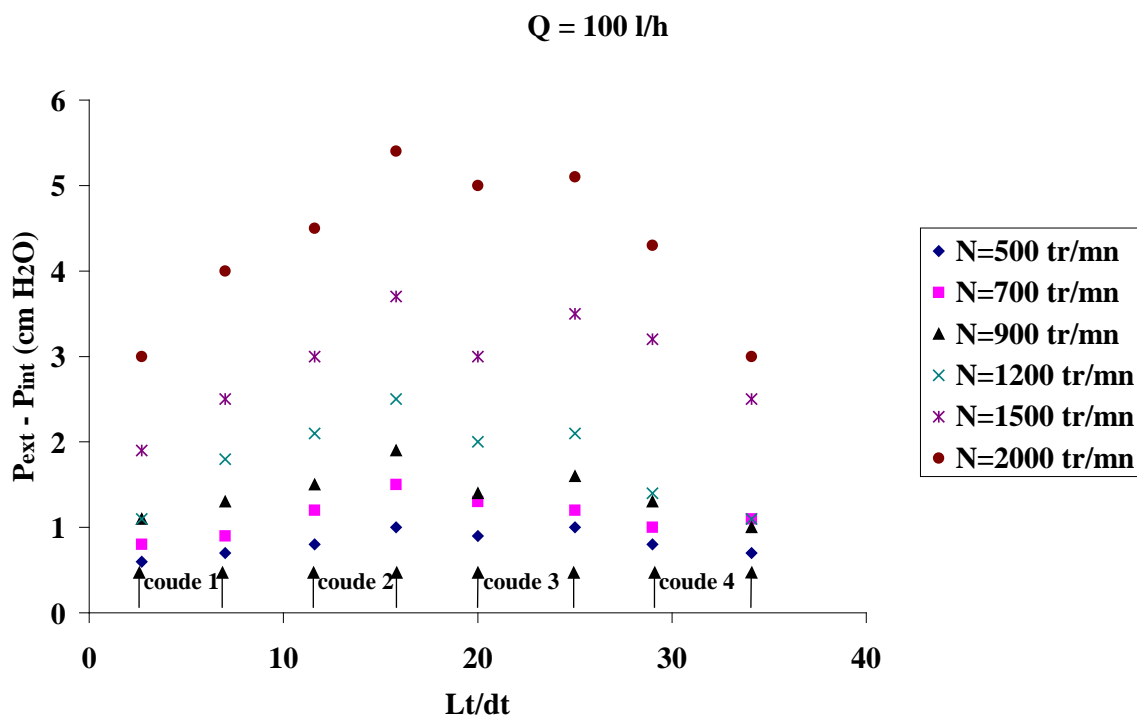
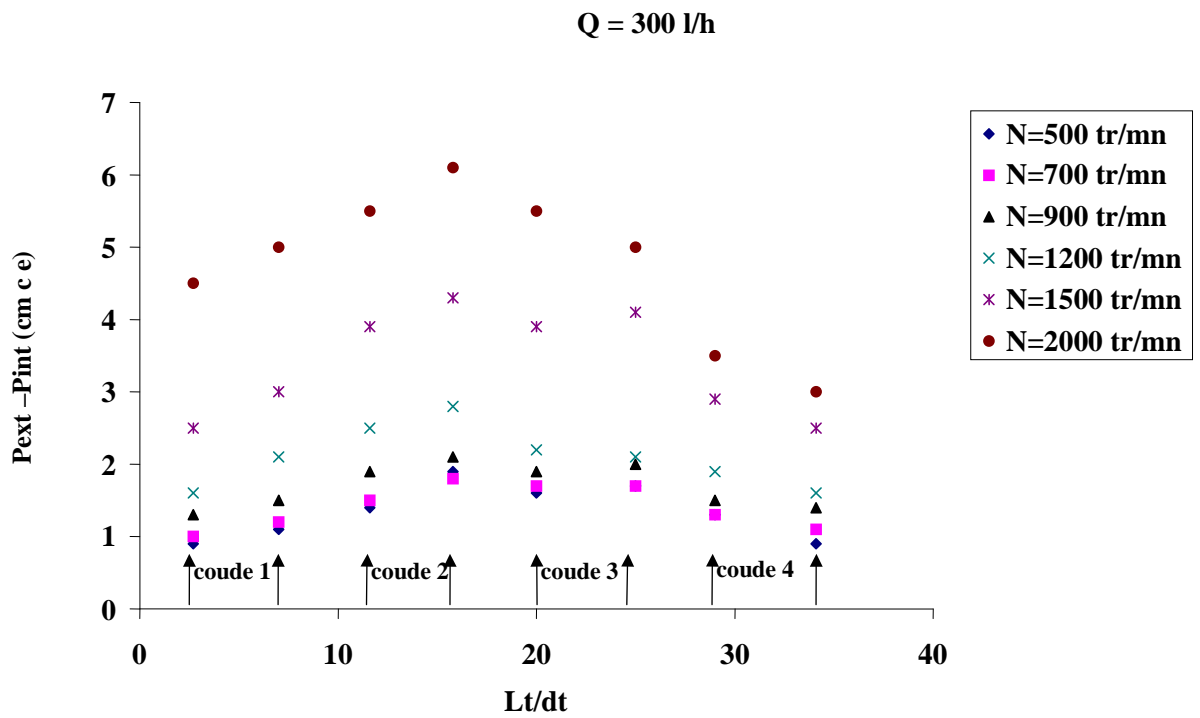
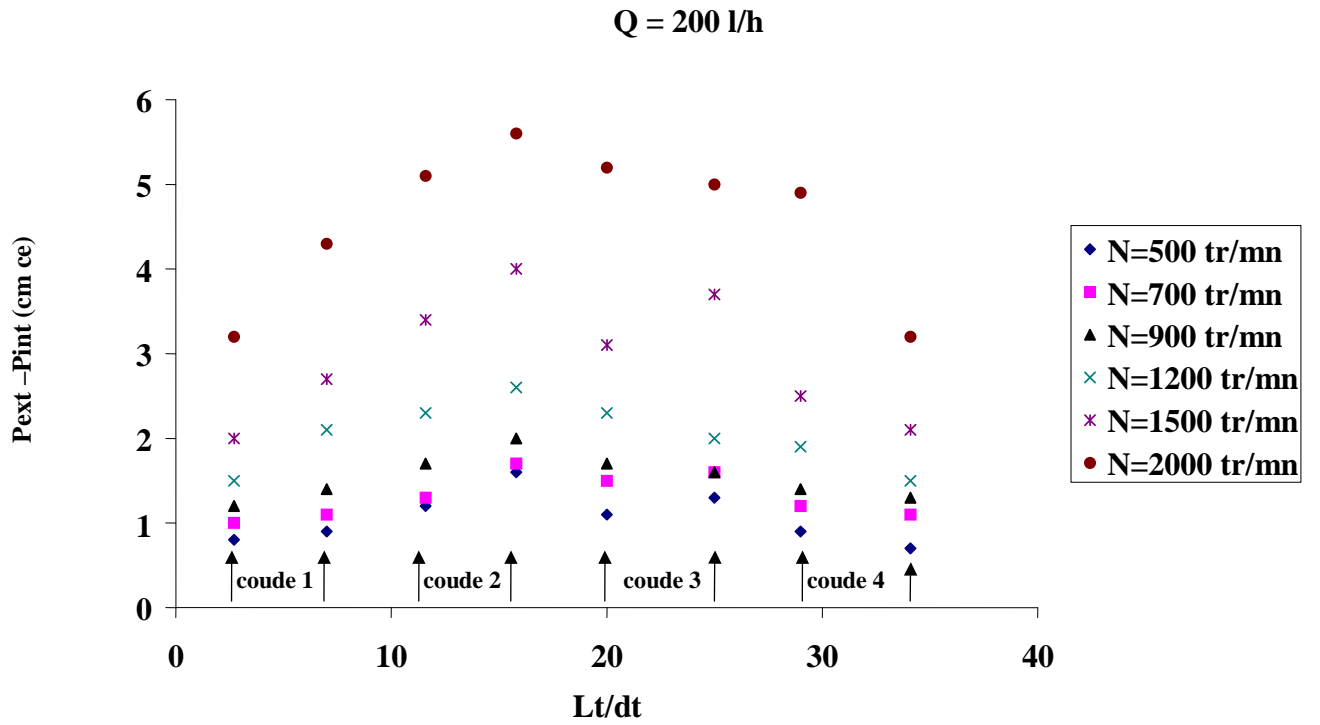


Figure 7-a.



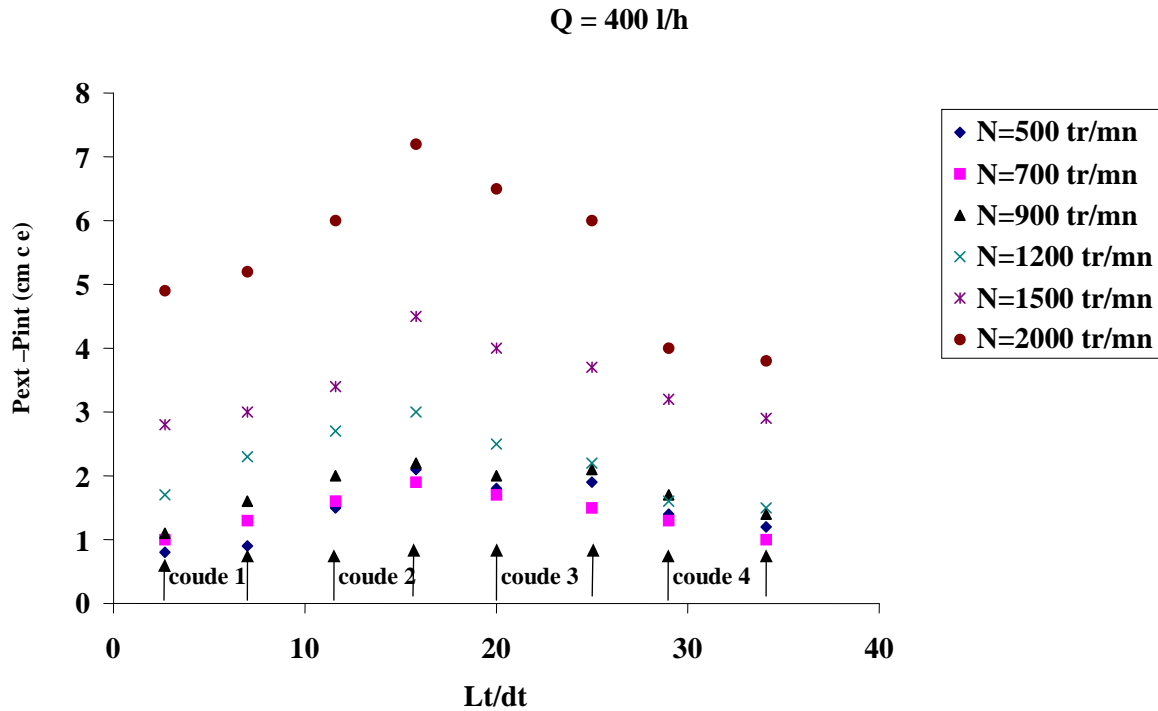


Figure 7-d.

Figure 7 : Evolution de la pression différentielle dans le réacteur torique ouvert.

II-4-2 Estimation de la puissance dissipée

La détermination de la perte de charge dans le réacteur torique ouvert, calculée à partir de la distribution de pression relative, permet d'étudier d'un point de vue énergétique, l'influence du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation sur la puissance dissipée. Cette dernière peut être considérée comme l'énergie par unité de temps nécessaire pour vaincre la résistance que le milieu agité oppose à la rotation des pâles du mobile d'agitation.

Cette puissance est directement liée aux chutes de pression dans le réacteur, elle a été déterminée à l'aide de la relation :

$$P_d = \Delta P Q_c \quad (4)$$

La puissance dissipée en fonctionnement ouvert P_o est calculée à l'aide du débit de circulation Q_c défini par l'équation citée dans le chapitre I.

$$Q_{c0} = \frac{V}{t_{c0}} \quad (5)$$

En fonctionnement fermé, la puissance dissipée P_f est déterminée à l'aide du débit de circulation dans le réacteur fermé Q_{cf} défini par l'équation :

$$Q_{cf} = \frac{V}{t_{cf}} \quad (6)$$

La figure 8 illustre l'évolution de la puissance dissipée en fonction du nombre de Reynolds de mélange dans le réacteur torique ouvert. Nous remarquons que la puissance dissipée est directement liée à la variation de Rem et qu'elle croît constamment lorsque le débit d'alimentation croît et par conséquent la puissance dissipée dans le système ouvert est

légèrement supérieure à celle dissipée dans le système fermé, cela est peut être dû au débit d'alimentation qui perturba l'écoulement dans le réacteur.

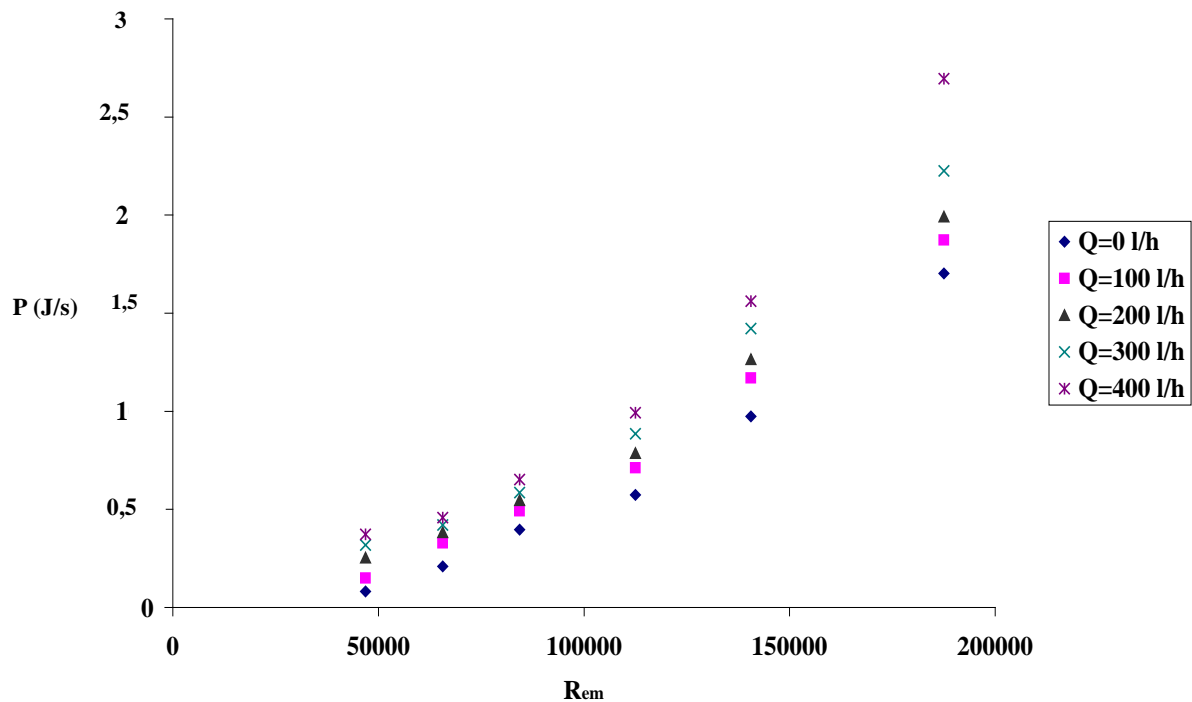


Figure 8 : Influence du nombre de Reynolds de mélange, Re_m et du débit d'alimentation, sur la puissance dissipée dans le réacteur torique.

II-4-3 Comparaison de la puissance dissipée évaluée dans le réacteur torique ouvert et fermé

Les mesures des chutes de pressions dans le réacteur torique avec et sans débit d'alimentation, à différentes vitesses d'agitation ont été effectuées afin de calculer la puissance dissipée dans le réacteur en fonctionnement ouvert, P_0 et fermé P_f . Sur la figure 9, le rapport $\frac{P_0}{P_f}$ est représenté en fonction de la vitesse d'agitation pour différents débits d'alimentation.

Nous pouvons remarquer, sur cette figure, qu'à forte vitesse d'agitation, le débit a peu d'influence sur la puissance dissipée en fonctionnement ouvert. L'apport énergétique est dans ce cas uniquement contrôlé par l'agitation. A faible vitesse d'agitation, par contre, le rapport $\frac{P_0}{P_f}$ est dépendant du débit d'alimentation. Il est particulièrement important pour $N = 500$

tr/mn et $Q = 400$ l/h, la puissance dissipée en fonctionnement ouvert est dans ce cas d'environ quatre fois plus importante que celle évaluée en fonctionnement fermé. Il semble donc qu'un effet de synergie entre l'apport énergétique de la pompe et celui du moteur d'agitation, se produise à faible vitesse d'agitation et à fort débit d'alimentation. Ce résultat est en accord avec les travaux de la littérature [4, 8, 10, 11] concernant la dissipation de l'énergie au sein d'un réacteur (agité ou torique) et pour les deux configurations (ouverte ou fermée).

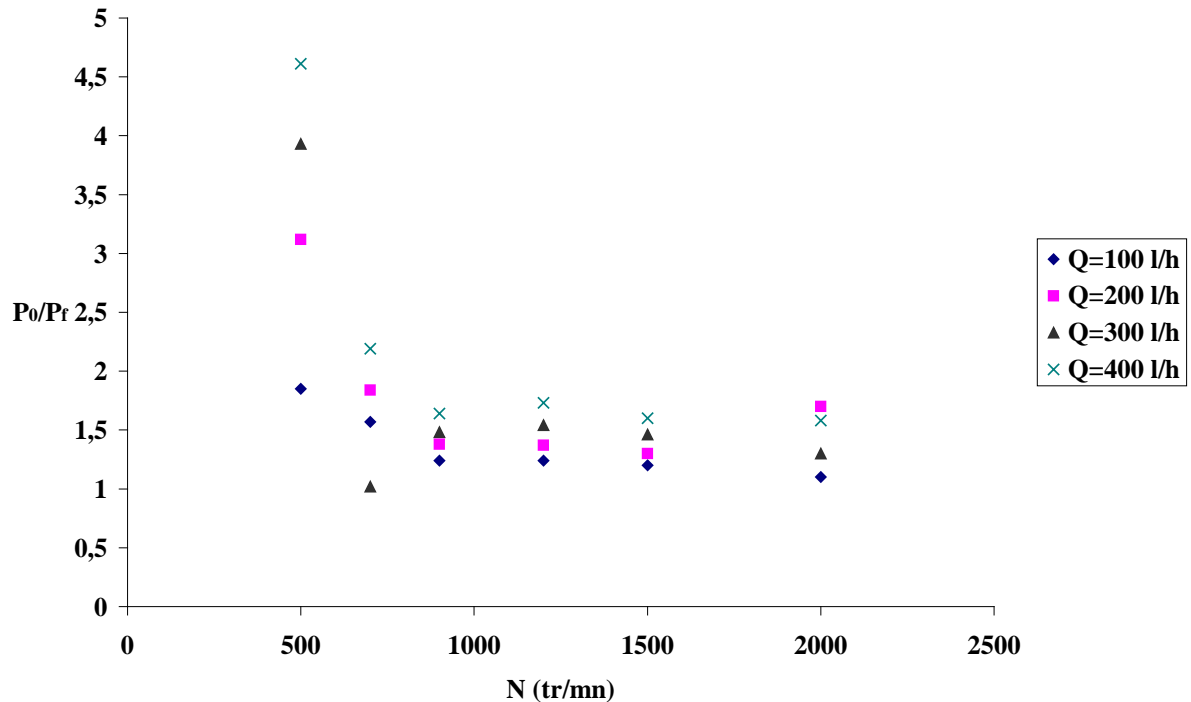


Figure 9 : Comparaison de la puissance dissipée en configuration fermée et ouverte en fonction de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation.

II-4-4 Nombre de puissance

L'analyse dimensionnelle a fourni un système de représentation des évolutions des puissances. Ce système consiste à représenter le nombre de puissance N_p en fonction du nombre de Reynolds de mélange.

Avec :

$$N_p = \frac{P_d}{\rho N^3 d_1^5} \quad (7)$$

Ce nombre de puissance a été étudié par plusieurs auteurs dans des réacteurs de géométrie différente [4, 6]. L'ensemble de ces études a trouvé qu'au-delà d'une certaine valeur du nombre de Reynolds de mélange ($Re_m = 10^4$), la valeur de N_p peut être considérée comme constante et caractéristique de la géométrie du système mobile- réacteur.

La figure 10 donnant l'évolution du nombre de puissance en fonction du nombre de Reynolds de mélange pour différents débits d'alimentations montre que N_p tend vers une valeur moyenne égale à 0.029 à partir de la valeur de $14 \cdot 10^4$ du nombre de Reynolds de mélange, mais qui augmente légèrement avec l'augmentation du débit d'alimentation.

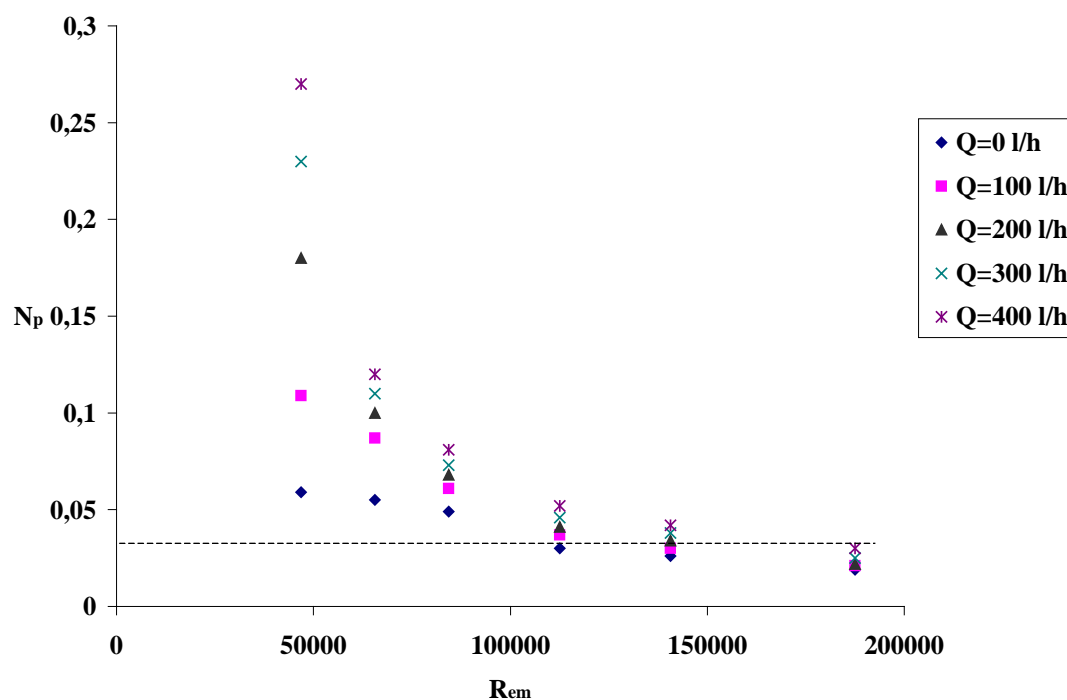


Figure 10 : Variation du nombre de puissance N_p en fonction du nombre de Reynolds de mélange dans un réacteur torique ouvert.

Le tableau 1 rassemble les différents résultats trouvés dans la littérature, il en ressort que la valeur de N_p varie d'un auteur à un autre. Pour notre cas, nous avons obtenu un nombre de puissance moyennement égal à 0.029. Il en ressort que la valeur de N_p dépend du type de réacteur, notre valeur de N_p est proche de celle de **Hamani** [9] et celle de **Murakami** et coll [4].

Tableau 1 : Comparaison des valeurs de N_p .

Auteurs	Type de réacteur	R_{em}	N_p
Lelan [5]	Réacteur agité	10^4	0.26
Murakami [4]	Réacteur agité	$10^4 - 10^5$	0.22
Hamani [9]	Réacteur torique fermé	$14 \cdot 10^4$	0.03
Murakami [4]	Réacteur torique fermé	$10^4 - 10^5$	0.035
Murakami [4]	Réacteur torique ouvert	$10^4 - 10^5$	0.031
Présente étude	Réacteur torique ouvert	$14 \cdot 10^4$	0.029

II-4-5 Fonctionnement optimal du réacteur torique ouvert

Nous connaissons l'importance de la qualité du mélange lors de la mise en œuvre d'une transformation chimique réalisé soit en continu, soit en discontinue. Le problème est toujours de connaître les conditions de fonctionnement du réacteur et les critères font appel le plus souvent à deux facteurs principaux [12] :

- La qualité du mélange c'est à dire le temps nécessaire à l'obtention d'un mélange d'une qualité fixée dans des conditions d'agitation bien déterminées, c'est donc l'intervalle de temps entre le début de l'agitation et le moment où une composition uniforme est obtenue dans la masse fluide
- L'aspect économique qui demande une minimisation des apports en énergie extérieure et qui est évaluée par la puissance consommée par le réacteur pendant l'opération de mélangeage.

Donc la connaissance du temps de mélange et de la puissance dissipée permet de caractériser les performances du réacteur par l'efficacité du mélange (E), définie par le produit du temps de mélange et de la puissance dissipée :

$$E = P_a t_m \quad (8)$$

L'ensemble des valeurs calculées de l'efficacité du réacteur torique en fonctionnement continu et discontinu pour les conditions expérimentales étudiées est donné dans la tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs expérimentales de l'efficacité dans le réacteur torique ouvert.

		$10^3 E (J)$			
$Q(l/h)$	Rem	46856	65625	84375	112500
0		3397.8	7942	9907	11470
100		4640.7	8205	8845	11379
200		7334	9211	10942	13377
300		7947	9653	10542	13276
400		8588	10076	12060	14886

L'examen du tableau 2 ci-dessus montre que l'efficacité varie proportionnellement avec la vitesse d'agitation et le débit d'alimentation et par conséquent le point de fonctionnement optimal de notre réacteur pour les conditions expérimentales étudiées correspond à la valeur la plus élevée de l'efficacité ($E = 14886 \cdot 10^{-3} J$). Dans l'étude de **Hamani** [9], le point de fonctionnement optimal a été déterminé dans un réacteur torique en système fermé à partir de l'intersection des deux courbes de la puissance dissipée et du temps de mélange en fonction du nombre de Reynolds de mélange.

II-5 CONCLUSION

L'étude de la distribution de pression le long de la circonférence du réacteur a permis de mettre en évidence l'influence du mouvement secondaire sur le comportement de l'écoulement. On montre qu'à l'intérieur des différents coudes, ce mouvement crée une forte dissymétrie dans la répartition de la pression différentielle entre la paroi extérieure et la paroi intérieure du tore.

La connaissance de la perte de charge dans le réacteur torique en fonctionnement ouvert et en fonctionnement fermé a permis d'estimer la puissance dissipée au sein du réacteur. L'évolution de cette puissance est directement liée à la variation de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation. Elle est quatre fois plus importante en fonctionnement ouvert que celle calculée en fonctionnement fermé à faible vitesse d'agitation et fort débit d'alimentation. Le nombre de puissance est estimé et sa valeur tend vers une constante égale à 0,029 à partir de $Rem = 14 \cdot 10^4$ et croît légèrement avec l'augmentation du débit d'alimentation. Le point de fonctionnement optimal de notre réacteur est estimé à partir de la détermination de l'efficacité, cette dernière varie avec l'élévation de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation.

Références bibliographiques

- [1] Sato Y., Murakami Y., Hirose T.,
"Flow pattern, circulation velocity and pressure loss in loop reactor",
J.chem. Eng. Japan, vol 12, 6, 448, (1979) .
- [2] Tanaka M., Sendai T.,
"Flowing characteristics in a circular loop reactor"
Chem. Eng. Res. Des, 67, 423, (1989) .
- [3] Laederach H., Widmen F.,
"Le bioréacteur torique"
Information chimie 249, 157. (1984).
- [4] Murakami Y., Hirose T., Ono S.,
"Power conception and pumping characteristics in a loop reactor"
Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev, 21, 273. (1982).
- [5] Lelan A., Moritz S.A.,
"Caractéristiques hydrodynamiques et géométrie des systèmes d'agitation"
Information chimie, 210, (1981).
- [6] Hosagai K., Tanaka M.,
"Study of suspension polymerization of styrene with a circular loop reactor"
Polymer Eng and Science, 32 (66), 431, (1992).
- [7] Nouri. L.,
"étude des performances du réacteur torique, application à l'hydrolyse enzymatique des protéines végétales"
Thèse de doctorat, Université de Nantes (1994)
- [8] Khalid A., Nouri. L. Le grand J.,
"Etude de la distribution de pression dans un réacteur torique"
2^{ème} congrès de mécanique à Casablanca (Maroc). 1, 205. (1995).
- [9] Hamani S.,
"Caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique"
Mémoire de Magister. EMP Bordj El Bahri. (1999).
- [10] Benkhelifa H.,
"Etude du réacteur torique : Modélisation et application à la transformation de protéines"
Thèse de doctorat. Université de Nantes (2000).
- [11] Rachez D., David R., Villermaux J.,
"Un nouveau modèle de circulation interne dans une cuve agitée de type industriel"
Entropie 101, 32. (1981).
- [12] Jacques. P, Padet,
"Fluides en écoulement, Méthodes et modèles"
Masson, Paris (1991).

III-1. INTRODUCTION

Les mesures expérimentales décrites au chapitre I permettent une estimation du temps de circulation et du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation, alors nous ne posons en général le problème de rendre compte de l'allure observée au moyen d'un modèle représentatif qui peut servir de base à l'extrapolation [1]. Caractériser l'écoulement au sein du réacteur à l'aide d'un modèle mathématique a l'avantage de permettre la connaissance d'autres paramètres non accessibles expérimentalement tels que le coefficient de dispersion axiale et prévoir les performances du réacteur.

III-2. DEFINITION DE LA DISPERSION AXIALE

Le processus de mélange dans les réacteurs est dû principalement aux différences de vitesse des éléments fluides, aux actions de mélange local dues au mobile d'agitation, aux tourbillons secondaires le long de la boucle de la circulation, aux phénomènes de diffusion turbulente et de diffusion moléculaire. Tous ces effets peuvent être caractérisés globalement par un coefficient de dispersion longitudinale ou axiale. Ce coefficient représente le degré de retromélange dans le fluide et dépend des propriétés du fluide, du régime d'écoulement et de la forme du réacteur.

III-3. CHOIX DES MODELES

Les modèles utilisés ont été choisis afin de permettre la détermination du coefficient de dispersion axiale D_{ax} , et ainsi la caractérisation de l'hydrodynamique au sein du réacteur.

III-3.1. Réacteur torique fermé

Le réacteur torique fermé compte tenu de sa géométrie tubulaire formant une boucle fermée, est modélisé par un modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (Figure 1).

Ce modèle a été utilisé depuis une quarantaine d'années pour caractériser des écoulements très diversifiés [2]. **Voncken** et coll [3] l'ont utilisé pour caractériser le mélange et l'écoulement dans un réacteur fermé agité par une turbine. Ils ont mis en évidence l'existence de deux régions dans le réacteur :

- Région d'agitation : Le mélange est intense où les lignes de courant s'entremêlent et il apparaît de grandes vitesses, ainsi on peut négliger la dispersion dans cette région.
- Région de circulation : Le mélange est moins intense, la dispersion du traceur est causée par la différence de vitesse des lignes de courant et la différence des longueurs de boucle des différentes circulations.

Belleville et coll [4] ont utilisé le même modèle pour déterminer le coefficient de dispersion axiale pour différentes vitesses d'agitation dans un réacteur torique fermé.

Le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale a été aussi utilisé par **Blenke** et coll [5] dans un réacteur à boucle à jet.

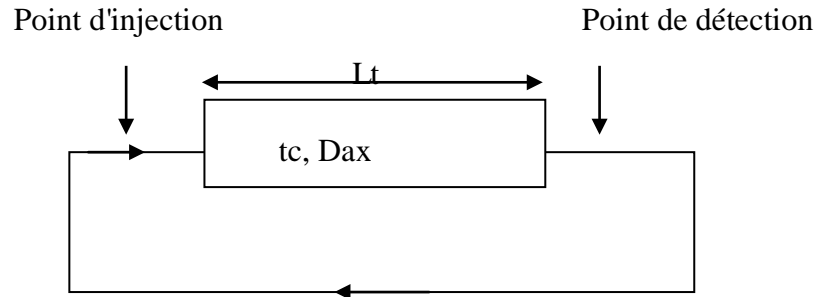


Figure 1 : Schéma représentatif du modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale.

Voncken et coll [3] ont proposé une équation donnant l'évolution de la concentration en traceur en fonction du temps. Pour une injection du traceur j fois détectée par la sonde, la concentration réduite totale est donnée par :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{B_0}{4\pi\theta}} \sum_{j=0}^{\infty} \exp\left(\frac{-B_0(j-\theta)^2}{4\theta}\right) \quad (1)$$

$$\text{Avec : } B_0 = \frac{U_c Lt}{Dax} \quad (2)$$

$$\text{Et : } \theta = \frac{t}{t_c} \quad (3)$$

C_0 : concentration finale dans le réacteur.

Les valeurs de B_0 et t_c sont déterminées par ajustement de cette équation avec la courbe expérimentale de la distribution de temps de séjour. Nous déterminons ainsi le coefficient de dispersion axiale Dax .

III-3.2. Réacteur torique ouvert

Deux modèles d'écoulement sont utilisés pour décrire le fonctionnement continu du réacteur.

III-3.2.1. Modèle piston avec dispersion axiale et recyclage partiel

Les réacteurs toriques ouverts représentés par un écoulement piston avec dispersion axiale et recyclage d'une partie du courant de sortie (Figure 2).

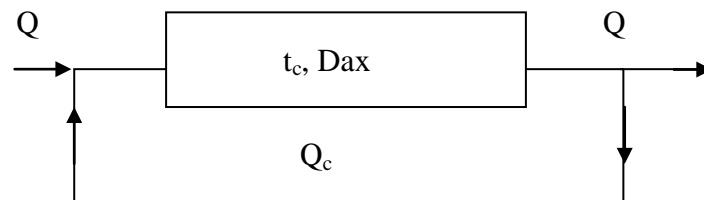


Figure 2. Schéma représentatif du modèle piston avec dispersion axiale et recyclage partiel.

Les paramètres du modèle sont le temps de circulation, le nombre de Bodenstein B_0 . La comparaison du nombre de Bodenstein avec celui mesuré en réacteur fermé permet une évaluation de l'influence du système d'alimentation sur les caractéristiques du mélange à l'intérieur du réacteur torique. Les paramètres sont dans un premier temps estimés à l'aide d'une méthode développée par **Warnacke** et coll [6], qui consiste à assimiler les courbes expérimentales de la distribution des temps de séjour à la superposition d'une fonction périodique et d'une fonction exponentielle décroissante.

Nouri et coll [7] ont caractérisé l'écoulement dans le réacteur torique en fonctionnement ouvert par le modèle piston avec dispersion axiale à partir de l'analyse de la DTS, soit en utilisant la méthode à un seul point de mesure (détection à l'intérieur du réacteur), soit la méthode à deux points de mesure. En conclusion de cette étude, il ressort que le réacteur torique se comporte globalement comme le réacteur torique fermé avec une faible dispersion axiale pour les deux méthodes utilisées.

III-3.2.2. Modèle piston avec dispersion axiale à deux zones et recyclage partiel

Ce modèle a été utilisé par **Kersting** et coll [8] en 1995 pour représenter les réacteurs bouclés à vis. Et ce modèle est plus élaboré dans le sens où il tient compte des positions respectives de l'alimentation et du soutirage (Figure 3).

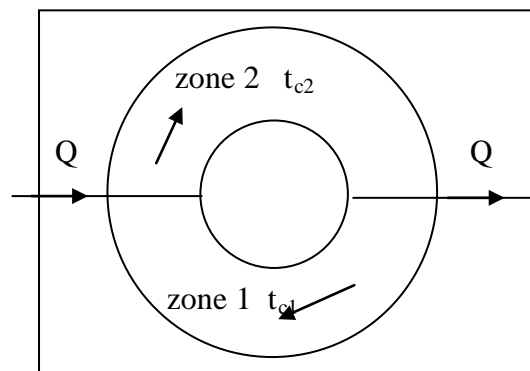


Figure 3 : Modèle piston avec dispersion axiale à deux zones et recyclage partiel.

Le réacteur est divisé en deux zones, une zone de circulation et une zone d'agitation. La zone inférieure est caractérisée par un temps moyen de circulation t_{c1} et un nombre de Bodenstein B_{01} et la zone supérieure, par un temps moyen de circulation t_{c2} et un nombre de Bodenstein B_{02} .

Ces deux modèles ont été aussi utilisés dans l'étude entreprise par **Benkhelifa** et coll [9] pour décrire le fonctionnement du réacteur torique ouvert.

Il ressort de leur étude que les modèles choisis pour les deux configurations sont en bonne adéquation avec les valeurs expérimentales caractérisant l'écoulement. Le réacteur torique ouvert se comporte globalement comme le réacteur torique fermé. En configuration ouverte, les deux modèles aboutissent aux mêmes conclusions mais le second modèle apporte des précisions supplémentaires sur l'écoulement.

III-4. APPLICATION DU MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE ET RECYCLAGE PARTIEL

Nous considérons que nous avons un écoulement piston avec dispersion axiale. Le débit Q_c est le débit de circulation et le débit Q correspond au débit d'entrée-sortie ou

(alimentation) qui peut s'assimiler à un débit de fuite. Ce débit explique la décroissance des courbes réponses obtenues expérimentalement (Figure 2).

Le taux de recyclage R est défini comme le rapport du débit de matière recyclée (ou débit de recirculation) Q_c au débit total dans le système :

$$R = \frac{Q_c}{Q_c + Q} \quad (4)$$

Les courbes expérimentales sont représentées par un modèle mathématique [8] formulé à partir de la somme de trois fonctions propres, caractérisant la distribution des temps de séjour.

$$E(t) = a_0 \exp(S_0 t) + 2\lambda \exp(-xt) \cos(yt + \varphi) \quad (5)$$

tels que : $E(t)$: fonction de distribution des temps de séjour, (s^{-1})

a_0, S_0, λ, x : Coefficients (s^{-1}), qui sont déterminés à partir des courbes expérimentales.

y : période $\left(y = \frac{2\pi}{t_c} \right)$.

t_c : temps de circulation (s).

φ : déphasage.

La détermination de la variance permet de modéliser l'écoulement dans le réacteur torique en fonctionnement ouvert.

$$\sigma^2 = \left[\frac{d^2}{ds^2} g(s) - \left(\frac{d}{ds} g(s) \right)^2 \right]_{s=0} \quad (6)$$

$g(s)$: fonction de transfert du modèle choisi

Après résolution de l'équation (6) nous trouvons :

$$\sigma^2 = \frac{x + S_0}{2\pi^2} t_c^3 \quad (7)$$

L'application de ce modèle à nos résultats expérimentaux permet de déterminer le nombre de Bodenstein et par conséquent le coefficient de dispersion axiale. Ce paramètre est obtenu après superposition des courbes théoriques sur les courbes expérimentales.

Sur la figure 4, nous allons décrire l'exploitation graphique des courbes expérimentales.

Les paramètres $a_0, S_0, \lambda, x, \varphi$ et y peuvent être déterminés graphiquement à partir des courbes expérimentales.

Pour un temps assez grand, la fonction $E(t)$ peut se mettre sous la forme :

$$E(t) = a_0 \exp(S_0 t) \quad (8)$$

On en déduit les valeurs de a_0 et S_0 à partir des résultats obtenus sur la partie non oscillante des courbes expérimentales (Figure 4).

$$\ln E(t) \approx \ln a_0 + S_0 t \quad (9)$$

$$\text{d'où : } S_0 = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{e_2}{e_1}$$

avec : $e_i = E(t_i)$

Pour deux pics successifs correspondant à $t_2 < t_3$ nous avons : $\cos(\gamma t_j + \varphi) = 1$ j = 2,3

C'est à dire pour chaque pic supérieur :

$$E(t_j^+) = a_0 \exp(S_0 t_j^+) + 2\lambda \exp(-x t_j^+)$$

Et pour chaque pic inférieur :

$$E(t_j^-) = a_0 \exp(S_0 t_j^-) + 2\lambda \exp(-x t_j^-)$$

Au pic N°2 supérieur nous avons :

$$e_2 = a_0 \exp(S_0 t_2) + 2\lambda \exp(-x t_2)$$

Et au pic N°3 supérieur nous avons :

$$e_3 = a_0 \exp(S_0 t_3) + 2\lambda \exp(-x t_3)$$

$$\text{D'où : } x = \frac{1}{t_3 - t_2} \ln \frac{\Delta E(t_2)}{\Delta E(t_3)}$$

$$\text{Tel que : } \Delta E(t_j) = e_j - a_0 \exp(S_0 t_j) \quad (10)$$

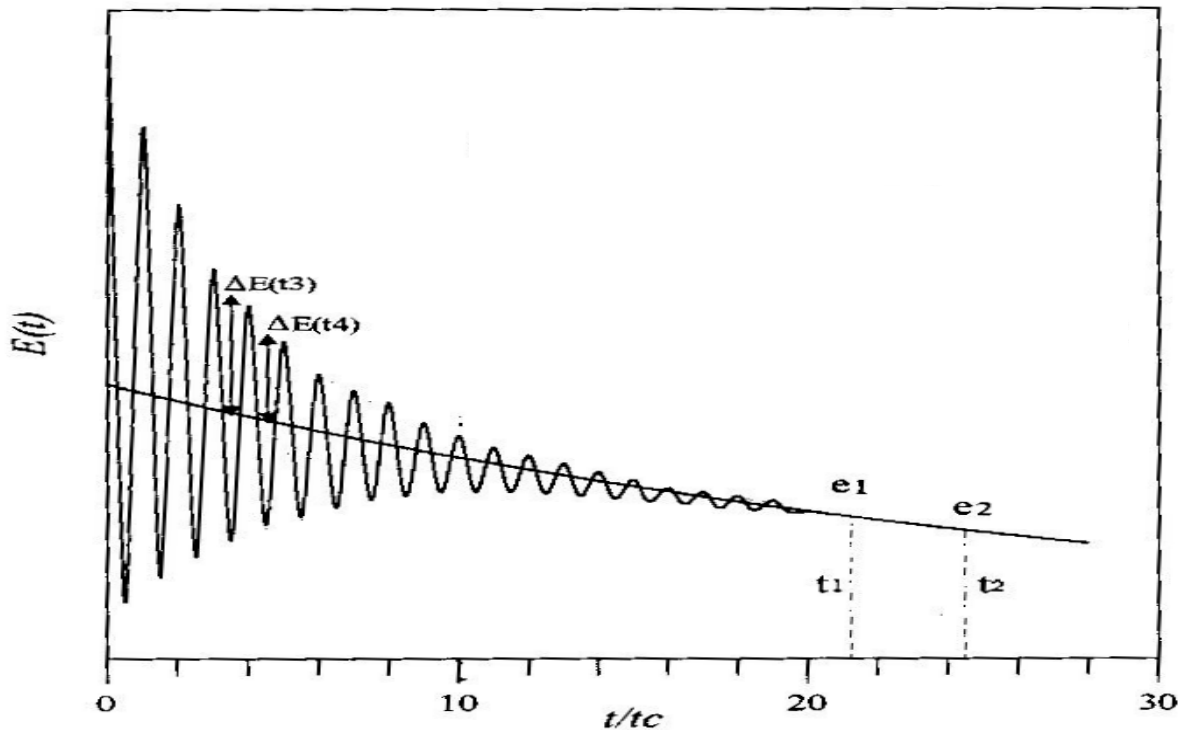


Figure 4 : Représentation schématique des courbes expérimentales.

La détermination de la variance σ^2 à partir de l'équation (7) permet de déterminer le nombre de Bodenstein qui est un indice direct de la caractérisation du degré de mélange axial à l'intérieur du réacteur torique par la relation suivante [10] :

$$\sigma^2 = 2 \left(\frac{t_c}{B_0} \right)^2 [\exp(-B_0) + B_0 - 1] \quad (11)$$

Ainsi le coefficient de dispersion axiale est déterminé à partir de la relation :

$$B_0 = \frac{U_c L_t}{Dax} = \frac{L_t^2}{t_c Dax} \quad (12)$$

Le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation partielle a été testé pour différentes vitesses d'agitation et différents débits d'alimentation.

Un exemple de courbes expérimentale et calculée est représenté sur la figure 5 à vitesse d'agitation et débit d'alimentation donnés. Le système étant ouvert, la concentration du traceur décroît légèrement jusqu'à être nulle lorsque tout le traceur a quitté le réacteur.

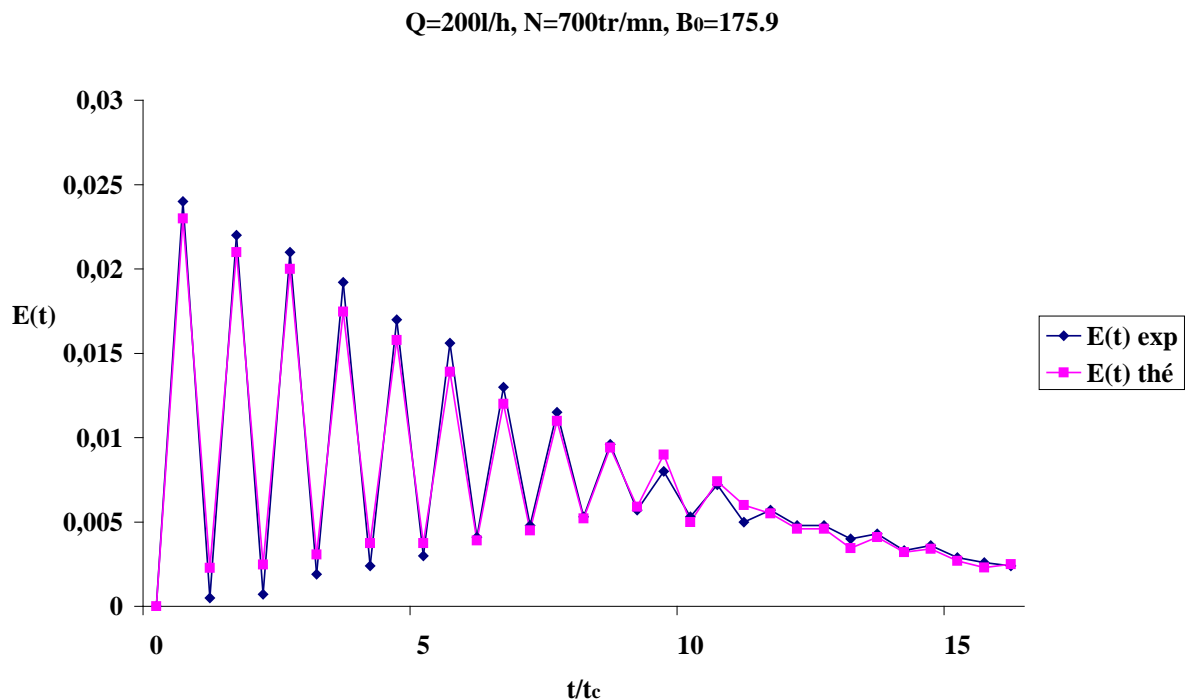


Figure 5 : Représentation des valeurs de E(t) expérimentales et calculées.

Nous remarquons sur la figure 5 que la courbe calculée se superpose aux valeurs expérimentales montrant ainsi la validité du modèle choisi. Le nombre de Bodenstein est alors obtenu pour chaque vitesse d'agitation et débit d'alimentation. L'ensemble des résultats expérimentaux est donné dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résultats de la modélisation.

Q (l/h)	N (tr/mn)	t_c (s)	R	B_0	Dax(m ² /s)
100	300	18	0.96	233	$2.0 \cdot 10^{-3}$
	500	12	0.97	260	$2.6 \cdot 10^{-3}$
	700	10.3	0.98	181	$4.5 \cdot 10^{-3}$
	900	7.5	0.98	219	$5.1 \cdot 10^{-3}$
200	300	15.9	0.94	200	$2.6 \cdot 10^{-3}$
	500	11.7	0.96	245	$2.9 \cdot 10^{-3}$
	700	10.1	0.96	175	$4.7 \cdot 10^{-3}$
	900	7.3	0.97	185	$6.2 \cdot 10^{-3}$
300	300	13.9	0.93	166	$3.2 \cdot 10^{-3}$
	500	11.4	0.94	200	$3.6 \cdot 10^{-3}$
	700	9.5	0.95	215	$4.1 \cdot 10^{-3}$
	900	7.4	0.96	174	$6.5 \cdot 10^{-3}$
400	300	13.0	0.91	159	$4.0 \cdot 10^{-3}$
	500	11.2	0.92	170	$4.4 \cdot 10^{-3}$
	700	8.10	0.94	463	$2.4 \cdot 10^{-3}$
	900	7.40	0.95	210	$5.4 \cdot 10^{-3}$

La figure 6 représente l'évolution du nombre de Bodenstein en fonction de la vitesse d'agitation.

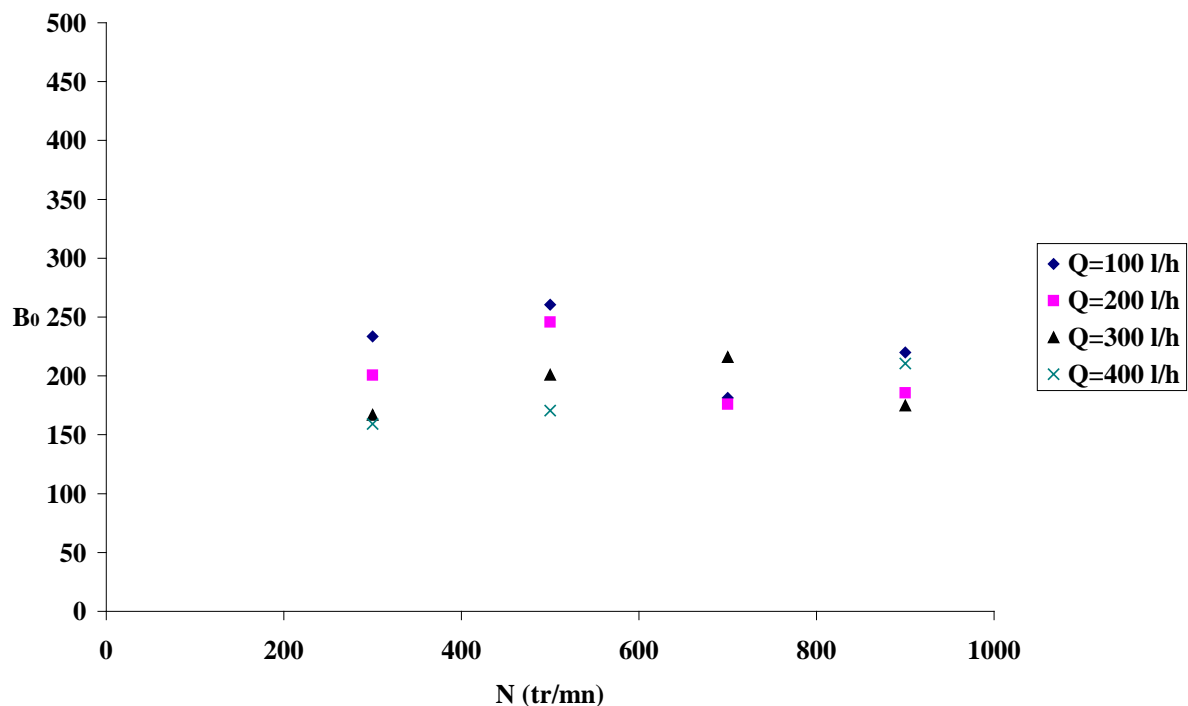


Figure 6 : Variation du nombre de Bodenstein en fonction de la vitesse d'agitation.

Nous constatons que le nombre de Bodenstein est pratiquement indépendant de la vitesse d'agitation. Il est égal en moyenne à 200. Les valeurs élevées de B_0 ($B_0 > 100$) permettent de conclure que l'écoulement dans le réacteur torique est de type piston.

En comparaison avec l'étude entreprise par **Kaoua** [11] dans un réacteur torique fermé de volume égal à 8 l, nous avons remarqué que nos résultats expérimentaux présentent des valeurs de B_0 plus élevées, ceci est du causé par l'augmentation de la structure tourbillonnaire le long de la circonférence du réacteur de 8l généré par l'hélice marine et entretenu par la courbure des coudes d'ou une plus forte agitation.

Sur la figure 7 nous avons présenté la variation du coefficient de dispersion axiale en fonction de la vitesse d'agitation. Nous remarquons que le coefficient de dispersion axiale augmente avec l'augmentation de la vitesse d'agitation quelle que soit la valeur du débit d'alimentation.

Pour des vitesses d'agitations élevées ($N > 500$ tr/mn), l'écoulement n'est pas perturbé par le débit d'alimentation, ceci signifie que le comportement du réacteur en terme d'écoulement et de dispersion axiale est quasiment le même quelle que soit sa configuration. Pour des vitesses d'agitation faible, la dispersion axiale dépend peu du débit. Le jet d'entrée augmente la distribution de vitesse axiale et donc la dispersion axiale.

Les résultats de la modélisation confirment les conclusions qui avaient été faites au niveau de la comparaison des temps de circulation.

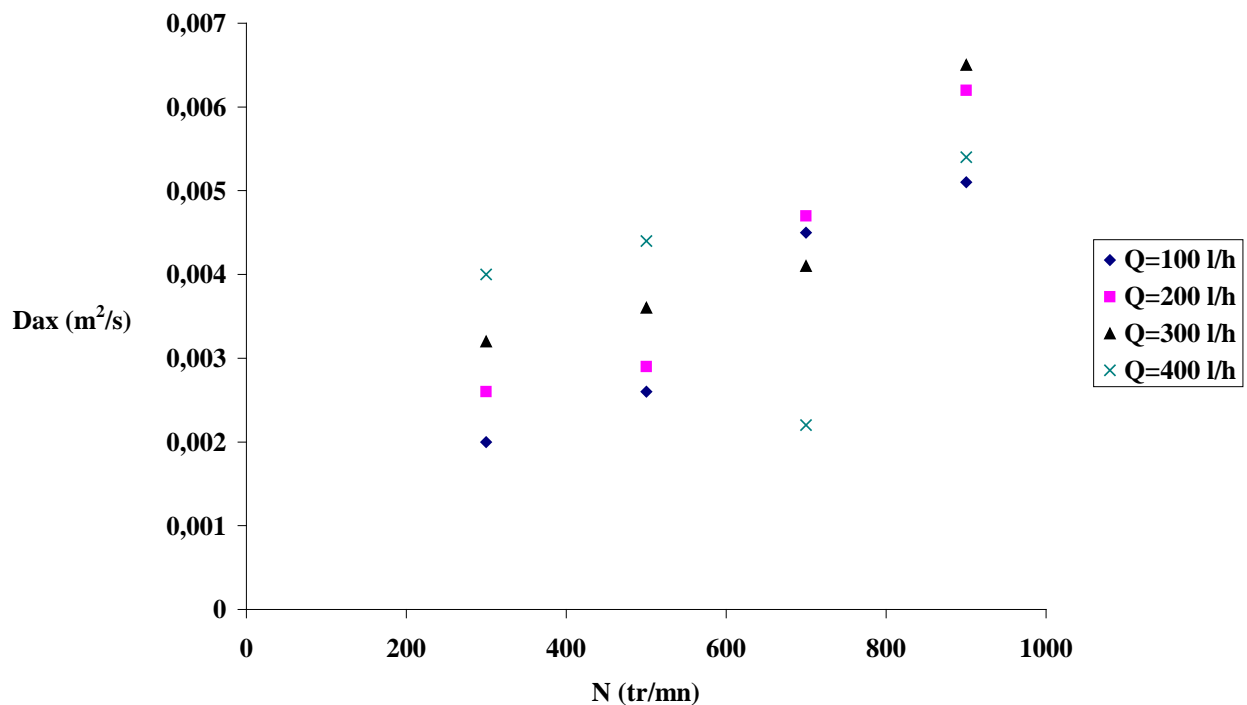


Figure 7 : Variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation.

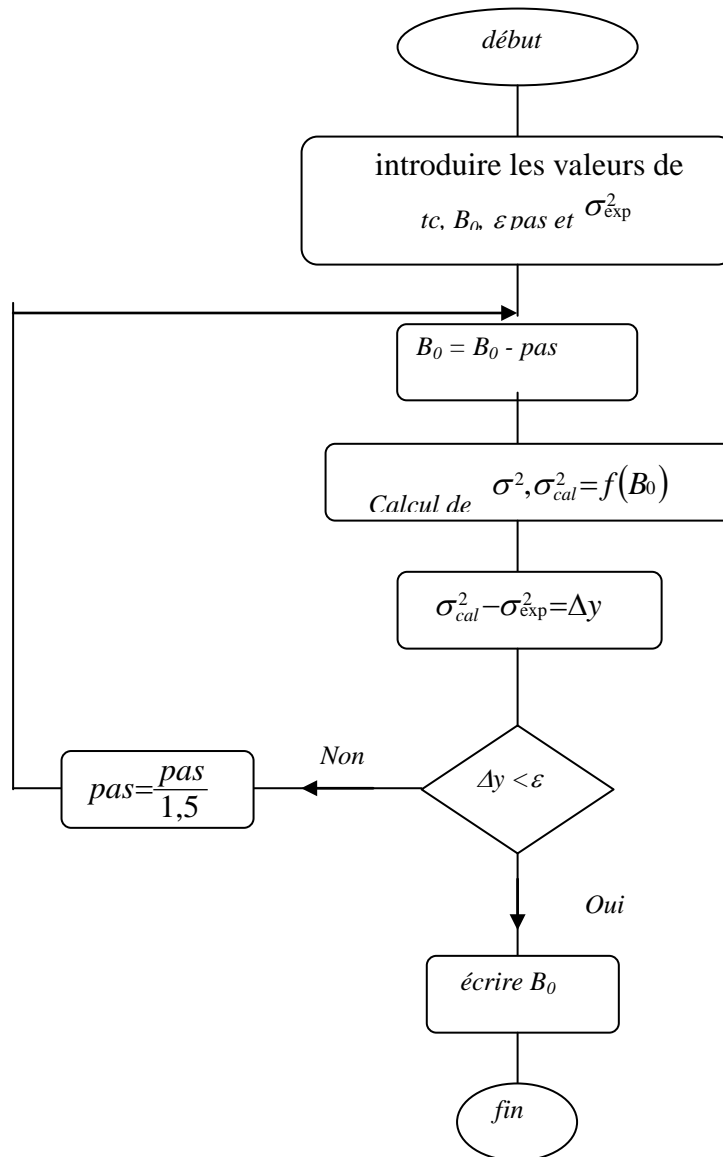
III-5. CONCLUSION

La modélisation apporte de précieux renseignements sur l'écoulement au sein du réacteur torique. L'étude de l'écoulement et du mélange dans le réacteur ouvert a été représenté par le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation partielle. Ce dernier est en bonne adéquation avec les valeurs expérimentales.

La variation du nombre de Bodenstein est relativement indépendante de la vitesse d'agitation. Cette détermination a montré que le coefficient de dispersion axiale varie linéairement avec la vitesse d'agitation. De plus la dispersion axiale semble être peu dépendante du débit d'alimentation pour des vitesses d'agitation élevées et fort débits d'alimentation.

Les résultats de la modélisation confirment les conclusions qui avaient été faites au niveau de la comparaison de temps de circulation c'est à dire que le système d'entrée-sortie ne modifie pas l'écoulement du réacteur torique fermé et par conséquent le comportement hydrodynamique du réacteur est quasi-stable aussi bien en fonctionnement fermé qu'ouvert.

Annexe III-1

Organigramme pour la détermination de la valeur de B_0 .

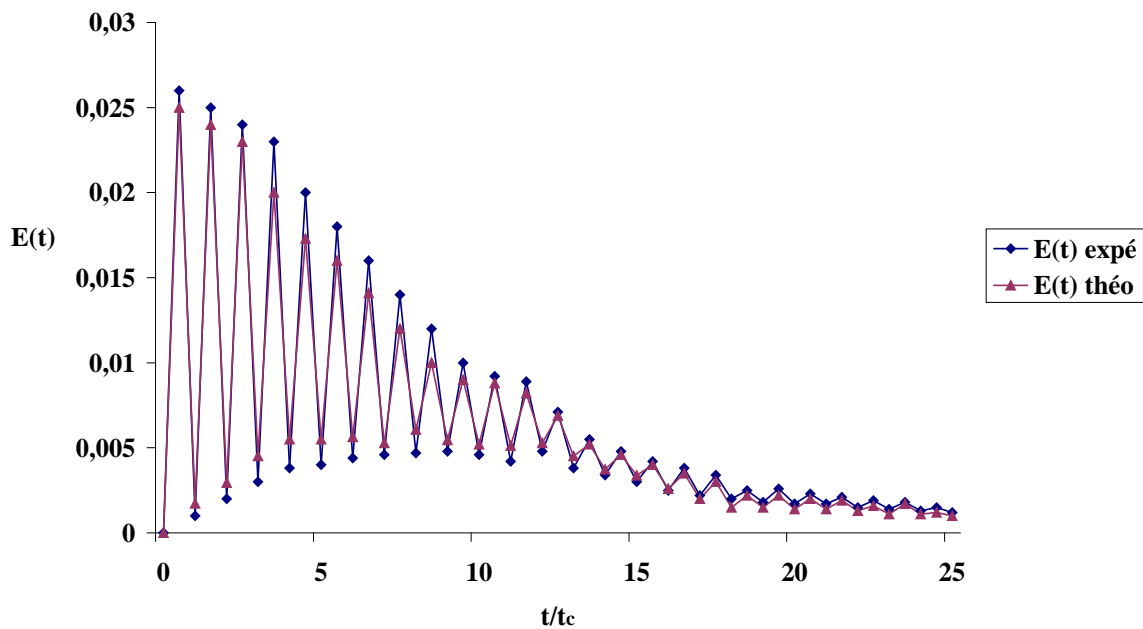
La comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle mathématique se fait par superposition des courbes expérimentales sur les courbes théoriques. A fin d'ajuster nos résultats au modèle proposé, nous avons utilisé le logiciel Excel 2000.

Annexe III-2

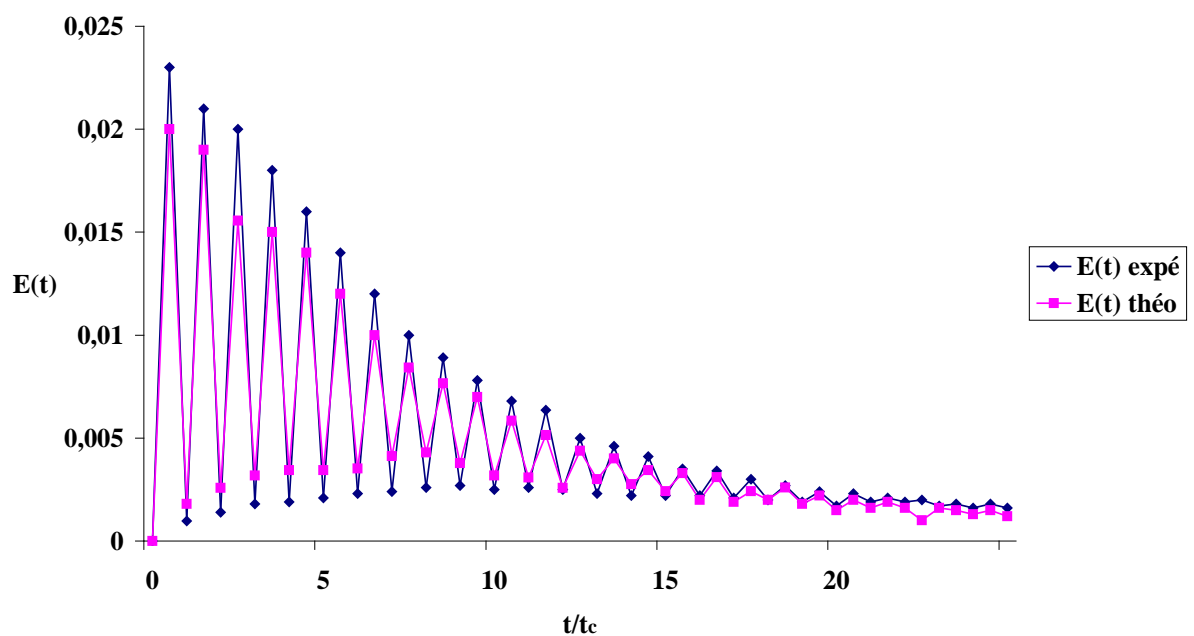
Représentation de $E(t)$ expérimentale et $E(t)$ théorique pour différents débits d'alimentation et vitesses d'agitation.

Les résultats obtenus par le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation partielle sont représentés sur les figures ci-dessous pour différentes vitesses d'agitation et différents débits d'alimentation.

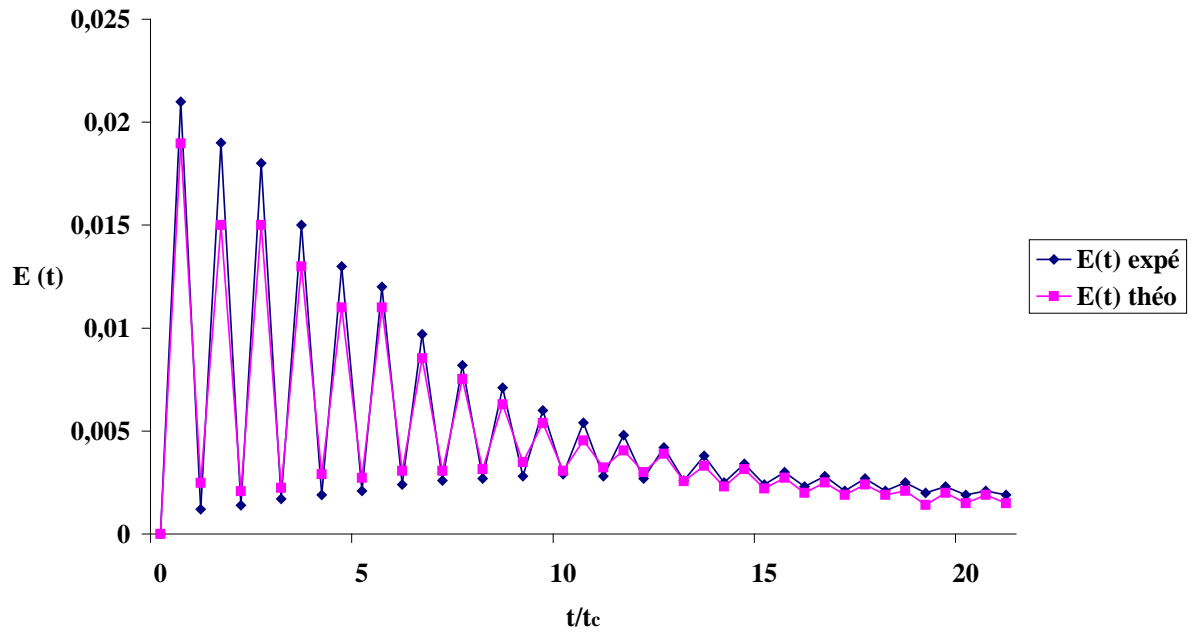
$N=700$ tr/mn, $Q=100$ l/h et $B_0=181,4$



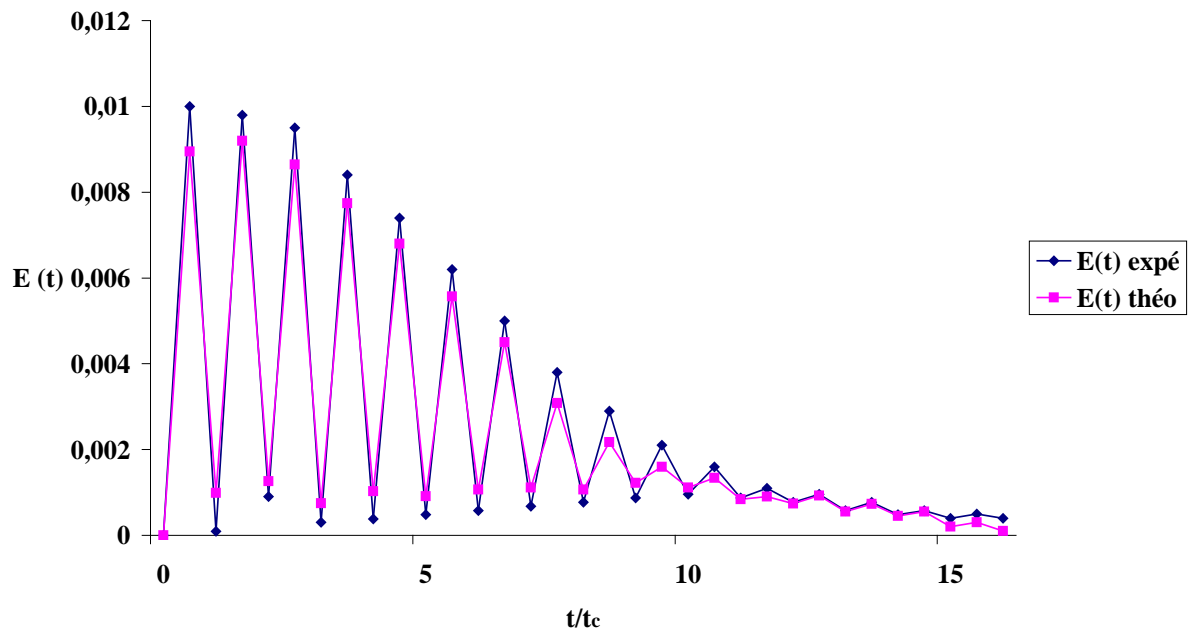
$Q=400$ l/h, $N=700$ tr/mn et $B_0=463,27$



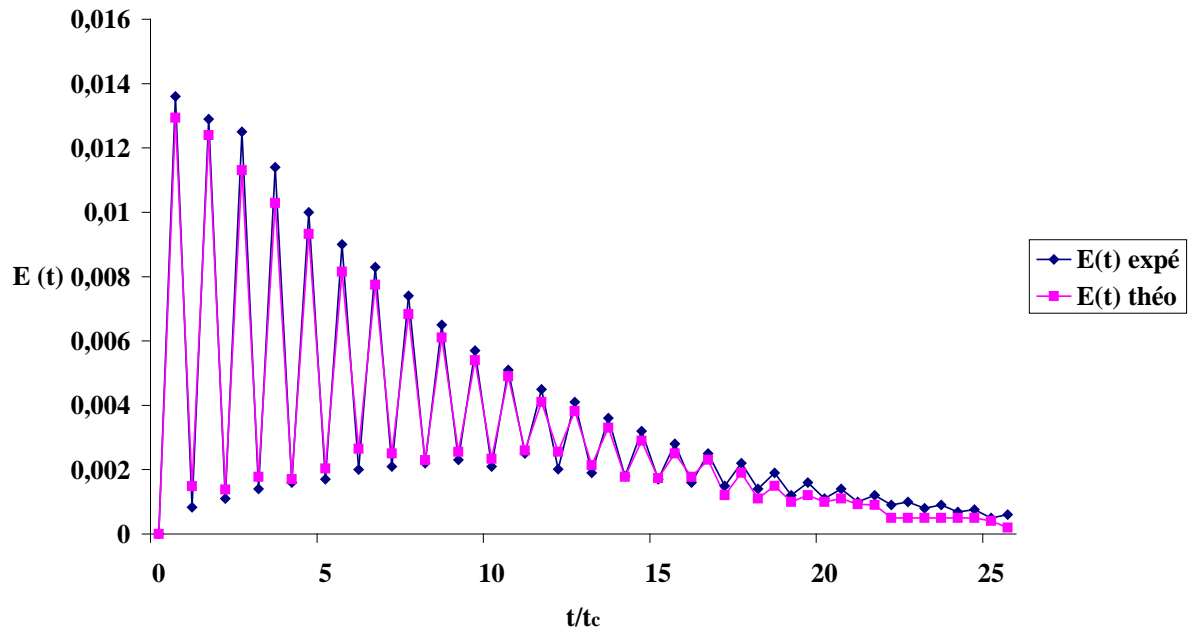
$Q=400$ l/h, $N=300$ tr/mn et $B_0=159,2$



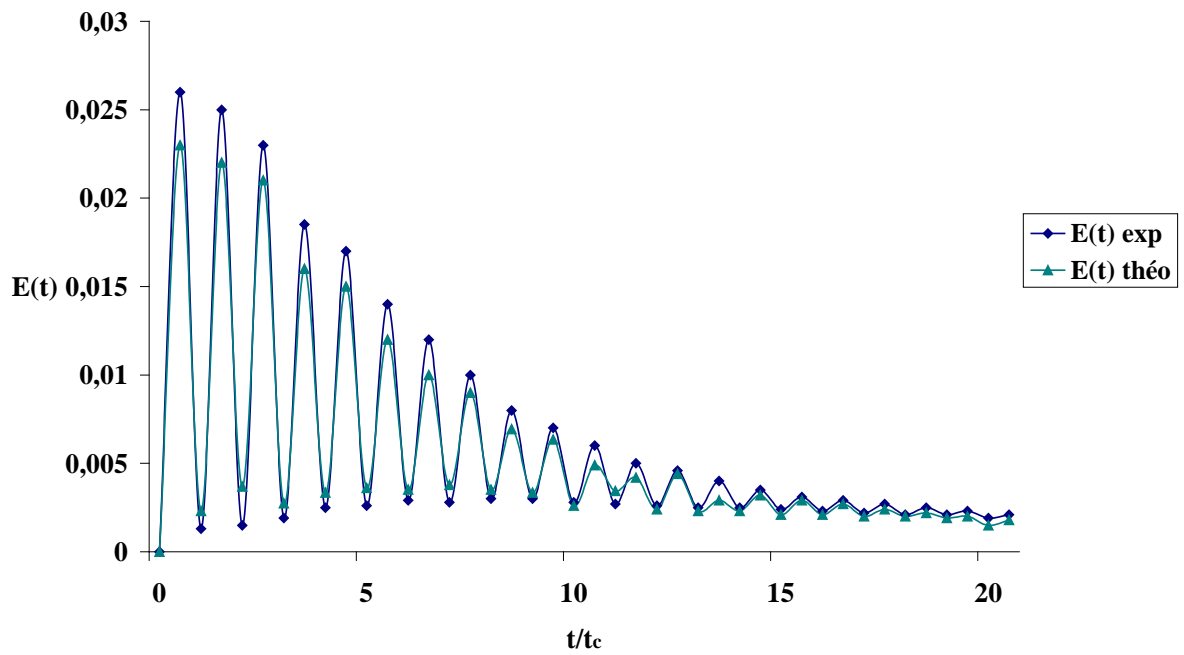
$Q=200$ l/h, $N=100$ tr/mn et $B_0=250$



$Q=100$ l/h, $N=300$ tr/mn et $B_0=233,6$



$Q=300$ l/h, $N=700$ tr/mn, $B_0=215,9$



Références bibliographiques

- [1] Villiermaux J. ,
"Génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs"
Edition technique et documentation, Lavoisier (1993).
- [2] Le gentilhomme P. , Bruges L. , Legrand J. ,
"Distribution des temps de séjours du liquide en écoulement tourbillonnaire non
entretenu liquide-solide"
Chem. Eng. Journal, 67, (2), 83, (1997).
- [3] Voncken. R. M. , holmes. D. B. , Denhartog. H.W. ,
"Fluid flow in turbine stirred baffled tanks – II Dispersing during circulation"
Chem. Eng. Science. Vol 19, 209, (1964).
- [4] Belleville P. , Nouri L. , Le grand J. ,
"Mixing characteristics in the tours reactor"
Chem. Eng. Technol. 15, 282 (1992).
- [5] Blenke H. ,
"Advances in biochemecal engineers"
loop reactor, 13, (1979).
- Wanecke H. J. , Pruss J. , Langemann H. ,
[6] "On a mathematical model for loop reactors. Part I. Residence tinie distribution,
moments and eigen values,"
Chem. Eng. Sci. Vol 40, N°12, 2321, (1985).
- Nouri L. , Belleville P. , Le grand J. , Popineau Y. ,
[7] "Presentation du réacteur torique, application à l'hydrolyse enzymatique des protéines
de blé"
Rapport interne N°23 (1994).
- [8] Kersting CH. , Pruss J. et Warnecte H.J. ,
"Residence tinie distribution of a screw – loop reactor. Experiments and modeling"
Chem. Eng. Sci. , vol 50, 299, (1995).
- [9] Benkhalifa H. , Legrand J. , Legentillehomme P. ,
"Modelling of continuous torroïdal reactors"
Récents progrès en génie des procédés, 11, 51, 19, (1997).
- [10] Wanecke H. J. , Pruss J. , Langemann H. ,
"On a mathematical model for loop reactors. Part II. Estimation of parameters"
Chem. Eng. Sci. Vol 40, N°12, 2327, (1985).
- [11] Kaoua G. ,
"Caractérisation et modélisation de l'écoulement dans un réacteur à boucle de forme
torique"
Mémoire de magister. U.S.T.H.B, Bab Ezzouar, (2000).

IV- 1. INTRODUCTION

La connaissance de l'importance de la qualité du mélange lors de la mise en œuvre d'une transformation chimique réalisée soit en continu soit en discontinu dans un réacteur agité est très importante mais le problème est toujours de choisir les meilleures conditions de fonctionnement du réacteur à savoir : le débit d'alimentation, la vitesse d'agitation, le mobile d'agitation ...ect, et ceci afin d'avoir un temps de mélange court. Prévoir les performances d'un réacteur agité suppose la connaissance d'une part de son état de macromélange et d'autre part de son état de micromélange.

L'objectif de notre travail est double, d'une part caractériser le réacteur agité continu et d'autre part situer, du point de vue hydrodynamique, le réacteur torique par rapport au réacteur agité classique en fonctionnement continu.

IV-2. SYNTHESE DES TRAVAUX ANTERIEURS

Les réacteurs agités ont fait l'objet de nombreuses études de caractérisation de mélange et de l'écoulement.

Plusieurs travaux ont mis en évidence l'effet de l'agitation sur le mélange et sur le transfert de masse et de chaleur.

Souvent la connaissance du temps de mélange et de la puissance dissipée par les mobiles d'agitation permet de caractériser les performances des réacteurs agités par l'efficacité du mélange (E).

Hocine et coll [1] ont étudié l'influence des caractéristiques géométriques du système d'agitation sur les performances du réacteur agité. Ils ont constaté que l'efficacité est meilleure avec un agitateur de type turbine à pâles droites (Rushton) ou à pâles inclinées à 45° que l'hélice marine.

Holmes et coll [2] ont étudié dans un réacteur fermé agité l'effet des caractéristiques géométriques du réacteur et de la vitesse d'agitation sur le temps de circulation. Ils ont corrélié les résultats expérimentaux par une expression adimensionnelle du type suivant :

$$\gamma = N t_c \left(\frac{d_1}{D_r} \right)^\gamma \quad (1)$$

Tels que :

γ : constante égale à $0,85 \pm 0,05$.

t_c : temps de circulation.

N : vitesse d'agitation.

d_1 : diamètre du mobile d'agitation.

D_r : diamètre de la cuve agitée.

Gelus et coll [3] ont pu sélectionner le meilleur agitateur dans un milieu visqueux avec les deux concept principaux : qualité du mélange et puissance dissipée. La double hélice en ruban et la vis d'Archimède ont été comparées. Ils ont constaté que la vis d'archimède était le meilleur agitateur car elle consomme moins d'énergie pour une viscosité inférieure à 200 poises.

Rachez et coll [4] ont étudié le mélange dans une cuve de 150 litres de type industriel, agitée par une turbine à six pâles droites. La position de l'alimentation a été fixée de manière

à obtenir un mélange optimal. L'écart au mélange parfait est évalué en comparant le temps de séjour et le temps de passage.

Le but de l'étude de **Baudon** [5] est l'optimisation de la position et du nombre d'hélices dans une cuve agitée. Des visualisations par nappe laser ont été conduites afin de sélectionner les configurations géométriques générant les écoulements les plus stables. Quatre systèmes à deux hélices correspondants à des configurations industrielles et un système à trois hélices ont été choisis. La comparaison des paramètres adimensionnels $N.t_m$ et N_p montre que le système à trois hélices est plus efficace.

D'autre part, différentes relations ont été établies permettant de relier le temps de mélange, qui définit la qualité de mélange en régime turbulent au sein d'un réacteur agité et le temps de circulation. Une relation empirique tirée des résultats de la littérature a été rapporté par **Villermaux** et coll [6] entre le temps de mélange et le temps de circulation. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$t_m = 4 t_c \quad (2)$$

Quant à **Komori** et coll [7], ils ont proposé une relation empirique de la forme suivante :

$$t_m = 1,2 t_c \quad (3)$$

L'écart observé entre ces deux relations empiriques est du probablement aux caractéristiques géométriques des réacteurs utilisés.

Dans un réacteur fermé agité muni de contre pâles pour trois types de turbine (Rushton, à 6 pâles inclinées à 45° et à 6 pâles inclinées à 60°), **Distelhoff** coll [8] ont constaté que pour une puissance constante, le temps de mélange pour des turbines semblables sont similaires, mais ils diffèrent lorsque les turbines sont différentes.

D'autres travaux ont permis de caractériser le mélange dans les réacteurs agités par des modèles représentatifs. Ces modèles caractérisent la dispersion axiale durant la circulation du fluide dans les réacteurs. **Voncken** et coll [9] ont caractérisé le mélange dans un réacteur fermé agité par un modèle piston avec dispersion axiale et recirculation. Ils ont constaté que pour un nombre de Reynolds de mélange supérieur à $2 \cdot 10^4$, le nombre de Bodenstein (B_0) est indépendant de la vitesse d'agitation. En revanche, B_0 semble dépendre des caractéristiques géométriques du réacteur utilisé.

Quant à **Khang** et coll [10], ils ont représenté le mélange dans un réacteur fermé agité par le modèle de N réacteurs parfaitement agités en série avec recirculation.

Par ailleurs, de nombreuses corrélations empiriques ont été proposées pour évaluer le temps de mélange dans les réacteurs agités [11]. Ces corrélations dépendent principalement des caractéristiques géométriques du réacteur, du type de mobile d'agitation et des conditions opératoires. Le tableau ci-dessous rassemble les corrélations empiriques proposées par différents auteurs.

Le tableau 1 : Corrélations empiriques relatives au réacteur agité fermé.

Auteurs	Mobiles	Hm	n _p	Corrélations
[11]	Hélice Marine	H/3	3	$Nt_m = 6 \left(\frac{D_r}{d_i} \right)^2$
[11]	Turbine Rushton	H/3	6	$Nt_m = 4 \left(\frac{D_r}{d_i} \right)^2$
[10]	Hélice Marine	H/2	3	$Nt_m = 0.9 \left(\frac{D_r}{d_i} \right)^2 \ln \left(\frac{2}{A} \right)$
[10]	Turbine Rushton	H/2	6	$Nt_m = 0.5 \left(\frac{D_r}{d_i} \right)^{2,3} \ln \left(\frac{2}{A} \right)$

Dr : diamètre du réacteur (mm).

d_i : diamètre extérieur du mobile d'agitation (mm).

H : hauteur du liquide au repos dans le réacteur fermé agité (mm).

Hm : position du mobile d'agitation par rapport au fond du réacteur (mm).

n_p : nombre de pâles.

$$A = \frac{100 - (\text{degré de mélange souhaité en \%})}{100}$$

IV-3. GENERALITES SUR LA CUVE AGITEE

La cuve joue un rôle important dans le mécanisme de l'agitation. Les cuves les plus répandues en pratique sont cylindriques à fond plat ou surtout à fond bombé. Elles sont munies d'un agitateur rotatif dont l'axe moteur vertical sera généralement introduit par le sommet.

Afin d'augmenter son efficacité, la cuve est généralement équipée de chicanes radiales (baffles ou pâles anti-vortex), qui ont pour but de bloquer la rotation trop rapide du liquide.

Les mobiles d'agitation les plus souvent utilisés sont de type hélice marine, turbine à pâles inclinées ou à pâles droites (Rushton) et le système d'agitation utilisé dans les réacteurs agités peut avoir un ou plusieurs mobiles.

Trois types d'écoulement peuvent être défini selon la direction du liquide et par conséquent le mobile d'agitation utilisé [12].

- **Ecoulement axial**

Les hélices sont des agitateurs du type axial, ils aspirent et refoulent axialement (Figure 1).

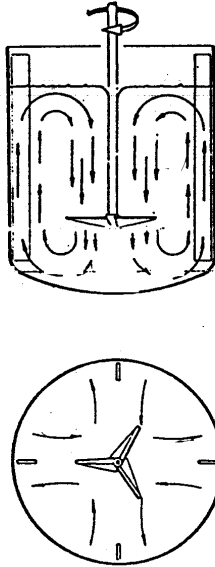


Figure 1 : Exemple d'écoulement axial (cuve avec chicanes).

- **Écoulement radial**

Les turbines sont des agitateurs du type radial, elles aspirent axialement et refoulent radialement (Figure 2).

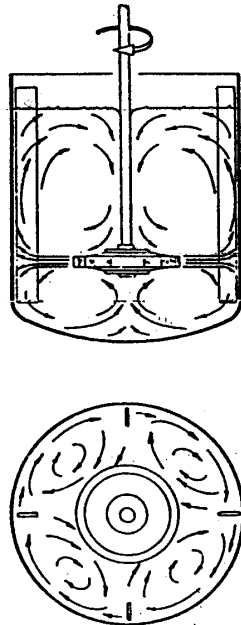


Figure 2 : Exemple d'écoulement radial (cuve avec chicanes).

- **Écoulement tangential**

Tous les agitateurs rotatifs ont tendance à créer un mouvement tangential, ce sont les agitateurs de grand diamètre tels que les ancres (Figure 3).

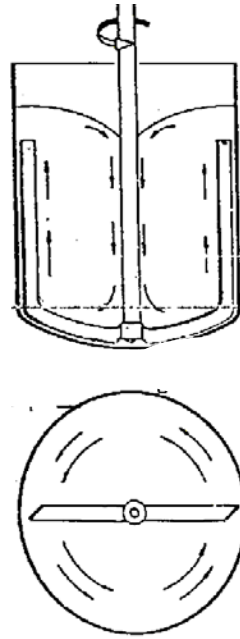


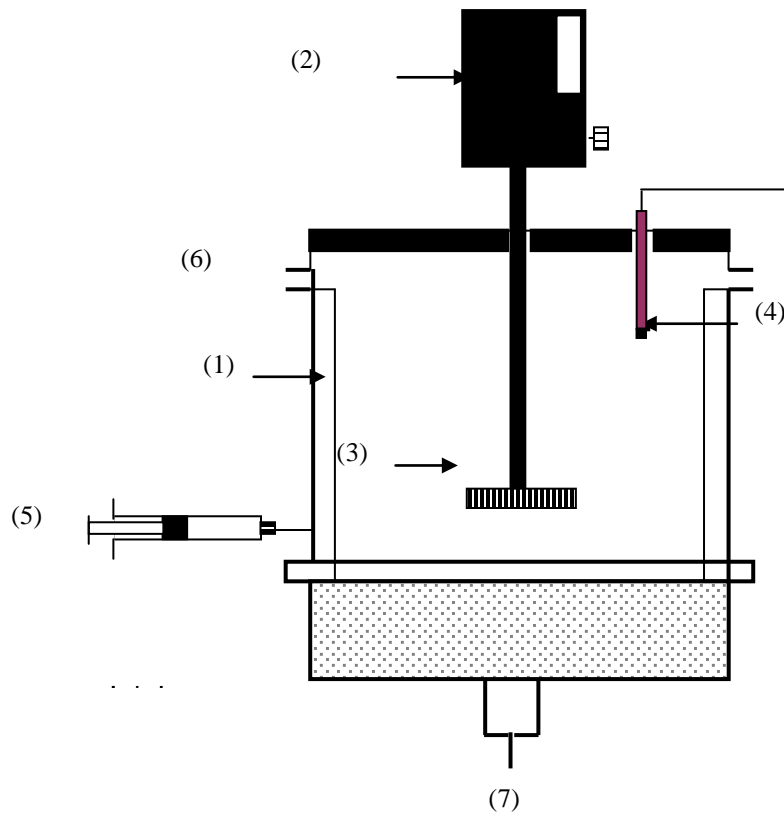
Figure 3 : Exemple d'écoulement tangentiel (cuve sans chicanes).

Ces écoulements dépendent non seulement du type d'agitateur mais également de la géométrie de la cuve.

IV-4. ETUDE EXPERIMENTALE

IV-4.1. Description du montage expérimental

La figure 4 représente le schéma général du montage expérimental en réacteur agité continu.



1. Réacteur.
2. Moteur.
3. Mobile d'agitation.
4. Sonde conductimétrique.
5. injection du traceur.
6. Soutirage.
7. Alimentation.

Figure 04 : Montage expérimental.

a- Le réacteur :

Le réacteur utilisé est de même capacité que le réacteur torique. Il est représenté schématiquement en Annexe IV. Il s'agit d'une cuve cylindrique faite entièrement en Plexiglas, standardisée selon les normes suggérées par **HOLLAND** et **CHAPMAN** [13], de diamètre D_r et d'une hauteur égale à son diamètre. Le réacteur est muni de quatre chicanes disposées à 90° les unes des autres. Les mobiles d'agitation utilisés sont la turbine et l'hélice marine et sont placés sur l'axe du réacteur, leur plan médian est situé à $H_m = H/3$ du fond du réacteur.

La cuve est équipée de trois ouvertures, l'une située à la base de 2 cm de diamètre permettant l'alimentation du fluide, la deuxième permettant le soutirage du fluide et la troisième à l'injection du traceur. Par ailleurs, la partie supérieure du réacteur se termine par un couvercle muni de deux orifices, le premier étant réservé pour la sonde conductimétrique et le deuxième permet l'introduction de l'axe moteur du mobile d'agitation.

Les circuits hydrauliques et électriques sont les mêmes que ceux utilisés pour l'étude du réacteur torique ouvert.

b- Système d'agitation

Concernant notre étude, en plus des agitateurs utilisés dans le chapitre I, nous avons considéré deux autres agitateurs choisis suivant les normes imposées par la littérature [13].

Tableau 2 : Caractéristique des mobiles d'agitation.

Mobile d'agitation	Nombre de pâles	Diamètre (mm)	Angle d'inclinaison des pâles
I : hélice marine	3	50	30
II : hélice marine	3	50	45
III : turbine à pâles inclinées	6	83.3	30
IV : turbine à pâles droites	6	83.3	90

c- Conditions expérimentales

Cette étude a été réalisée en faisant varier la vitesse d'agitation entre 100 et 1200 tr/mn et le débit d'alimentation entre 100 et 500 l/h.

La détermination expérimentale des courbes réponses est réalisée à partir d'une perturbation de type impulsion obtenue par l'injection de 10 ml de NaOH (3M), ce qui correspond à environ 0,069 % du volume total de la solution dans le réacteur. L'analyse des courbes de la distribution des temps de séjour (DTS) permet l'évaluation d'un paramètre essentiel à savoir le temps de mélange. Un exemple de courbe expérimentale de la DTS est donné sur la figure 5.

Les autres courbes sont données en Annexe IV.

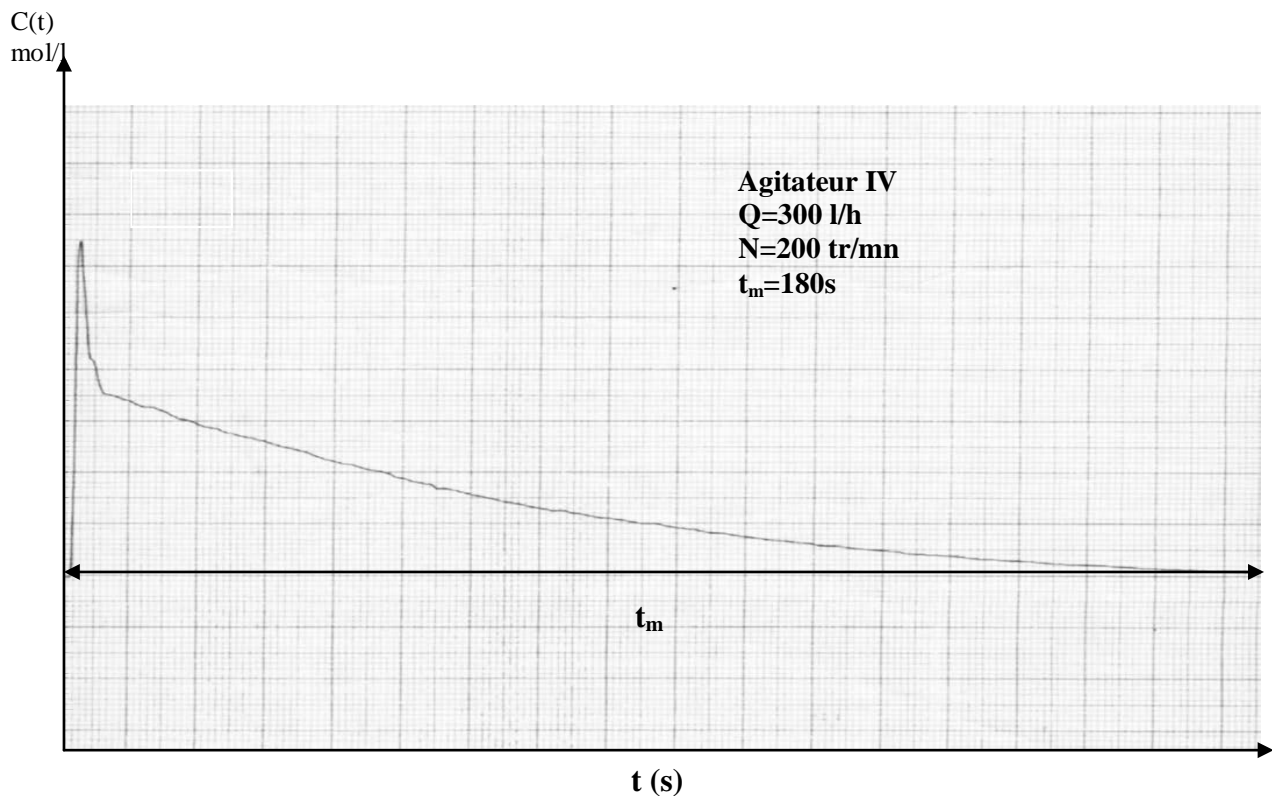


Figure 5 : Courbe expérimentale de DTS.

IV- 4.2. Résultats et discussion :

Lors d'un écoulement d'un fluide à travers un réacteur de volume V_R les molécules du fluide séjournent à l'intérieur de ce volume pendant des temps t_s . Un réacteur réel aura un comportement qui s'écartera plus au moins du modèle idéal et il serait intéressant de pouvoir chiffrer cet écart par rapport à l'idéalité.

La comparaison entre le temps de séjour moyen (\bar{t}_s) et le temps de passage (τ) est une des méthodes permettant d'exprimer cet écart.

Après une injection impulsion, le temps de séjour moyen et le temps de passage sont calculés comme suit ,[6] :

$$\bar{t}_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_i c_i(t)}{\sum_{i=1}^n c_i(t)} \quad (4)$$

et :

$$\tau = \frac{V_R}{Q} \quad (5)$$

- Si $\bar{t}_s < \tau$: Existence d'un volume mort dont le pourcentage est: $\% \frac{V_m}{V_R} = 1 - \frac{\bar{t}_s}{\tau}$
- (6)

- Si $\bar{t}_s > \tau$: Indice de court-circuit dont la fraction en pourcentage est: $\% \frac{Q_c}{Q} = 1 - \frac{\tau}{\bar{t}_s}$
(7)

IV-4.2.1. Influence des paramètres hydrodynamiques

Une étude paramétrique a été effectuée pour étudier l'influence de la vitesse d'agitation, du type de mobile d'agitation ainsi que le débit d'alimentation sur la qualité du mélange.

a- Influence du mobile d'agitation

Pour étudier l'influence du mobile d'agitation sur la qualité du mélange en système ouvert, nous avons fait la comparaison du temps de mélange pour les différents agitateurs.

Les figures 6, 7, 8 et 9 caractérisent l'effet du type de mobile d'agitation sur le temps de mélange. D'après ces figures nous constatons que les plus faibles temps de mélange sont obtenus dans le cas où la cuve est munie de la turbine à pâles droites (agitateur IV). Quant à l'utilisation des hélices et de la turbine à pâles inclinées, nous avons remarqué que les résultats étaient moins bon, du fait qu'elles réduisent la turbulence induite. Il faut noter également que la comparaison entre les agitateurs I et II nous a permis de montrer l'influence de l'angle d'inclinaison des pâles sur le temps de mélange.

Cependant, nous avons remarqué que les valeurs du temps de mélange obtenues dans le cas de l'hélice de 45° sont inférieures à celles obtenues en utilisant l'hélice de 30°. Ceci peut être expliqué par le fait que, la turbulence induite est d'autant plus grande que l'angle d'inclinaison est grand.

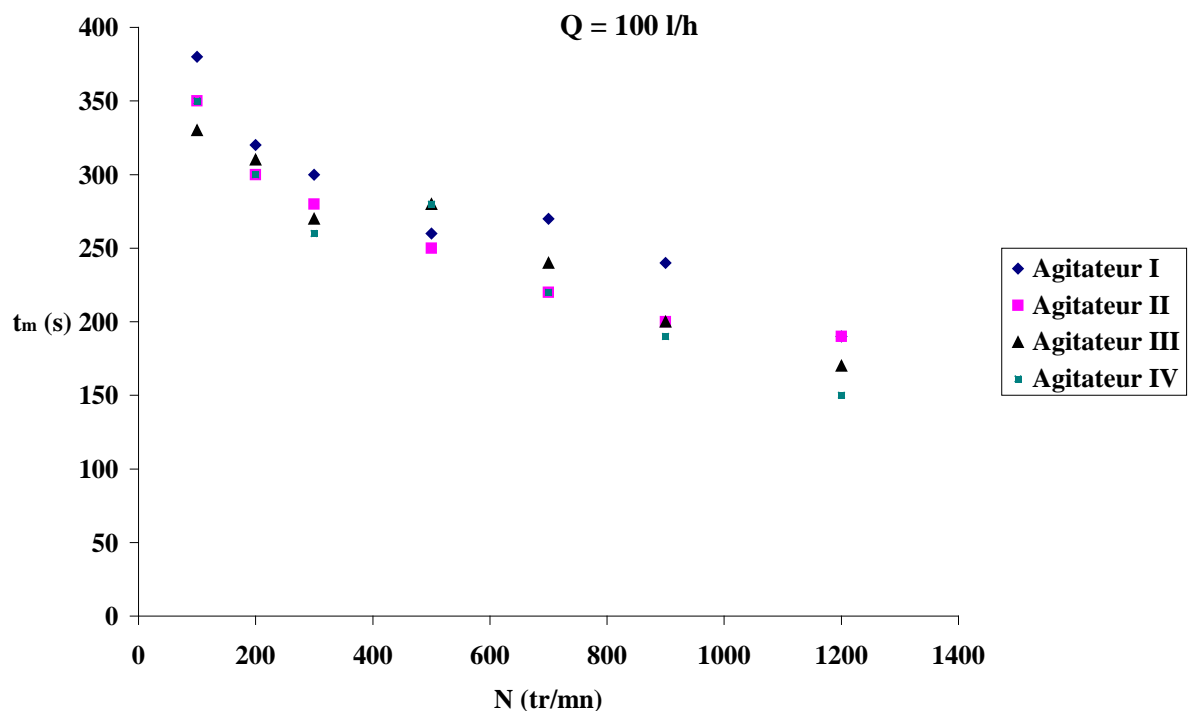


Figure 6 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation pour différents mobiles d'agitation.

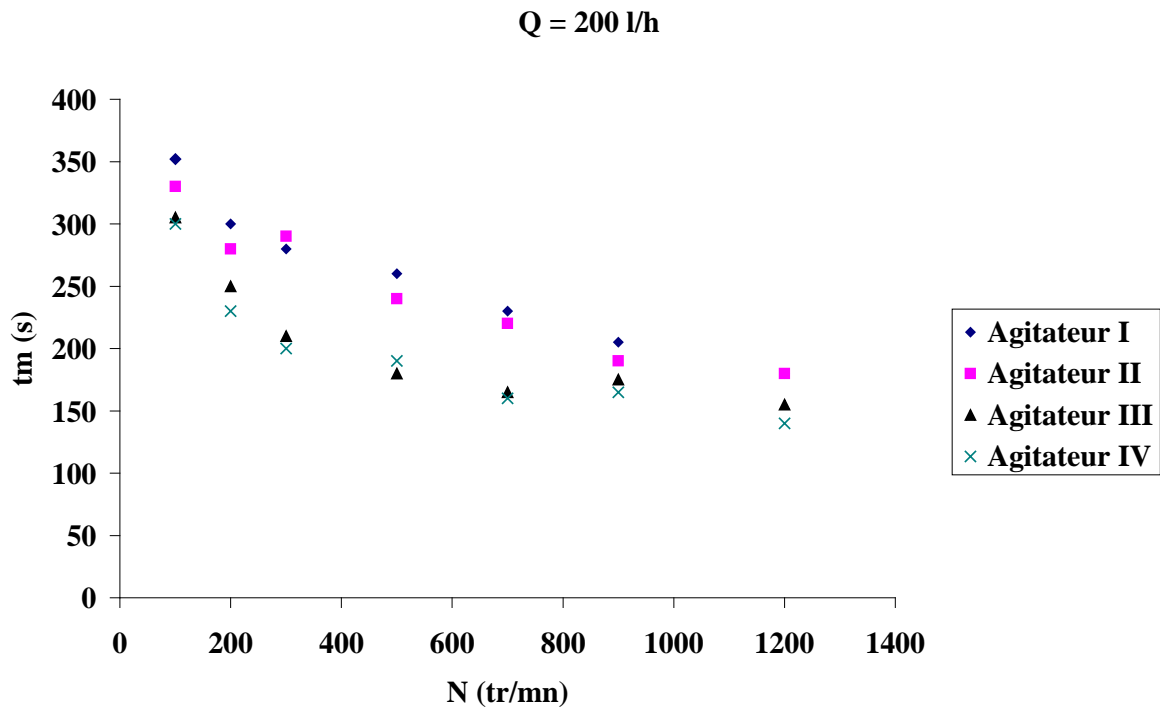


Figure 7 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation pour différents mobiles d'agitation.

$Q = 300 \text{ l/h}$

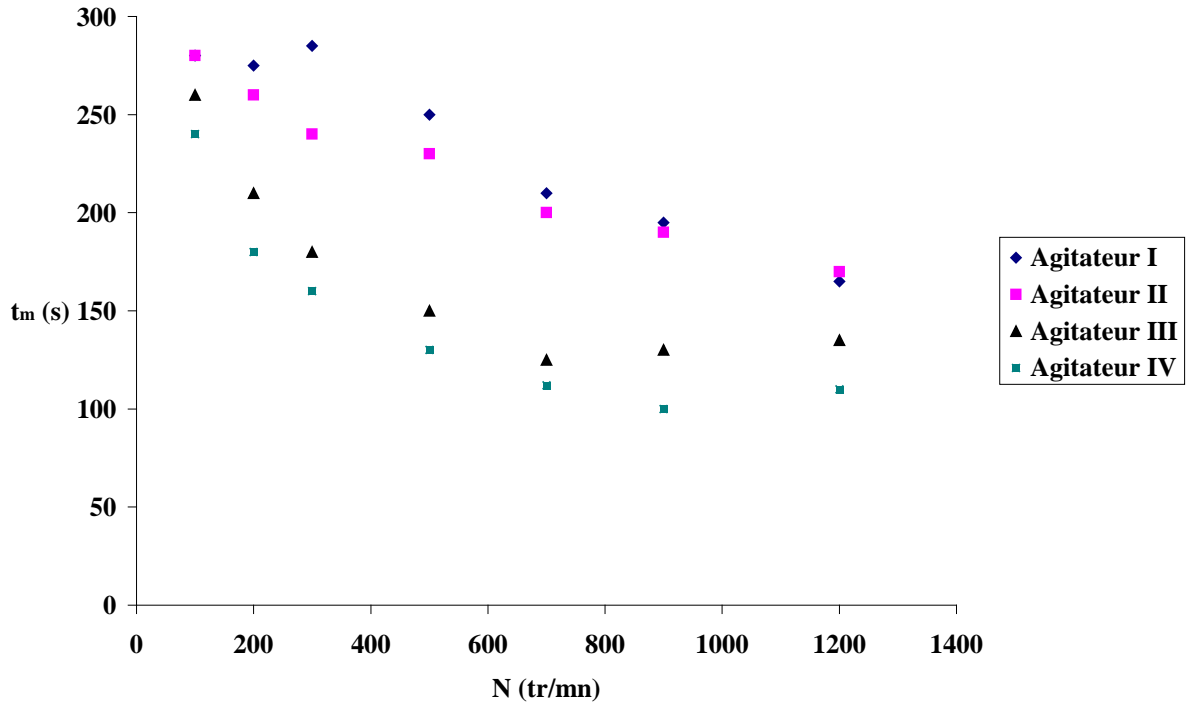
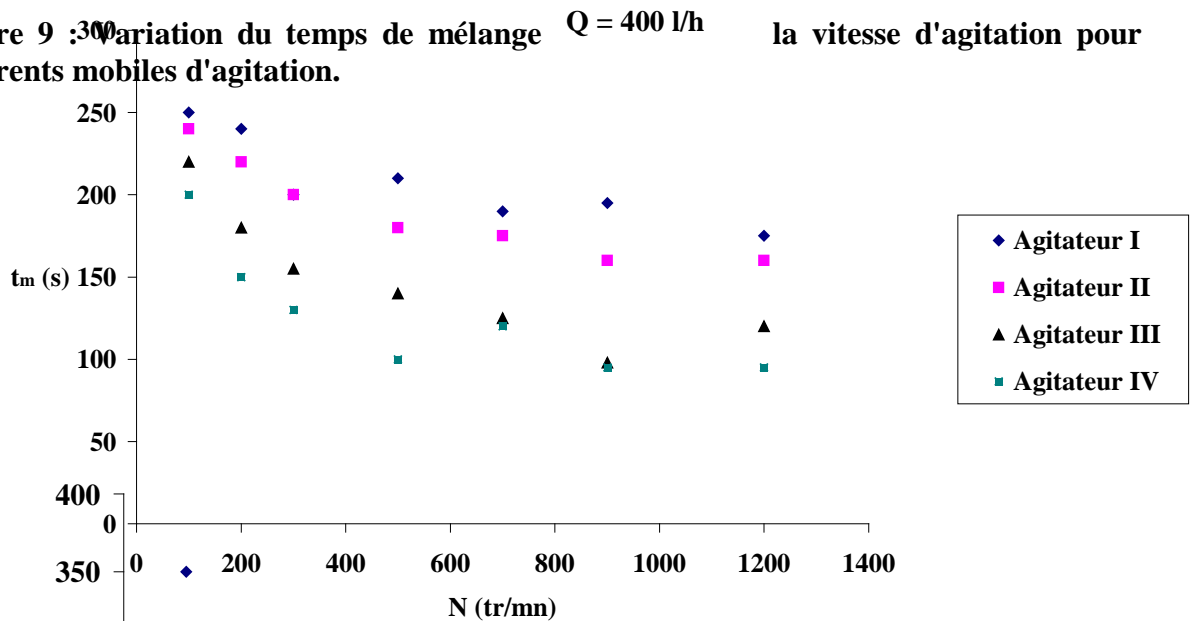


Figure 8 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation pour différents mobiles d'agitation.

Figure 9 : Variation du temps de mélange $Q = 400$ l/h la vitesse d'agitation pour différents mobiles d'agitation.



b- Influence de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation :

Pour étudier l'influence du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation, nous avons calculé le pourcentage de volume mort ainsi que les temps de mélange à différentes vitesses de rotation en balayant la gamme de débit choisi et ceci en considérant le mobile d'agitation IV. Les résultats expérimentaux de la variation du temps de mélange sont illustrés sur la figure 10.

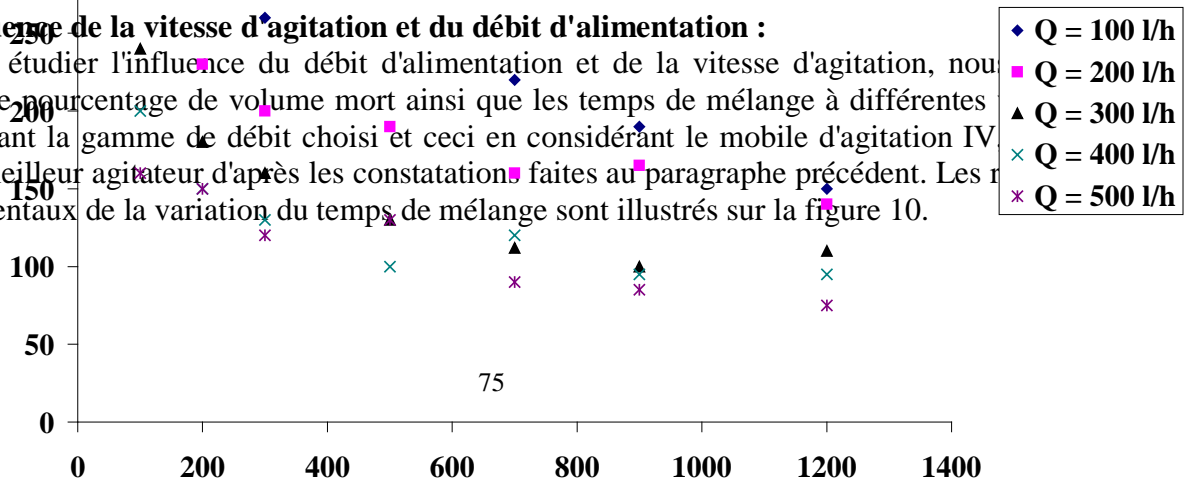


Figure 10 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation en utilisant l'agitateur IV.

Les résultats obtenus concernant le temps de mélange nous ont permis de conclure que l'augmentation du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation améliore nettement l'efficacité du mélange qui se caractérise par la diminution du temps de mélange.

Concernant la variation du pourcentage de volume mort, les résultats expérimentaux sont réunis dans le tableau 3 et illustrés sur la figure 11.

Tableau 3 : Variation du pourcentage de volume mort en fonction du débit d'alimentation pour différentes vitesses d'agitation.

N(tr/mn) Q (l/h)	% de volume mort (V_m/V_R)					
	100	200	300	500	700	900
100	11,10	40,5	50,1	40,69	44,51	46,06
200	30,1	43,1	22,21	47,84	40,22	40,16
300	35,7	39	41,11	48,22	41,6	39
400	42,21	37,8	37,42	37,79	45,4	37,99

D'après l'analyse du tableau ci dessus, nous pouvons constater que notre réacteur présente des volumes morts et que l'évolution de ce pourcentage en fonction de la vitesse d'agitation et du débit d'alimentation n'est pas assez homogène pour interpréter d'une manière précise cette variation. En outre l'existence des zones stagnantes (volume mort) dépend essentiellement de la géométrie de la cuve. Cette dernière ayant un fond plat ce qui rend l'homogénéisation assez difficile dans le réacteur.

Ils faut noter également que, pendant l'agitation du fluide, ce dernier risque d'être entraîné en rotation, il apparaît donc en surface un vortex qui correspond à une agitation peu efficace. Pour supprimer ce vortex, on équipe la paroi de la cuve de chicanes radiales qui ont pour but de bloquer la rotation du liquide. Mais ces chicanes présentent tout de même un inconvénient, car considérés comme obstacles, elles provoquent la création de zones mortes en aval de ces obstacles qui s'opposent en fait à la bonne circulation du fluide.

Le macromélange est considéré comme étant parfait quand le taux de volume mort est de l'ordre de 3% d'après les travaux de la littérature [14, 15]. Le plus faible taux de volume mort ($\approx 11\%$) est obtenu pour $N = 100$ tr/mn et $Q = 100$ l/h.

L'introduction de l'alimentation est choisie de telle sorte que le mélange s'opère le plus rapidement possible et la tubulure de soutirage est localisée le plus loin possible de celle d'alimentation de manière à éviter toute possibilité de court-circuit entre entrée et sortie.

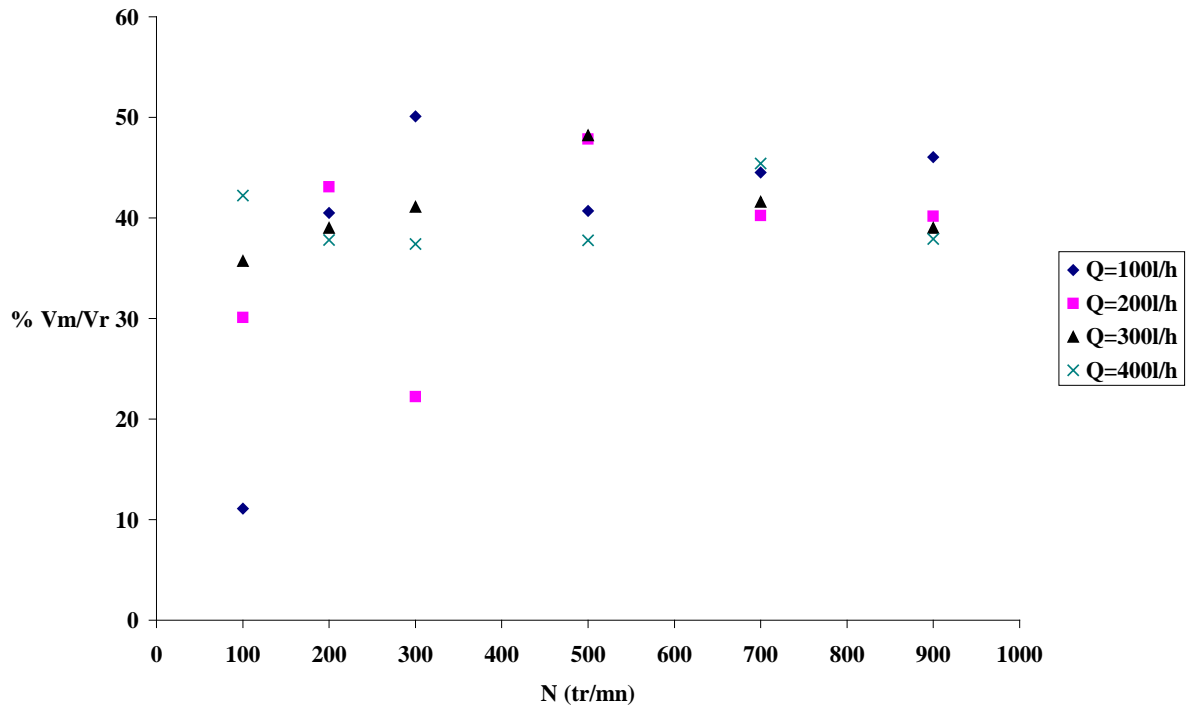


Figure 11 : Variation du pourcentage de volume mort pour différents débits d'alimentation.

IV-4.2.2. Caractérisation globale du mélange

Le mélange global dans le réacteur agité est défini par le produit Nt_m , qui est un paramètre adimensionnel caractérisant le réacteur. Dans ce sens et afin de comparer nos résultats expérimentaux à ceux de la littérature, nous avons présenté sur les figures 12, 13, 14 et 15 la variation du produit Nt_m en fonction du nombre de Reynolds de mélange. D'après ces figures, nous constatons que, quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds de mélange, les dimensions du mobile d'agitation et la valeur du débit d'alimentation, le produit Nt_m dans le réacteur agité est proportionnel au nombre de Reynolds de mélange. Néanmoins nos résultats expérimentaux sont élevés (valeur moyenne égale à 1500), par rapport à ceux obtenus dans la cuve agitée en système fermé d'après **Mooyoung** [16].

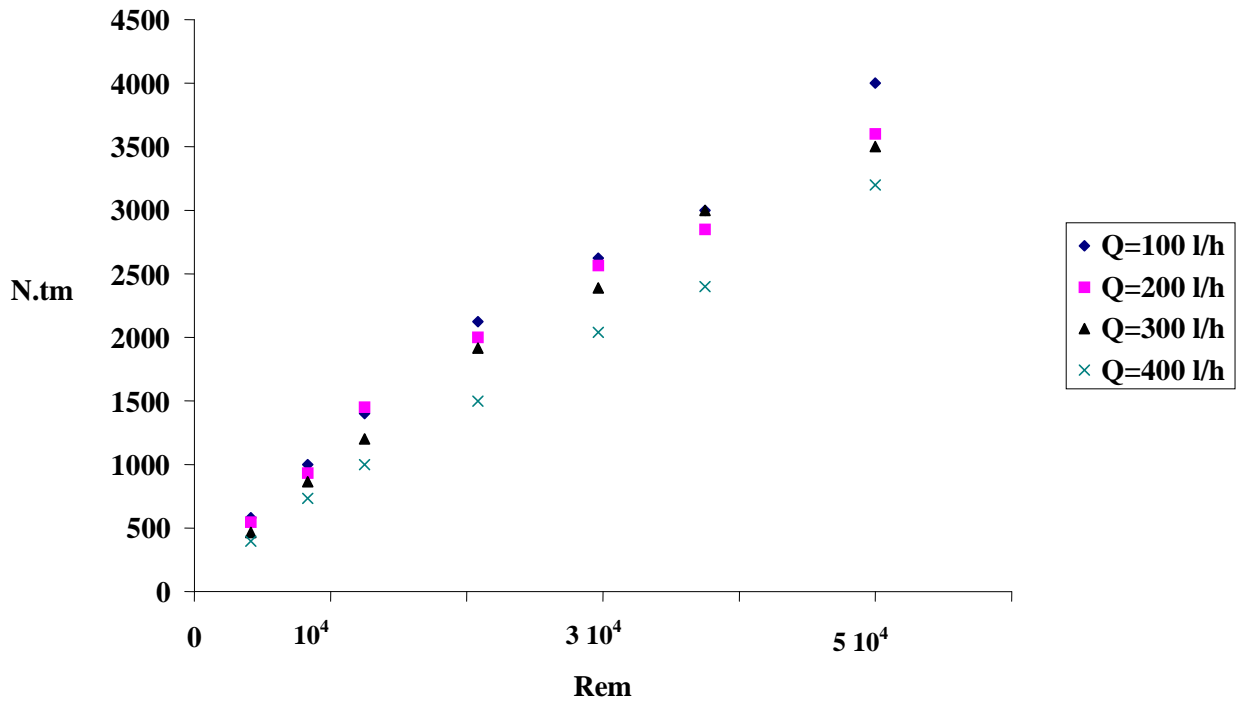


Figure 12 : Variation du produit Nt_m en fonction de Rem et de Q en utilisant l'agitateur I

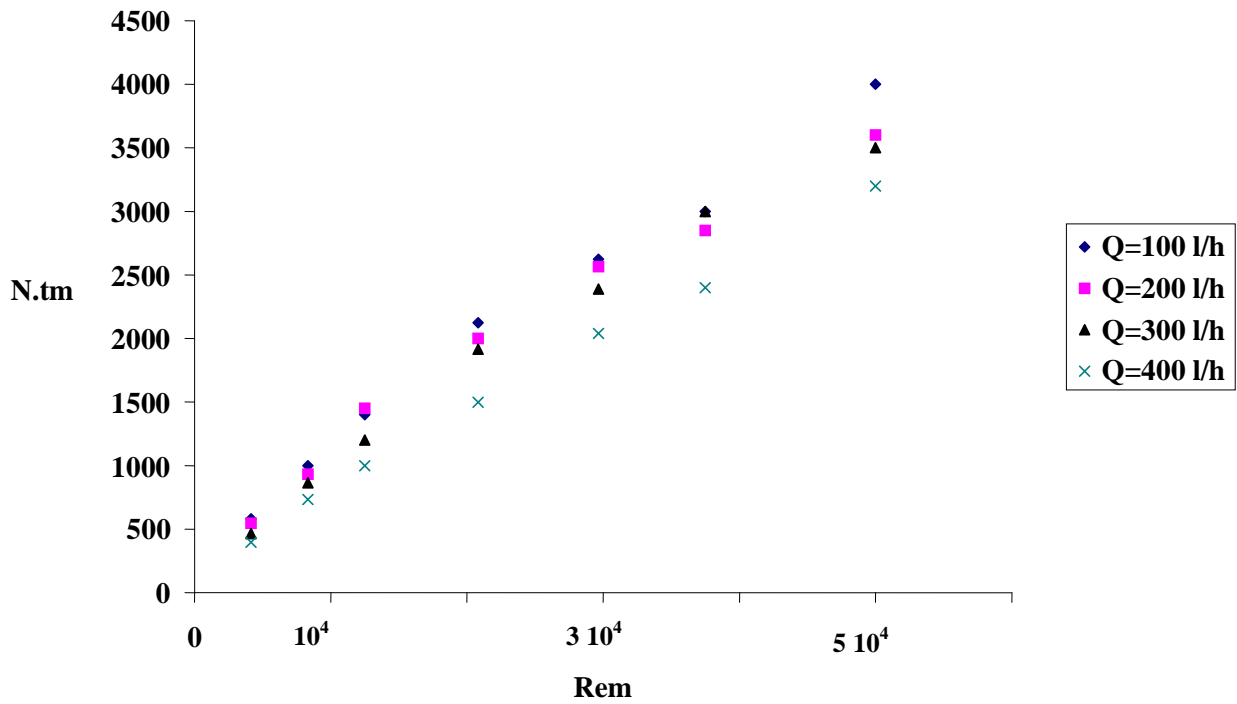


Figure 13 : Variation du produit Nt_m en fonction de Rem et de Q en utilisant l'agitateur II.

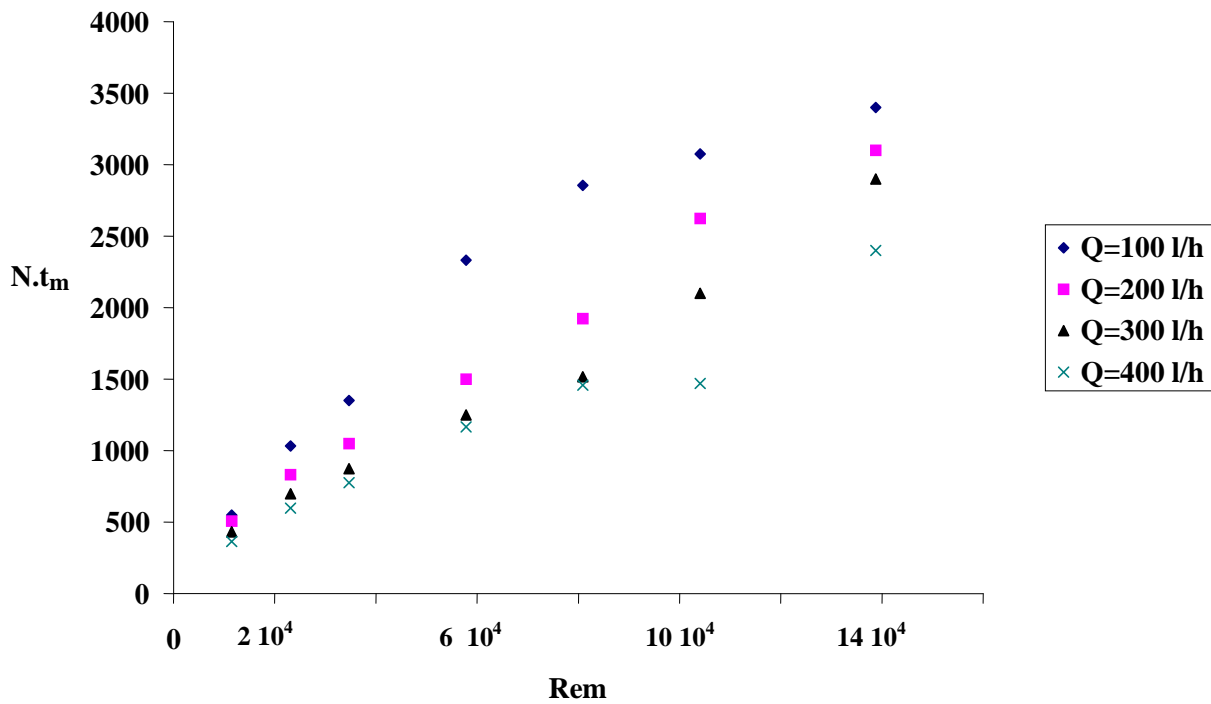


Figure 14 : Variation du produit Nt_m en fonction de Rem et de Q en utilisant l'agitateur III.

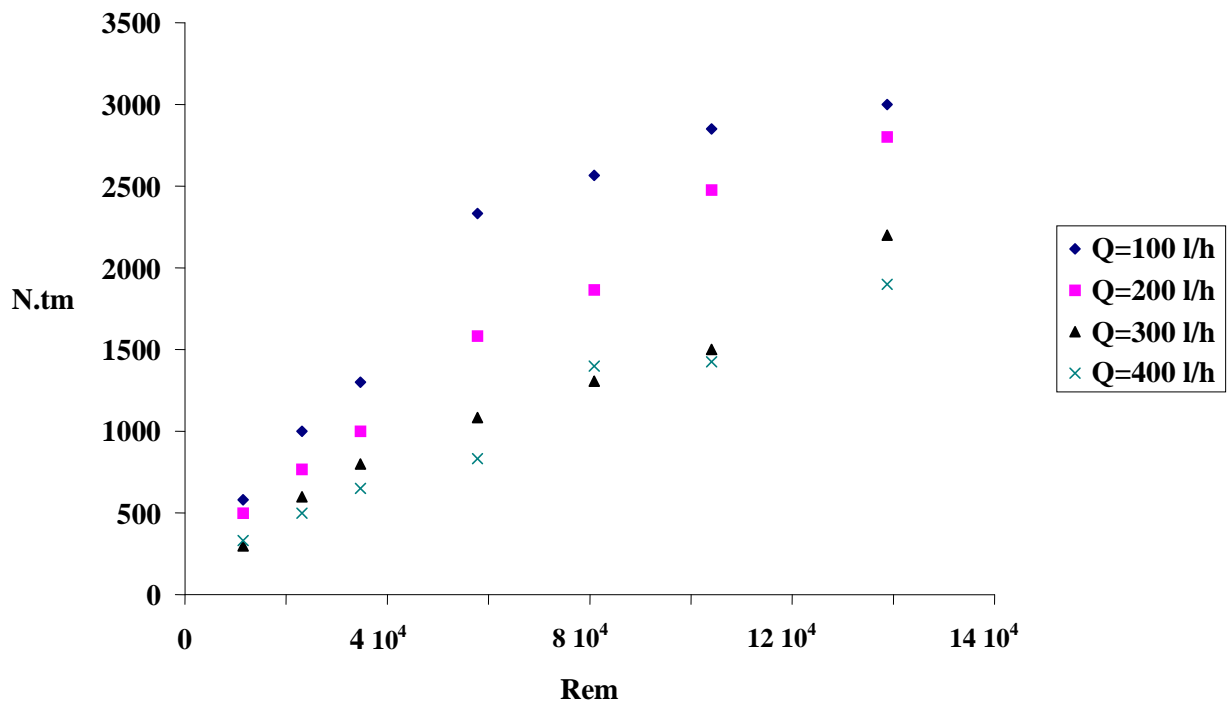


Figure 15 : Variation du produit Nt_m en fonction de Rem et de Q en utilisant l'agitateur IV.

V-4.2.3. Comparaison des performances des réacteurs agité et torique :

Cette étude a pour objectif de comparer les performances des deux réacteurs agité et torique. Cette comparaison a été effectuée sur la base du temps de mélange et du produit $N.t_m$.

La figure 16 donne la variation de t_m dans les deux réacteurs en fonction de la vitesse d'agitation et ceci pour deux mobiles d'agitation, la turbine de Rushton et l'hélice marine à pôle inclinée (agitateur III du chapitre I), choisis respectivement le réacteur agité et torique en fonctionnement continu dans le but de sélectionner le système qui apporte le meilleur résultat. Nous constatons d'après cette figure que le réacteur agité donne les valeurs de temps de mélange inférieures à celles trouvées dans le réacteur torique. Ce résultat s'éloigne de celui trouvé par [17, 18, 19] où le réacteur torique est plus efficace que le réacteur agité dans les procédés mettant en jeu des fluides très visqueux et pour des applications biochimiques car il présente un mélange radial permettant une répartition uniforme et homogène mais va dans le sens du résultat obtenu pour **Iabbaden** et coll [20] qui ont étudié la réaction de polymérisation de l'acétate de vinyle en faisant varier certains paramètres sur l'évolution de cette réaction.

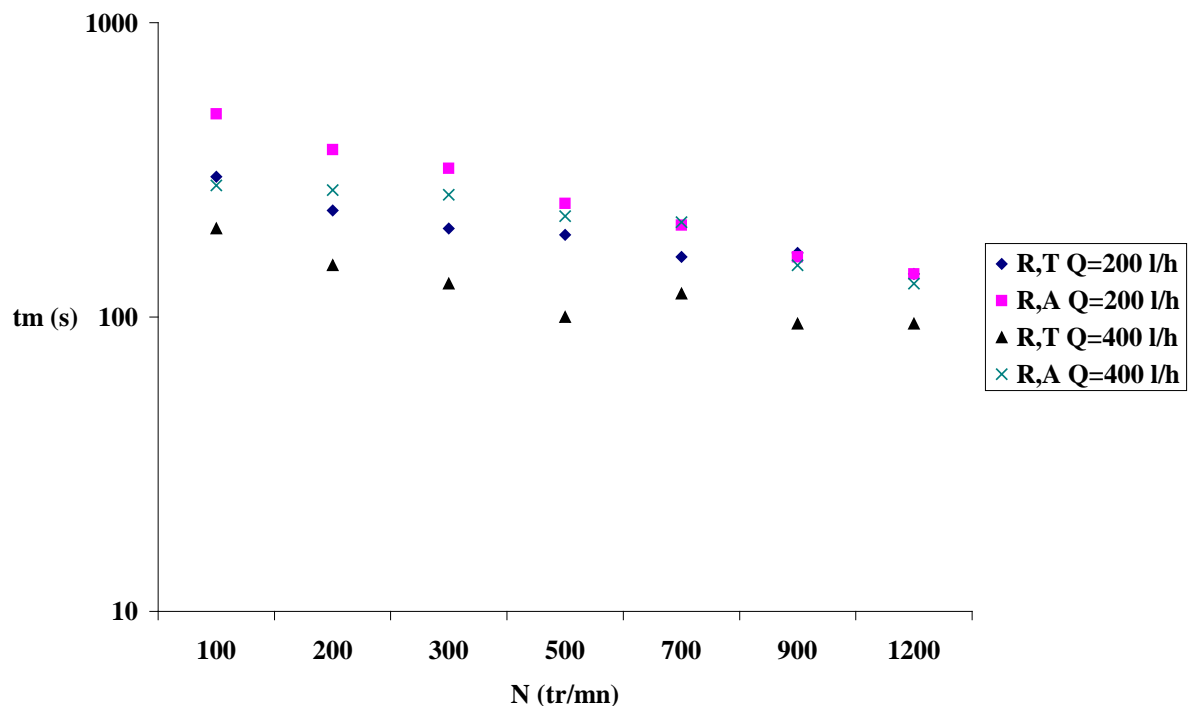


Figure 16 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation dans les deux réacteurs.

La comparaison des performances du réacteur torique à celles d'un réacteur agité a été effectuée aussi sur la base du produit $N.t_m$ en représentant sur la figure 17 la variation de ce produit en fonction du nombre de Reynolds de mélange. Nous remarquons, que le produit $N.t_m$ obtenu dans le réacteur agité est proche de celui obtenu dans le réacteur torique ce qui signifie que les performances des deux réacteurs sont comparables.

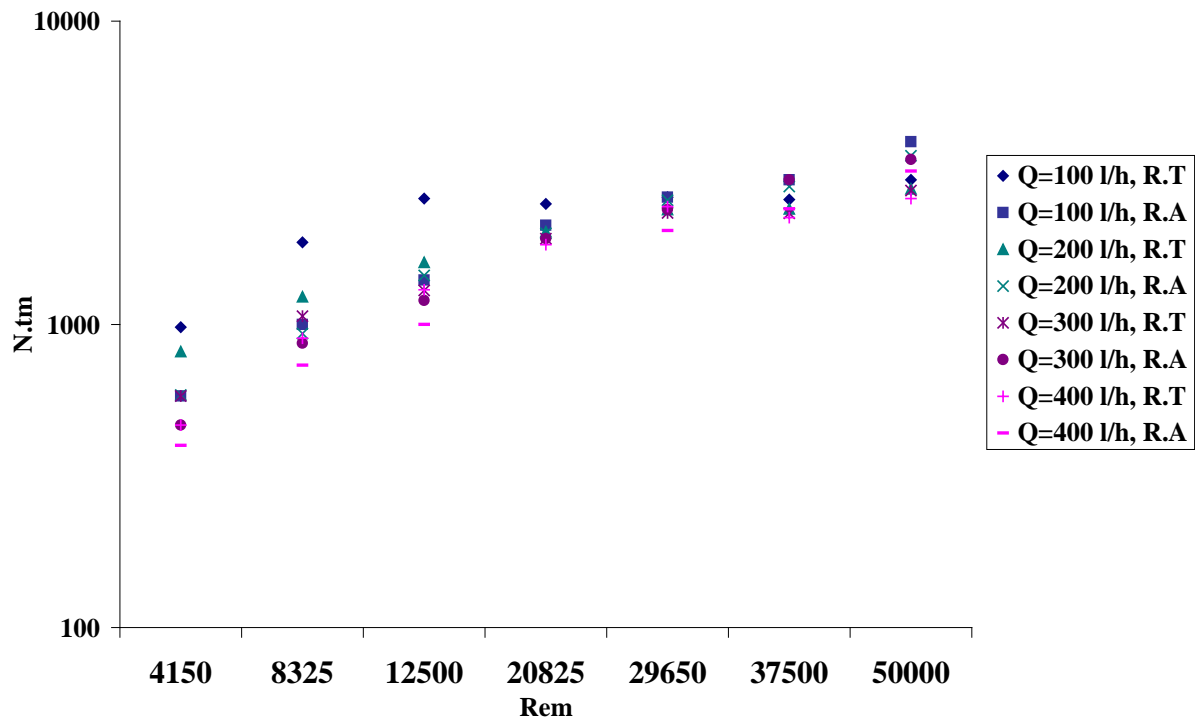


Figure 17 : Variation du produit $N.t_m$ dans les deux réacteurs.

IV- CONCLUSION

L'étude entreprise dans ce chapitre a été réalisée dans le but de caractériser le réacteur agité d'une part et d'autre part de comparer ses performances avec celles du réacteur torique.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence différents points intéressants :

- Sur la base du temps de mélange, les résultats obtenus dans les différents cas montrent que la qualité du mélange est meilleure lorsque la cuve est munie de la turbine à pâles droites (Rushton), ce qui montre que la turbine est plus efficace par rapport à l'hélice marine pour le réacteur agité.
- L'augmentation de la vitesse d'agitation ainsi que du débit d'alimentation améliore considérablement l'efficacité du mélange qui se caractérise par la diminution du temps de mélange.
- L'existence des zones stagnantes au fond du réacteur dépend très peu du débit d'alimentation et de la vitesse d'agitation, elle est due essentiellement à la géométrie de la cuve.
- Le produit Nt_m dans le réacteur agité est proportionnel à Re_m quelles que soient les dimensions des mobiles d'agitation et le débit d'alimentation.
- Enfin, l'étude comparative des performances du réacteur torique avec celles du réacteur agité continu de même volume a été effectuée sur la base de temps de mélange et du nombre adimensionnel $N.t_m$. Les résultats expérimentaux ont montré que le produit $N.t_m$ obtenu dans les deux réacteurs varie proportionnellement quelles que soient les valeurs de Re_m et du débit d'alimentation. Les performances des deux réacteurs sont comparables.

Annexe IV

Schéma caractéristique du réacteur agité suggéré par Holland et Chapman [13].

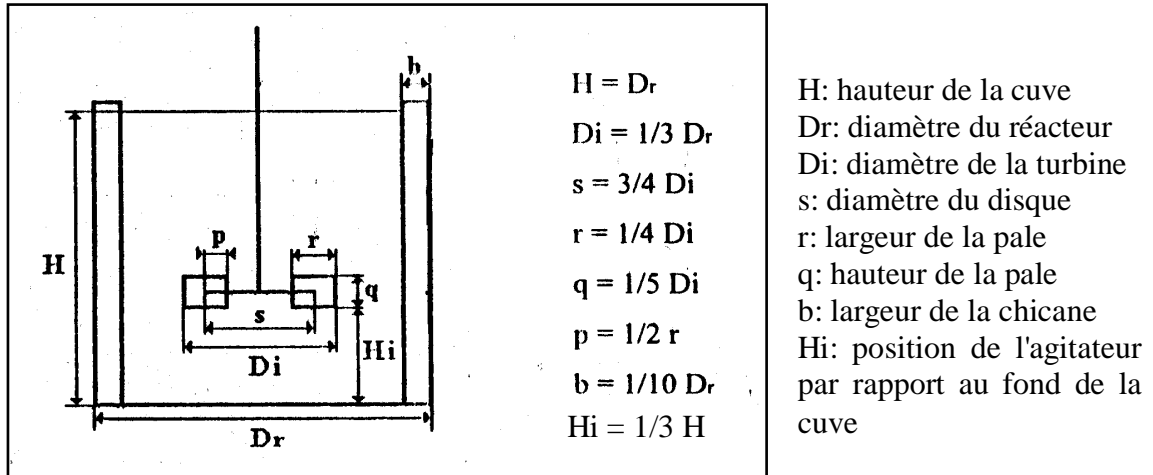
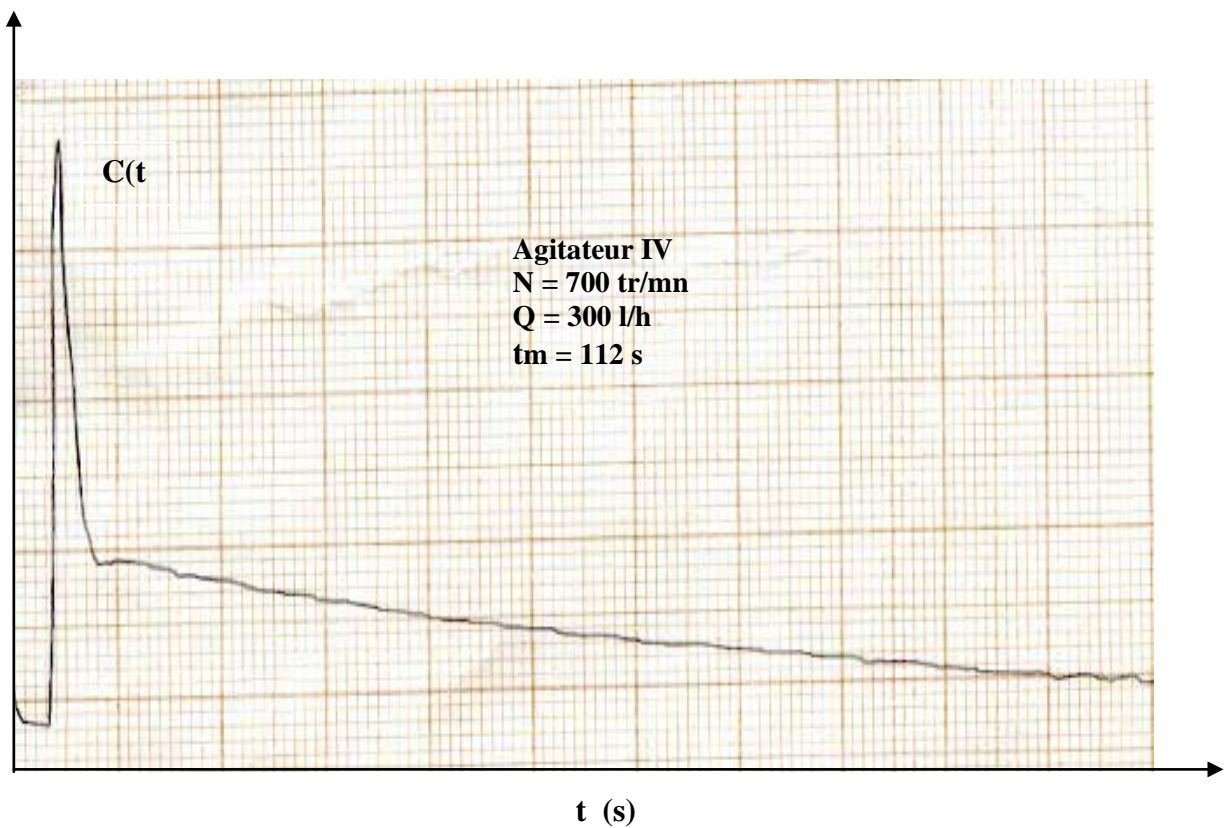
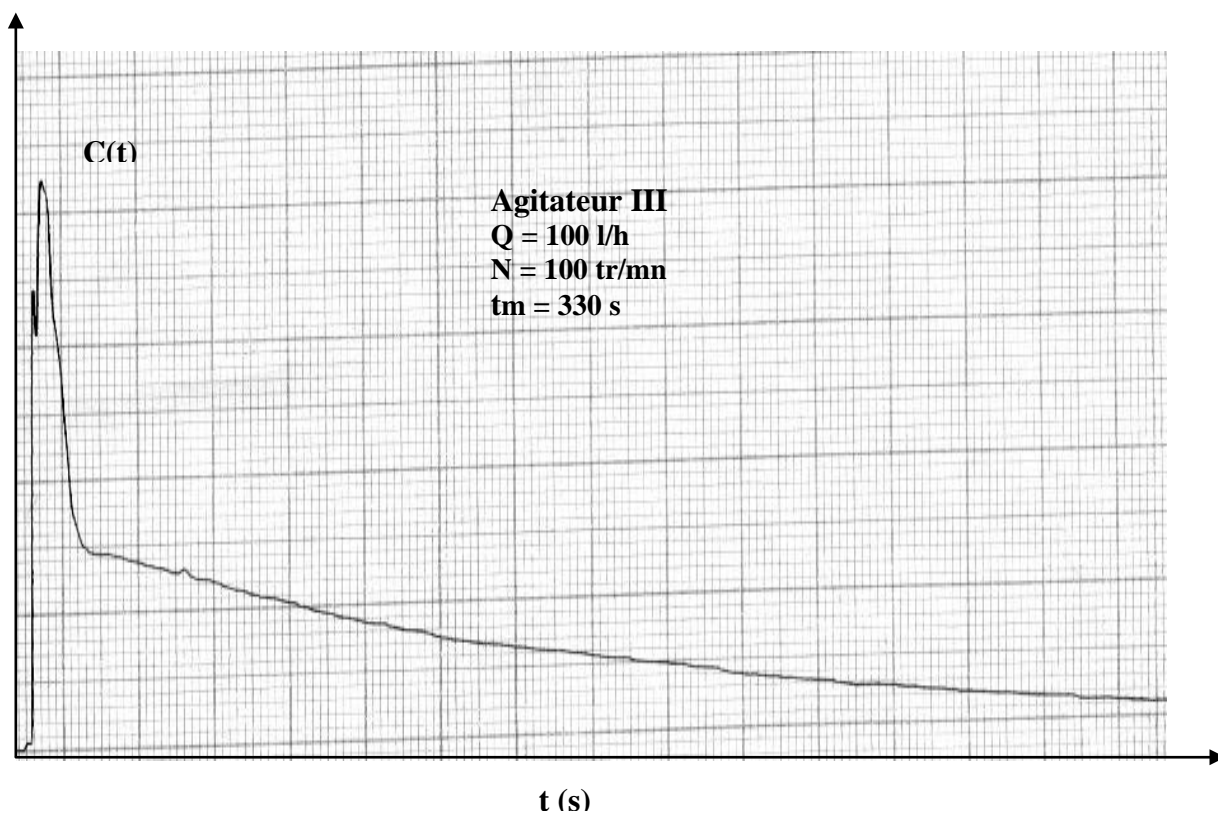
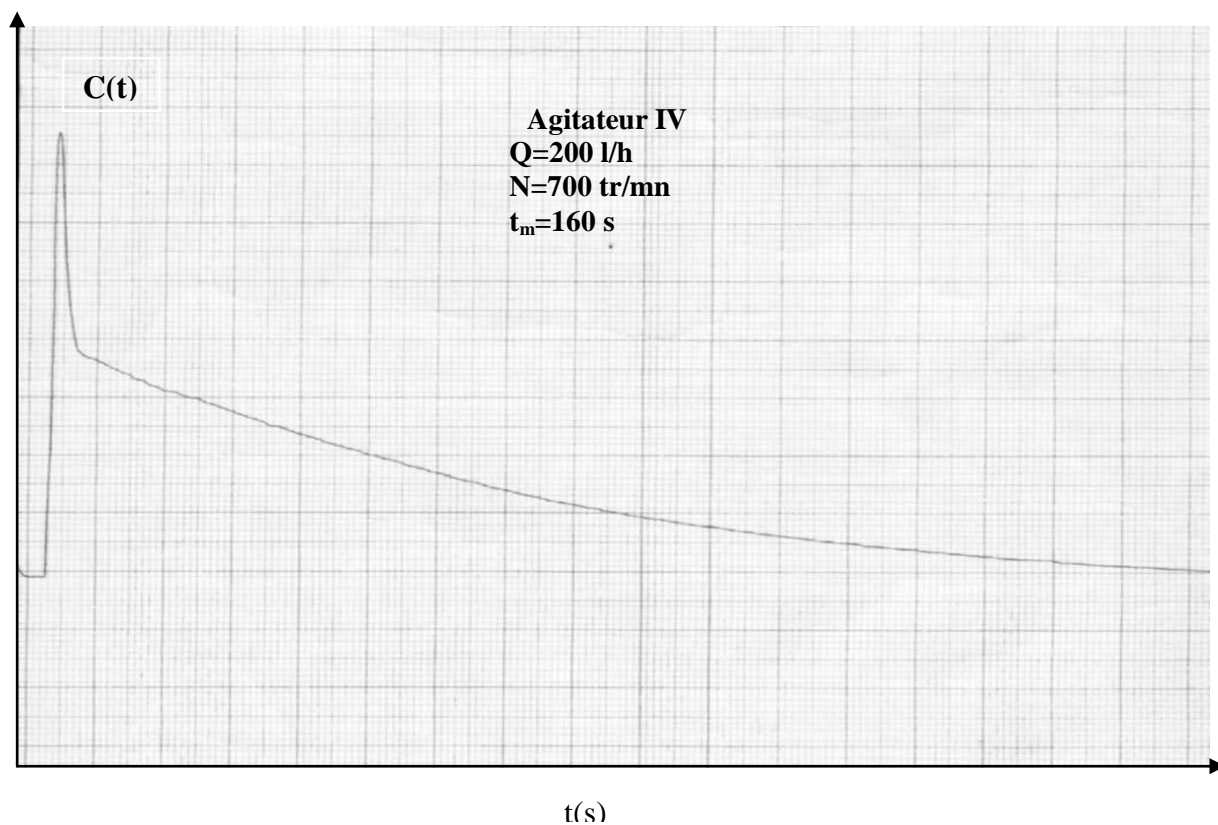


Figure 1 : Schéma du réacteur.

Représentation des courbes expérimentales pour différents débits d'alimentation et vitesses d'agitation.





Références bibliographiques

- [1] Hocine I. , Plazani E. , David R. ,
"influence of tank geometry and impeller type on mixing time in liquid phase and stirred suspensions".
The 11th international congress of chemical engineering, chemical equipment design and automation, Prague. (1993).
- [2] Holmes D.B, Voncken R.M, Dekken J.A,
"fluid flow in turbine stirred, baffled tanks"
Chem. Eng. Sci, vol 19, 201-208, (1964).
- [3] Gelvs M. , Cardinal L.E. ,
"choix d'un agitateur lorsque la viscosité varie de 1 centipoise à 2000 poises".
Entropie N°88. (1979).
- [4] Rachez D. , David R. , Villiermaux J. ,
"un nouveau modèle de circulation interne dans une cuve agitée de type industriel"
entropie N°101, 32. (1981).
- [5] Baudon C., Xuereb C. and Bertrand J.
"Hydrodynamics generated in a stirred vessel by a multiple propeller system"
the canadian journal of chemical engineering, Vol 75, (1997).
- [6] Villiermaux J. ,
"génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs"
édition technique et documentation, Lavoisier (1993).
- [7] Komori S. , Murakani Y. ,
"turbulent mixing in baffled stirred tanks with vertical – blade impellers"
A.I.C.H.E. Journal vol 34, N°6, 932-937, (1988).
- [8] Distelhoff M. , Marquis A.J. ,
"scalar mixing measurements in batch operated stirred tank"
The Canadian journal of chemical engineering, vol 75, (1997).
- [9] Voncken R.M, Holmes D.B, Den Hartog H.W,
"fluid flow turbine stirred, baffled tanks II, dispersing during circulation"
Chem. Eng. Sci, vol 19, 209-213, (1964).
- [10] Khang J.S. , Levenspeil O. ,
"new scale up and design method for stirred agitated batch mixing vessels"
Chem. Eng. Sci, vol 31, 569 – 577. (1976).
- [11] Roustan M. , Pharamond J.C. et Line A. ,
"agitation – mélange"
technique de l'ingénieur, J 3800. (1999).
- [12] Lelan A. , Moritz S.A. ,
"caractéristiques hydrodynamiques et géométrie des systèmes d'agitation"

- information chimie, 210-153, (1981).
- [13] Holand F.A. , Chapman F.S. ,
"liquid mixing and processing in stirred tanks"
reinhold publishing corporation, new york (1966).
- [14] Brodberger J.F. , valentin G. , stock A. ,
"utilisation d'une microsonde conductimétrique pour l'étude des phénomènes de
mélange au sein de cuves agitées"
entropie N°112, (1983).
- [15] Plazari E.,
"phénomène de DTS dans un réacteur à jet agité mécaniquement en phase liquide"
thèse de doctorat Nancy, (1977).
- [16] Moo Yong M. , Kawase Y. ,
"mixing time in bioreactors"
Journal. Chem. Technol Biotech, 44, 63, (1989).
- [17] Nouri L. , Le grand J. , Popineau. Y,
"enzymatic hydrolysis of wheat proteins"
Part I : Enzymatic kinetics and study of limited hydrolysis in a bath stirred reactor
Chem. Eng. Journal, 65, 187-194. (1997).
- [18] Benkhalifa H. ,
"Etude du réacteur torique : Modélisation et application à la transformation de
protéines".
Thèse de doctorat. Université de Nantes (2000).
- [19] Kresber U. , Meyer H.P. and Fiechter A.
A comparaison between the performance of continously stirred tank bioreactor and a
torus bioreactors with respect to highly viscous culture broth.
J.chem. Tech. Biotech., 43, 107, (1988).
- [20] Iabbadene A., Bataille P.,
"emulsion polymérisation of venvyl acetate in tubular loop reactor"
Journal of applied polymer-science, Vol 51, 503-511, (1994).

Conclusion générale

Notre travail avait pour objectif principal de caractériser le mélange et l'écoulement dans le réacteur torique en fonctionnement continu.

La méthode adoptée pour accomplir cette étude est la méthode conductimétrique pour l'analyse de distributions des temps de séjours.

Les temps de mélange et de circulation dans le réacteur torique ouvert ne sont pas influencés par la position de soutirage. Par contre nous suggérons une position de soutirage la plus proche de l'entrée du fluide afin de maximiser le volume utile du réacteur. L'influence du débit d'alimentation sur la circulation et sur le mélange au sein du réacteur a été étudiée.

Il a été montré que, pour un rapport du temps de passage sur le temps de circulation $\left(\frac{\tau}{t_c}\right)$ en fonctionnement continu inférieur à 20, le débit d'alimentation accélère la circulation.

A débit d'alimentation élevé et à faible vitesse d'agitation, il semblerait qu'un apport énergétique supplémentaire ait lieu, ce qui a un effet bénéfique sur la circulation et sur le mélange au sein du réacteur.

Pour un $\left(\frac{\tau}{t_c}\right) > 20$, cet effet n'est plus observé, et par conséquent le passage du réacteur torique fermé au réacteur torique continu n'entraîne pas de modifications importantes à l'intérieur du réacteur du point de vue hydrodynamique.

D'autre part, une représentation adimensionnelle a permis de proposer une corrélation entre le nombre de Reynolds d'écoulement et le nombre de Reynolds de mélange. Pour la caractérisation du mélange, nous avons trouvé que le rapport entre le temps de mélange et celui de la circulation du fluide peut atteindre une valeur moyenne égale à 22 et décroît légèrement avec l'augmentation du débit d'alimentation.

Des mesures de pertes de charge avec et sans débit d'alimentation ont été effectuées afin de calculer la puissance dissipée dans le réacteur torique et d'étudier aussi l'influence du débit d'alimentation d'un point de vue énergétique. Nous avons constaté qu'à faible vitesse d'agitation, la puissance dissipée dans le réacteur torique en fonctionnement continu est supérieure à celle mesurée en fonctionnement discontinu, elle est presque quatre fois plus importante.

L'écoulement à l'intérieur de notre réacteur a été représenté par le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation partielle. La détermination du nombre de Bodenstein a montré que le coefficient de dispersion axiale est dépendant de la vitesse d'agitation. De plus la dispersion axiale semble être indépendante du débit d'alimentation pour des vitesses d'agitation élevées.

Nous avons également rapporté une étude sommaire du mélange dans le réacteur agité. A la lumière des résultats trouvés, nous avons constaté que le temps de mélange est inversement proportionnel à la vitesse d'agitation ainsi qu'au débit d'alimentation. Le réacteur agité présente des grands volumes morts rendant ainsi son homogénéisation assez difficile contrairement au réacteur torique. Ce dernier présente un mélange radial efficace permettant une extrapolation plus aisée de ses performances.

La plupart de nos résultats sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature.

Pour les développements futurs, il serait intéressant de mener d'autres études sur des réacteurs continus et notamment en ce qui concerne leur modélisation.

En perspective, les domaines d'investigation sur les réacteurs toriques restent très ouverts, d'autant que les applications industrielles avec ce type de réacteur nécessitent, pour un usage optimisé, une connaissance détaillée des caractéristiques hydrodynamiques dans les procédés exigeant des conditions opératoires fixes (pH, T°, ...).