

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
« HOUARI BOUMEDIENNE »

INSTITUT DE CHIMIE INDUSTRIELLE  
*Laboratoire de génie de la réaction chimique*

**MEMOIRE DE MAGISTER**

*Option*

« Procédés chimiques et environnement »

**THEME**

***CARACTERISATION ET MODELISATION  
DE L'ECOULEMENT DANS UN REACTEUR  
A BOUCLE DE FORME TORIQUE***

**Présenté par :**

G.KAOUA

**Proposé et dirigé par :**

Pr. A.BENMAILI

Dr. L. NOURI

**Membres du jury :**

Mr	S. BELAADI	Professeur (USTHB)	Président
Mme	K. ALLIA	Professeur (USTHB)	Examineur
Mr	K. BETAIMI	Chargé de cours (USTHB)	Examineur
Mr	K. DAOUD	Maître de conférences (USTHB)	Examineur
Mr	L. NOURI	Maître de conférences (INIA)	Co-rapporteur
Mme	A. BENMAILI	Professeur (USTHB)	Rapporteur

**Promotion 2000**

## AVANT PROPOS

Par le présent manuscrit, je tiens à exprimer toute ma gratitude au professeur **A. BENSMAILI** de l'USTHB et responsable du laboratoire de génie de la réaction chimique qui m'a proposé ce travail en montrant une grande disponibilité et un soutien permanent tout au long de mon encadrement.

J'exprime mes remerciements les plus vifs à Monsieur **L. NOURI** chargé de cours à l'INIA pour avoir contribué à la réalisation de ce travail en qualité de co-rapporteur en appréciant beaucoup ses conseils et ses critiques.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur le professeur **BELAADI** qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Que madame le professeur **ALLIA**, monsieur **BETAIMI** chargé de cours à l'USTHB, monsieur **DAOUD** maître de conférences à l'USTHB, reçoivent ici l'expression de tous mes remerciements pour s'être intéressés à ce travail et pour avoir accepté la tâche d'examineurs.

Ce travail a été réalisé en grande partie expérimentalement au niveau de l'UER de chimie de l'école militaire polytechnique de Bordj El Bahri, je tiens à faire part de ma profonde reconnaissance à tout le personnel du département de l'UER de chimie et du laboratoire de génie des procédés pour avoir mis à ma disposition un environnement dynamique et agréable, un grand merci donc à tous et particulièrement à : **Mme BENHARKAT, Mme BEGAG, Mr MERATI, Mr BENBARKAT, Mr MOHAMEDI, Mr DJENET, Mr MELOUANI, Mr LAMOURI et Mr CHERIF.**

Je ne saurais oublier l'ensemble du personnel, corps enseignants, chercheurs et administratifs de l'institut de chimie industrielle de (USTHB) pour m'avoir aidé à la réalisation de ce travail.

Enfin merci à tous ceux et toutes celles sans qui ce travail n'aurait abouti.

# *Sommaire*

## ***SOMMAIRE***

INTRODUCTION GENERALE

NOMENCLATURE

### ***CHAPITRE I***

I	INTRODUCTION	2
II	TRAVAUX ANTERIEURS	3
III	ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUANT SUR L 'ECOULEMENT ET LE MELANGE DANS LE REACTEUR A BOUCLE	
III- 1	ETUDE DE LA VITESSE DE CIRCULATION	7
III- 2	ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE LA VITESSE DE CIRCULATION	16
III- 3	ETUDE DU MELANGE	19
III- 4	ETUDE DES PERTES DE CHARGE	22
III- 5	PUISSANCE CONSOMMEE PAR UN MOBILE D'AGITATION	23
	CONCLUSION	28
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29

### ***CHAPITRE II***

I	INTRODUCTION	33
II	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	33
II-1	REACTEUR TORIQUE	33
II-2	DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOURS (DTS)	34
II-2-1	METHODE CONDUCTIMETRIQUE	35
II-2-2	DESCRIPTION DE LA SONDE	35
II-2-3	ETALONNAGE DE LA SONDE CONDUCTIMETRIQUE.	37
III	EFFICACITE DU MELANGE RADIAL DANS LE REACTEUR TORIQUE	40
IV	CARACTERISATION DE L'ECOULEMENT	41
V	ETUDE DE LA VITESSE DE CIRCULATION	42
V-1	CORRELATION DES RESULTATS	44

VI REPRESENTATION ADIMENTIONNELLE DE LA VARIATION DE LA VITESSE 49  
MOYENNE DE CIRCULATION EN FONCTION DE LA VITESSE D'AGITATION

VII ETUDE DU MELANGE 53

VII-1 VARIATION DU TEMPS DE MELANGE AVEC LA VITESSE D'AGITATION 53

VII-2 CARACTERISATION GLOBALE DU MELANGE. 54

CONCLUSION 58

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 59

ANNEXES 61

6

## ***CHAPITRE III***

I INTRODUCTION 64

II PRESENTATION DES MODELES IDEAUX 65

II-1 MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE 65

II-2 MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE ET 67

RECIRCULATION TOTALE

II-3 MODELE DES MELANGEURS EN CASCADE 68

III SYNTHESE DES TRAVAUX ANTERIEURS 69

IV PARTIE EXPERIMENTALE 73

IV-1 APPLICATION DU MODELE DE DISPERSION AXIALE AVEC 73

RECIRCULATION TOTALE

IV-1-1 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE D'AGITATION SUR LE 74

NOMBRE DE BODENSTEIN

IV-1-2 INFLUENCE DE LA COURBURE DES COUDES SUR LA DISPERSION 76

DANS LE REACTEUR

IV-2 APPLICATION DU MODELE DES REACTEURS AGITES EN SERIE 79

CONCLUSION 82

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 83

ANNEXES 85

CONCLUSION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, les recherches dans le domaine du génie des procédés ont pris une importance grandissante en ce qui concerne la conversion des matières premières et des économies d'énergie. Cet intérêt est lié au coût énergétique élevé et à la diminution des ressources naturelles.

Tous ces problèmes ont incité les chercheurs à l'étude de nouveaux types de réacteurs caractérisés par des coefficients d'échange de matière et de chaleur élevés et c'est dans ce contexte que le réacteur torique a été envisagé car il présente des caractéristiques de mélange intéressantes pour d'éventuelles applications en biotechnologie.

L'écoulement à l'intérieur de ce dernier est obtenu par la rotation d'un agitateur placé dans l'axe du tube.

L'étude entreprise dans ce mémoire est divisée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique des travaux effectués sur ce type de réacteur, ceci en montrant l'intérêt que présente le réacteur à boucle par les différents avantages et les divers domaines d'applications qu'il présente.

L'étape primaire du second chapitre à caractère expérimental consistait à concevoir et à réaliser le réacteur à boucle de forme torique objet de notre étude et à définir nos paramètres d'études.

Alors que dans la deuxième étape, notre intérêt s'est porté sur la caractérisation de l'écoulement et du mélange dans le réacteur torique fermé par la méthode conductimétrique et qui se base dans notre cas sur l'utilisation de microsonde conductimétrique réalisée au niveau du laboratoire.

Ainsi l'obtention des courbes expérimentales de la distribution des temps de séjours permettent d'accéder à deux paramètres essentiels : temps de circulation et temps de mélange.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire nous avons caractérisé l'écoulement dans le réacteur torique par adoption de deux modèles représentatifs :

- Modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale.
- Modèle des mélangeurs en cascade avec recirculation totale.

Ces modèles permettent d'accéder aux deux paramètres caractéristiques à savoir respectivement le nombre de Bodenstein ( $Bo$ ) d'où le coefficient de dispersion axiale ( $Dax$ ) et le nombre de réacteurs agités en série.

Par ailleurs une relation empirique reliant le coefficient de dispersion axial à la vitesse de rotation a été proposée. Enfin l'influence de la courbure des coudes sur Dax a été étudiée ceci en comparaison avec un réacteur constitué de coudes à grand rayon.

## NOMENCLATURE

A, a : constante.

b : constante.

B0 : nombre de Bodenstein ( $B0=Uc.L_t/D_{ax}$ ).

c, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub> : coefficients.

C(θ) : concentration du traceur (mol/l).

Co : concentration qu'aurait le traceur s'il était uniformément réparti dans le réacteur (mol/l).

C(θ)/Co : concentration réduite.

Dax : coefficient de dispersion axiale (cm<sup>2</sup>/s).

d<sub>1</sub> : diamètre extérieur du mobile d'agitation (mm).

d<sub>2</sub> : diamètre intérieur du mobile d'agitation (mm).

d<sub>t</sub> : diamètre du tore (mm).

E(t) ; Fonction de distribution de temps de séjours.

Fg<sub>1</sub>,Fg<sub>2</sub> : Facteurs géométriques.

K : coefficient de proportionnalité .

L<sub>t</sub> : longueur moyenne du tore (mm).

N : vitesse d'agitation du mobile d'agitation (tr/s).

N : nombre de mole de traceur (mole/l).

N<sub>θ</sub> : nombre de circulation.

n : nombre de réacteurs en série et nombre de section.

Q : debit volumique (l/mn).

R<sub>t</sub> : rayon de courbure du tore (mm).

Rec : nombre de Reynolds de circulation ( $Rec = \frac{Uc d_t}{\nu}$ ).

Rem : nombre de Reynolds de mélange ( $Rem = \frac{N d_1^2}{\nu}$ ).

r<sub>1</sub> : rayon extérieur du mobile d'agitation (mm).

r<sub>2</sub> : rayon intérieur du mobile d'agitation (mm).

r<sub>t</sub> : rayon intérieur du tore (mm).

t : temps (mn).

tc : temps de circulation (mn).

tm : temps de mélange (mn).

tm<sub>s</sub> : temps de mélange spécifique (mn/l).

$U'$  : vitesse calculée (cm/s).

$U_c$  : vitesse moyenne de circulation (cm/s).

$U_t$  : vitesse tangentielle (cm/s).

$U_z$  : vitesse axiale (cm/s).

$V_R$  : volume du réacteur (l).

$X$  : coordonnée spatiale (cm).

$Z$  : coordonnée spatiale (cm).

$Z_m$  : distance entre le point d'injection et de détection (cm).

$Z_m^*$  : coordonnée réduite.

### **SYMBOLES GRECS.**

$\varphi$  : angle d'inclinaison des pales du mobile d'agitation (degré).

$\theta$  : temps réduit ( $\theta = t / t_c$ ).

$\nu$  : Viscosité cinématique ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).

$\rho$  : masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\tau$  : temps de passage (s).

### **INDICES**

$J$  : nombre de passage dans le réacteur.

$m$  : nombre de passes.

*Chapitre I*  
*Synthèse Bibliographique*

## SOMMAIRE

I- INTRODUCTION	2
II- TRAVAUX ANTERIEURS	3
III- ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUANT SUR L'ECOULEMENT ET LE MELANGE DANS LE REACTEUR A BOUCLE	
III- 1- ETUDE DE LA VITESSE DE CIRCULATION	7
III- 2- ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE LA VITESSE DE CIRCULATION	16
III- 3- ETUDE DU MELANGE	19
III- 4- ETUDE DES PERTES DE CHARGE	22
III- 5- PUISSANCE CONSOMMEE PAR UN MOBILE D'AGITATION	23
IV- CONCLUSION	28
V – REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29

## **I- INTRODUCTION**

Depuis plusieurs années, les recherches dans le domaine du génie des procédés ont pris une importance grandissante en ce qui concerne la conversion des matières et des économies d'énergie. Cet intérêt est directement lié au coût énergétique élevé et à la diminution des ressources naturelles.

Tous ces inconvénients ont incité les chercheurs à envisager de nouveaux types de réacteurs caractérisés par des coefficients d'échange de matière et de chaleur élevés, permettant ainsi de minimiser les coûts de fonctionnement.

C'est dans ce contexte que le réacteur à boucle a été envisagé pour de potentielles applications notamment en biotechnologie.

Par comparaison aux réacteurs de type agité, le réacteur à boucle présente de nombreux avantages :

- Extrapolation aisée de ses performances,
- Effets de cisaillements faibles,
- Consommation énergétique moindre,
- Mélange radial efficace,
- Dissipation efficace de la chaleur.
- Absence de dépôt de polymère sur la paroi du réacteur et sur les pales du mobile d'agitation pour de grandes vitesses d'agitation.

## II- TRAVAUX ANTERIEURS

D'une manière générale le réacteur à boucle est constitué de quatre coudes à 90° chacun. Ce dernier peut se présenter sous forme torique (RPT) ou rectangulaire (RTL) figure 1 et est utilisé en configuration horizontale ou verticale.

L'espace réactionnel limité par l'enveloppe du tore est exempt de chicane ou autres dispositifs internes (comme par exemple éléments d'échangeurs de chaleur).

Le mélange et la recirculation des réactifs à l'intérieur du réacteur sont assurés par la rotation d'un mobile d'agitation. Dans ce qui suit nous tenterons de rapporter dans l'ordre chronologique les différentes études consacrées à ce type de réacteur ainsi nous commencerons par :

NORWOOD et Coll. en 1962 ont proposé ce réacteur pour la polymérisation des oléfines [1], suivi en 1979 par SATO et Coll.[2] qui ont étudié l'hydrodynamique dans un réacteur à boucle ouvert de forme rectangulaire ; ces derniers ont montré que la distribution de vitesse est influencée par la présence de chicanes et par le type d'agitateur utilisé ; aussi, ils ont évalué et comparé les pertes de charge occasionnées dans les parties droites et coudées du réacteur.

L'étude qui va suivre est celle de MURAKAMI et Coll.[3], elle porte essentiellement sur l'aspect énergétique c'est à dire l'évaluation de la puissance consommée dans un réacteur de forme rectangulaire. Pour cela ils ont étudié l'influence des chicanes, du diamètre, de l'angle d'inclinaison du mobile d'agitation ainsi que la longueur du réacteur (en système ouvert ou fermé) sur la puissance dissipée.

L'étude proposée par LAEDERACH et Coll.[4] concerne les systèmes biphasiques gaz – liquide et elle porte sur la comparaison des réacteurs toriques et agités. Cette comparaison est basée particulièrement sur la détermination de l'effet du mélange spécifique et la production de biomasse. C'est ainsi qu'ils ont montré l'avantage net du réacteur torique sur le réacteur agité. Cependant, ils ont constaté que le réacteur agité à circulation forcée présente des valeurs d'effet de mélange de même ordre de grandeur par rapport aux réacteurs toriques.

Plus tard en 1988 KREBSER et Coll.[5] ont montré l'intérêt du bioréacteur continu torique par rapport au réacteur parfaitement agité pour la production du XANTHOMONAS campestris sur la base du taux de transfert en oxygène et sur la production de xanthane. Ils ont trouvé que la quantité de glucose transformée en xanthane est plus importante dans le cas du bioréacteur torique, de plus la puissance consommée est moins importante dans ce dernier cas.

TANAKA et Coll.[6] ont réalisé la polymérisation en suspension du styrène dans un réacteur à boucle fermé de forme rectangulaire. Ils ont étudié la distribution finale de la taille des particules ainsi que la taille moyenne de ces dernières. Ils ont établi d'une part une corrélation entre la taille moyenne finale des particules et les paramètres opératoires, telles que les conditions de mélange dans la zone de l'agitateur et les propriétés physiques initiales des suspensions et d'autre part, ils ont montré qu'une vitesse élevée de circulation permet d'éviter le dépôt de polymères sur la paroi du réacteur.

Dans une autre étude, TANAKA et Coll.[7] ont caractérisé l'écoulement dans le réacteur à boucle de forme torique par la détermination de la vitesse moyenne de circulation, la distribution de la vitesse et les pertes de charge. Ils ont recherché des relations pouvant exister entre les conditions d'agitation et les caractéristiques d'écoulement du fluide dans le réacteur torique. Enfin, ils ont procédé à une comparaison de leur résultats avec ceux de SATO et Coll.[2] et MURAKAMI et Coll.[3] effectués dans un réacteur de forme rectangulaire.

DER YUAN et Coll.[8, 9] ont mis en évidence les performances du réacteur torique continu dans la polymérisation en suspension du styrène. Les résultats obtenus montrent que le taux de conversion du monomère et le diamètre des particules sont proportionnels au temps de séjour dans le réacteur. HOSOGAI et Coll.[10] ont utilisé le réacteur à boucle de forme circulaire pour la polymérisation en suspension du styrène. Ils ont étudié la distribution de la taille finale des particules en faisant varier le diamètre du mobile d'agitation et la vitesse de rotation de l'agitateur. Par conséquent, une corrélation a été établie entre la taille moyenne de particules et la puissance dissipée.

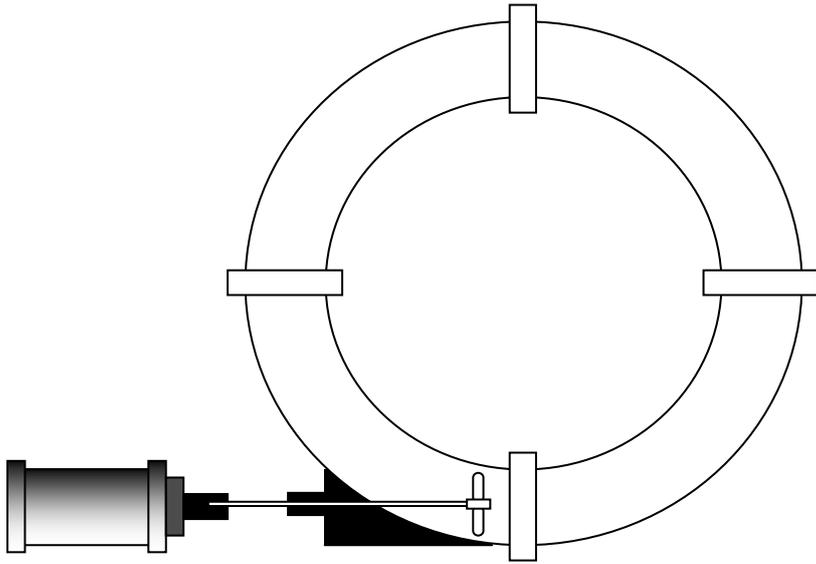
Récemment, BELLEVILLE et Coll.[11,12] ont étudié l'écoulement et le mélange dans un réacteur à boucle de forme torique. Ils ont proposé d'une part une corrélation liant la vitesse moyenne de circulation et la vitesse d'agitation et d'autre part, un modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale pour caractériser l'écoulement dans le réacteur.

LEGRAND et Coll. [13] ont introduit un nouveau type de réacteur, il s'agit de micro réacteur à boucle de 0.1litre, considéré comme réacteur torique. Celui-ci a été employé dans l'acétylation des protéines de petit pois (isolate pea), permettant ainsi d'améliorer leurs propriétés fonctionnelles et nutritionnelles.

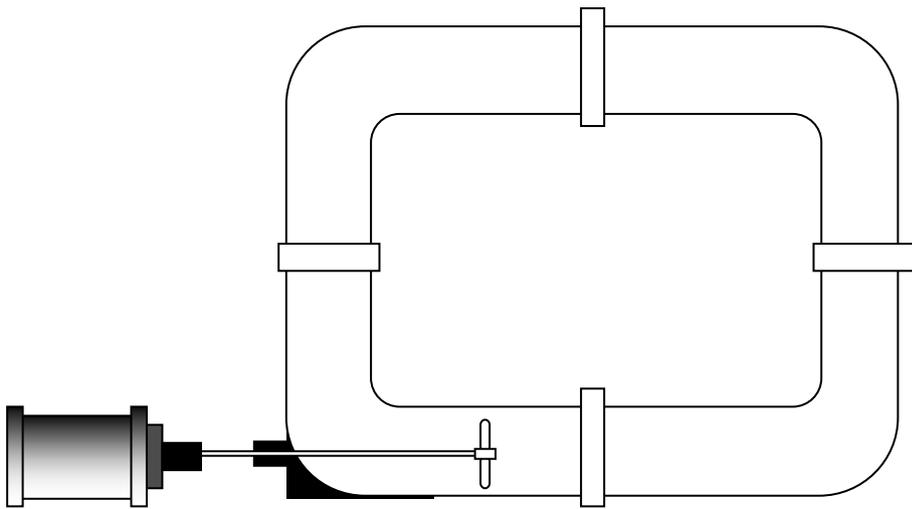
NOURI [14] a caractérisé l'écoulement et le mélange dans trois réacteurs à boucle de forme carrée et torique. A travers ces études, des corrélations empiriques ont été proposées reliant le nombre de Reynolds d'écoulement en fonction des conditions d'agitation et des caractéristiques géométriques des réacteurs. D'autre part, l'écoulement et le mélange dans ces différents réacteurs fermés à boucle ont été caractérisé par un modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale. Par ailleurs, et comme application dans ce type de réacteur une mise en œuvre d'hydrolyse enzymatique des gliadines de blé a été réalisée [14, 15]. Par la suite, une étude comparative portant sur la différence de comportement entre les réacteurs toriques fermé et continu a été réalisée pour l'évaluation de la performance de chacun.

KHALID [16] a caractérisé l'écoulement tourbillonnaire dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire par deux méthodes : méthode électrochimique et méthode conductimétrique.

Une corrélation liant la vitesse de circulation à la vitesse d'agitation a été proposée. Cette corrélation fait intervenir un facteur géométrique dépendant des caractéristiques géométriques du mobile et du réacteur. Il a également montré l'efficacité du mélange radial et a évalué le nombre de circulation dans ce type de réacteur.



**Fig. (1-a) (RPT)**



**Fig. (1-b) (RTL)**

**Fig. 1 : Schéma représentatif d'un réacteur parfaitement torique et d'un réacteur torique à longueurs droites.**

### III- ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUANT SUR L'ÉCOULEMENT ET LE MELANGE DANS LE REACTEUR A BOUCLE.

#### III- 1- ETUDE DE LA VITESSE DE CIRCULATION

Les réacteurs à boucle semblent être particulièrement adaptés à des systèmes nécessitant des conditions d'écoulement bien définies dans l'ensemble du volume réactionnel. L'un des principaux paramètres permettant d'optimiser les conditions d'agitation est la vitesse de circulation.

Les auteurs [2,7,10,11] des diverses études réalisées jusqu'alors sur différentes géométries de réacteur à boucle et différents mobiles d'agitation à savoir hélice marine et turbine, (Figure 2) ont montré qu'il existe une proportionnalité entre la vitesse de circulation  $U_c$  et la vitesse d'agitation  $N$ .

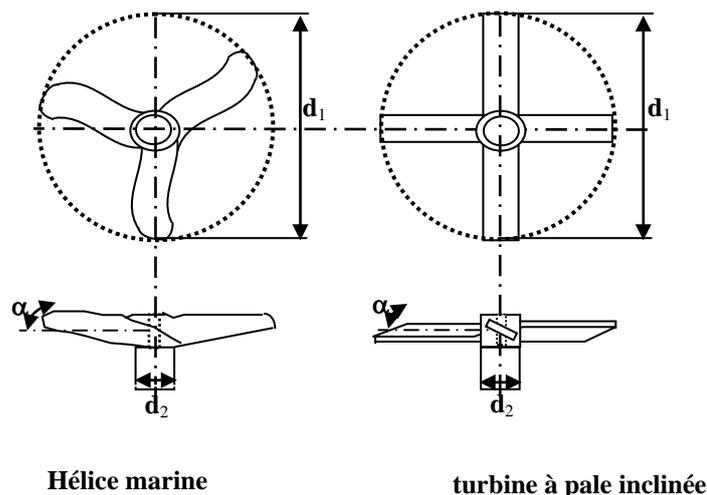
Cette vitesse de circulation est définie expérimentalement par :

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

Avec :  $L_t$  : longueur moyenne du réacteur,

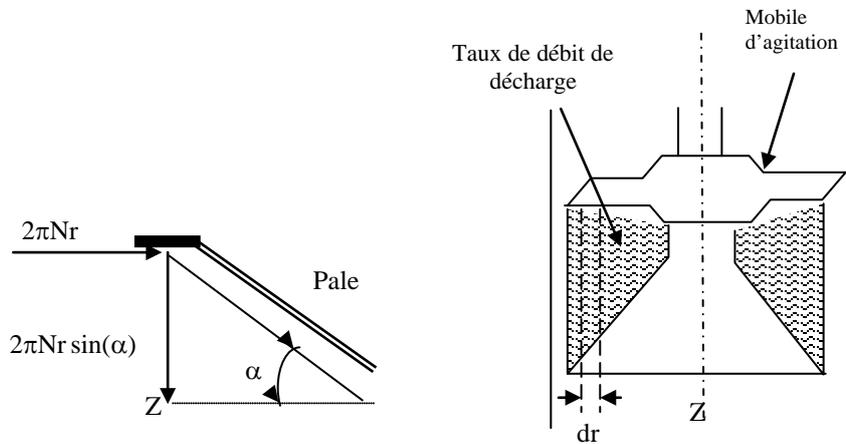
$U_c$  : Vitesse moyenne de circulation,

$t_c$  : étant le temps nécessaire à un élément fluide pour effectuer une circulation dans le réacteur.



**Fig. 2 : Schéma de deux mobiles d'agitation de type turbine à pales inclinées et hélice marine.**

SATO et Coll.[2] ont été parmi les premiers à s'intéresser à ce facteur de proportionnalité et ceci en prédiction de la vitesse de circulation, se basant sur le modèle de débit de charge (figure 3).



**Fig. 3 : Schéma représentatif caractérisant le débit de décharge engendré par un mobile d'agitation dans un réacteur à boucle.**

Comme le montre cette figure la vitesse tangentielle entre la pale et le fluide est égale à la vitesse au niveau de l'agitateur et est définie par :

$$U_t = 2\pi r N \quad (2)$$

Avec :

N : Vitesse d'agitation.

En supposant que c'est la vitesse axiale  $U_z$  qui prédomine pour de faibles angles d'inclinaison de la pale on aura :

$$U_z = 2\pi r \cdot N \cdot \sin\varphi \quad (3)$$

Avec :

r : rayon du mobile d'agitation.

$\varphi$  : angle d'inclinaison des pales du mobile d'agitation.

Par suite on définit le débit de décharge engendré par l'agitateur par :

$$Q = \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r N (\sin \varphi) 2\pi r dr \quad (4)$$

Sachant que la rotation de l'agitateur crée un débit de circulation Q, d'où :

$$U_z = \frac{4\pi}{3} \frac{r_1^3 - r_2^3}{r_t^2} N \sin \varphi \quad (5)$$

Pour comparer la vitesse expérimentale et calculée, SATO et Coll.[2] proposent de représenter le rapport de  $U_z$  calculée et expérimentale en fonction du nombre de Reynolds de circulation ,ceci a permis de corriger l'écart existant entre les deux valeurs par l'équation :

$$U_z^* = 0.744 U_z \frac{Re_c^{0.7}}{Re_c^{0.7} + 250} \left( \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_t^2} \right)^{-0.6} \quad (6)$$

$r_t$  : rayon intérieur de la section du réacteur à boucle.

Ces vitesses présentent un écart d'environ 5% par rapport aux valeurs expérimentales sauf pour le cas des mobiles d'agitation dont l'angle est égal à 60°, ceci pouvant être du au fait que c'est la vitesse tangentielle qui prédomine et non la vitesse axiale. Ils ont aussi montré que la présence de chicane dont la largeur est comprise entre 15 et 20mm n'a aucune influence sur la vitesse de circulation.

Se référant toujours sur le modèle de débit de décharge BELLEVILLE et Coll.[11] proposent l'équation suivante pour corriger l'écart :

$$U_{\text{exp}} = U'_{\text{cal}} \left[ 1 - N^{-0.246} \left( \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_t^2} \right)^{1.57} \right] \quad (7)$$

L'écart dans ce cas est de 4%.

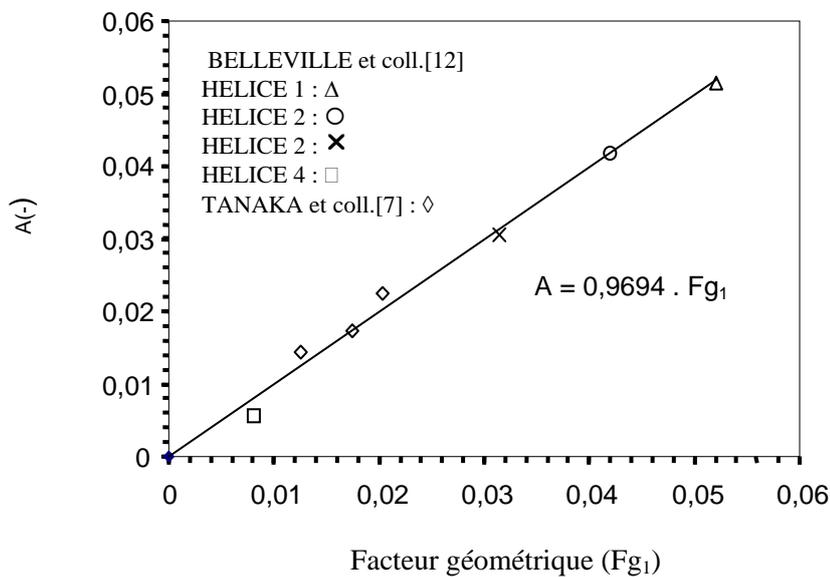
Ces mêmes auteurs ont effectué une autre étude [12] qui a permis de mettre en évidence deux approches permettant de représenter avec une bonne précision l'évolution de la vitesse de circulation en fonction de la vitesse d'agitation d'une hélice marine dans un réacteur torique. Ils proposent deux corrélations dans lesquelles les deux paramètres suscités sont reliés linéairement et dont la constante de proportionnalité (K) est indépendante des grandeurs géométriques du réacteur et du mobile d'agitation.

La première relation est obtenue à partir des équations classiques établies pour les cuves agitées « approche classique » (figure 4).

$$U_c = K F_{g1} N = A \cdot N \quad (8)$$

Avec :

$$F_{g1} = \frac{d_1^2}{d_t} \operatorname{tg} \varphi \quad (9)$$

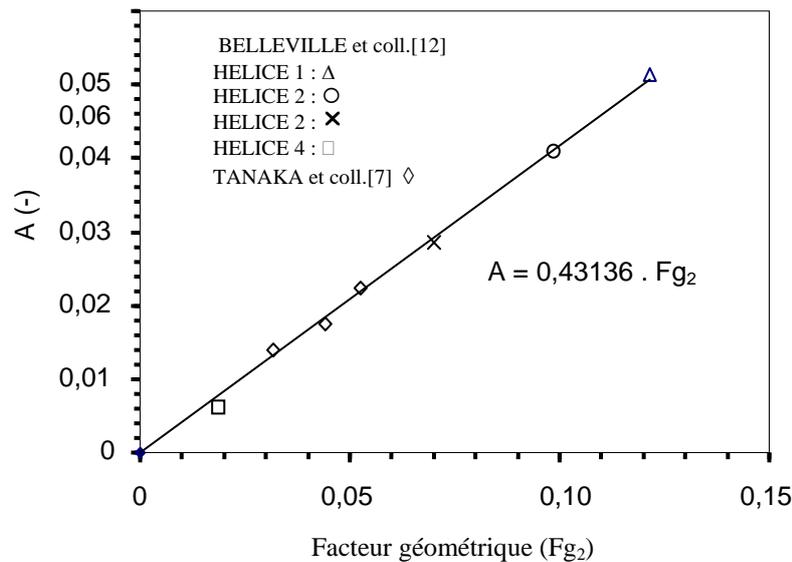


**Fig. 4 : Corrélation des résultats de l'approche « classique »[12]**

La seconde relation permet d'intégrer un nouveau facteur géométrique plus spécifique à une géométrie toroïdale tenant compte du rapport entre la surface balayée par les pales de l'hélice et la section de la veine fluide « approche spécifique » (figure 5).

$$U_c = K F_{g2} N \quad (10)$$

$$F_{g2} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \operatorname{tg} \varphi R_t \quad (11)$$



**Fig. 5 : Corrélation des résultats de l'approche « spécifique » [12].**

Il semble donc en conclusion que grâce à une approche plus spécifique on puisse définir à la fois une constante et un facteur géométrique qui caractérisent de manière satisfaisante le système d'agitation hélice marine et le tore .

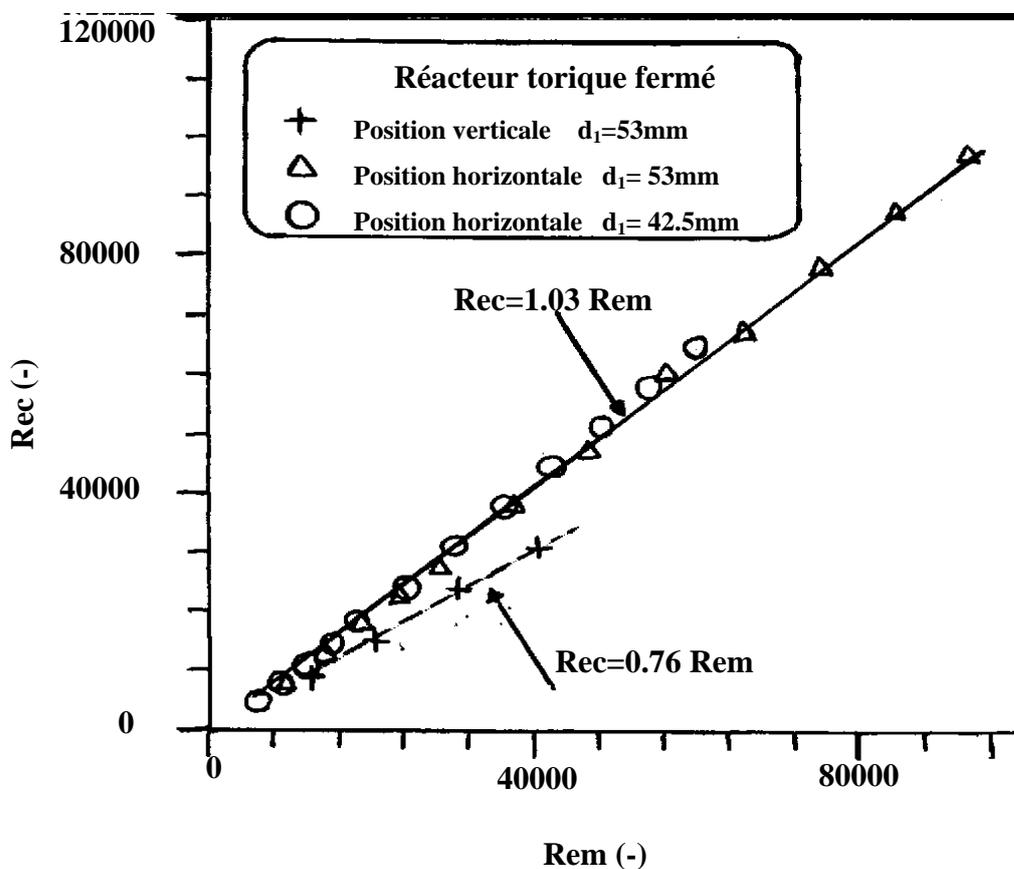
Ceci est confirmé par comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par TANAKA et Coll.[7] dans une configuration similaire avec hélice dont l'angle d'inclinaison varie de 30 à 45°. NOURI [14] a constaté qu'à partir d'un nombre de Reynolds de mélange (Rem) supérieur à 4000, la vitesse moyenne de circulation dans les différents réacteurs à boucle varie linéairement en fonction de Rem . Ces résultats sont similaires à ceux de SATO et Coll.[2], HOSOGAI et Coll.[10] et TANAKA et Coll.[7].

Pour un nombre de Reynolds de mélange donné, la vitesse moyenne de circulation semble être indépendante du diamètre du mobile d'agitation .

Pour Rem inférieur à 4000 l'étude de l'évolution de la vitesse moyenne de circulation a été réalisée avec des solutions plus visqueuses. Les résultats obtenus par NOURI [14] ont montré que cette vitesse varie linéairement avec Rem et d'une façon similaire quelque soit la viscosité de la solution utilisée. D'autre part, pour une vitesse d'agitation donnée, la vitesse moyenne de circulation dans le réacteur torique décroît au fur et à mesure que la viscosité de la solution augmente.

Une relation adimensionnelle a été établie entre la vitesse moyenne de circulation et la vitesse d'agitation en introduisant les nombres de Reynolds d'écoulement et de mélange sur les différents réacteurs utilisés.

Aussi une étude comparative entre le réacteur torique fermé placé en position verticale et horizontale a été menée par NOURI [14] (Figure 6), il ressort de cette étude que la position du réacteur influe sur la variation du nombre de Reynolds (**Rec**) en fonction de (**Rem**) et l'écart observé est d'autant plus important que le nombre de (**Rem**) augmente.



**Fig. 6 : Variation du nombre de Reynolds d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de mélange : influence de la position du réacteur torique fermé [14].**

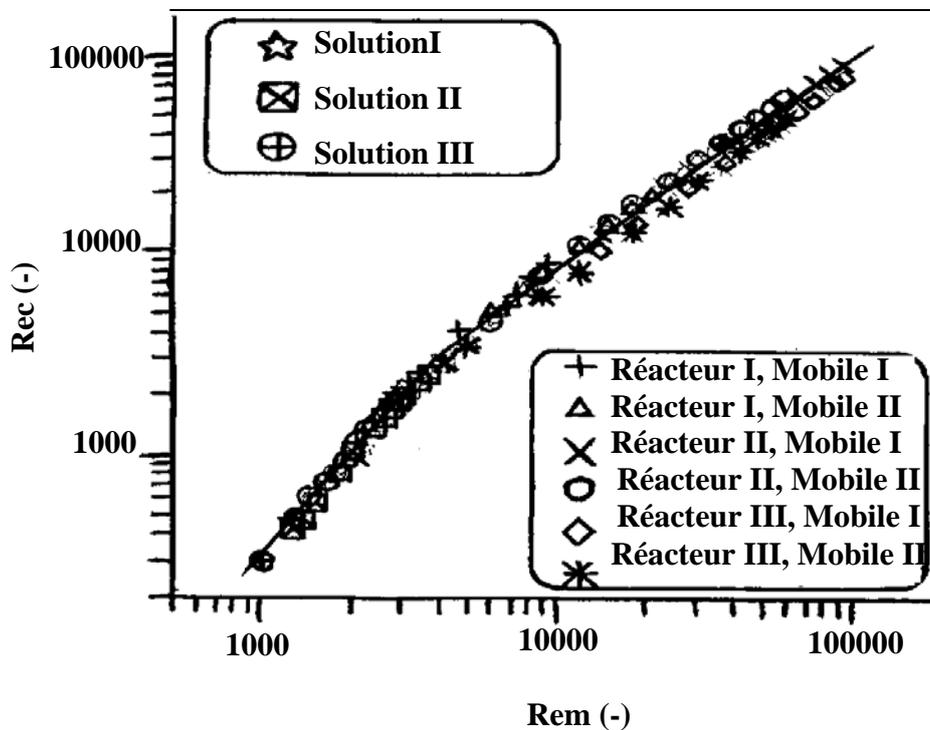
L'étude effectuée sur un réacteur torique continu a permis de constater que la variation du débit d'entrée n'a pratiquement aucune influence sur le temps moyen de circulation et par conséquent les vitesses de circulation sont indépendantes du débit d'entrée.

La représentation de Reynolds d'écoulement (Rec) en fonction de Reynolds de mélange (Rem) a permis de mettre en évidence l'existence d'une zone de transition (Figure 7) par conséquent nous avons deux lois qui régissent cette variation :

$$\text{Rem} > 4000 - 6000 \quad \text{Rec} = 1.3 \left[ \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \right]^{0.025} (\sin \varphi) \text{Rem.} \quad (12)$$

$$\text{Rem} < 4000 - 6000 \quad \text{Rec} = 0.004 \left[ \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \right]^{0.025} (\sin \varphi) \text{Rem}^{1.67} \quad (13)$$

Ces corrélations permettent d'évaluer par conséquent  $U_c$  en fonction de  $N$  quelques soient les caractéristiques géométriques du réacteur utilisé .



**Fig. 7: Variation du nombre de Reynolds d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de mélange dans différents réacteurs à boucle et pour différentes solutions visqueuses [14].**

TANAKA et Coll.[7] et HOSOGAI et Coll.[10] ont caractérisé l'écoulement dans le réacteur à boucle de forme torique en fonction des conditions d'agitation par une corrélation donnée par l'équation suivante :

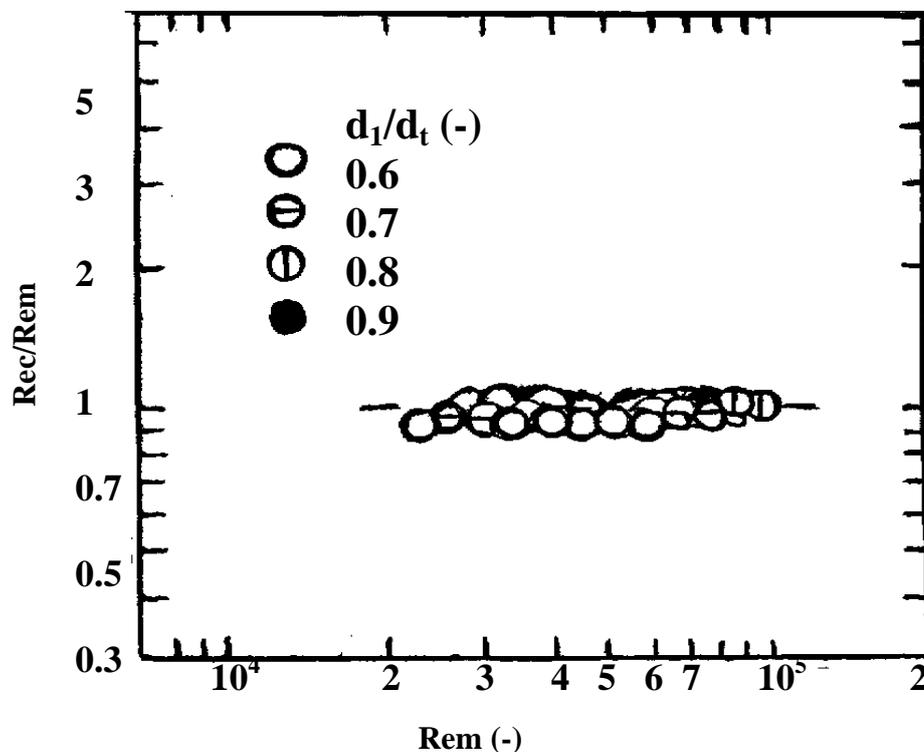
$$\frac{Rec}{Rem} = \left( \frac{c_1}{Rem^{c_2}} + c_3 \right)^{-1} \quad (14)$$

$c_1, c_2, c_3$  sont des coefficients qui dépendent du type d'agitateur.

La représentation graphique du rapport de  $(Rec/Rem)$  en fonction de  $Rem$  a montré d'après, HOSOGAI et Coll.[10], (figure 8) que ce rapport tend vers 1 pour  $2 \cdot 10^4 \leq Rem \leq 10^5$  dans le cas des turbines de même angle d'inclinaison mais de diamètre différent.

**TABLEAU 1 : Caractéristiques géométriques des turbines utilisés par [10].**

mobile	$d_1$ (mm)	$\phi$ (degré)	$d_1/d_t$ (-)
turbine	30	45	0.6
turbine	35	45	0.7
turbine	40	45	0.8
turbine	45	45	0.9



**Fig. 8 : Dépendance des conditions d'écoulement en fonction des caractéristiques d'agitation [10]**

TANAKA et Coll.[7] (figure 9) constatent que ce même rapport dépend de l'angle d'inclinaison des pales et du type d'agitateur utilisé et qu'à partir d'un Rem supérieur à  $1.5 \cdot 10^4$  ce rapport tend vers une constante. Ils constatent que l'écart maximal entre les valeurs calculées par l'équation n°14 et expérimentales n'excède pas 9.6%.

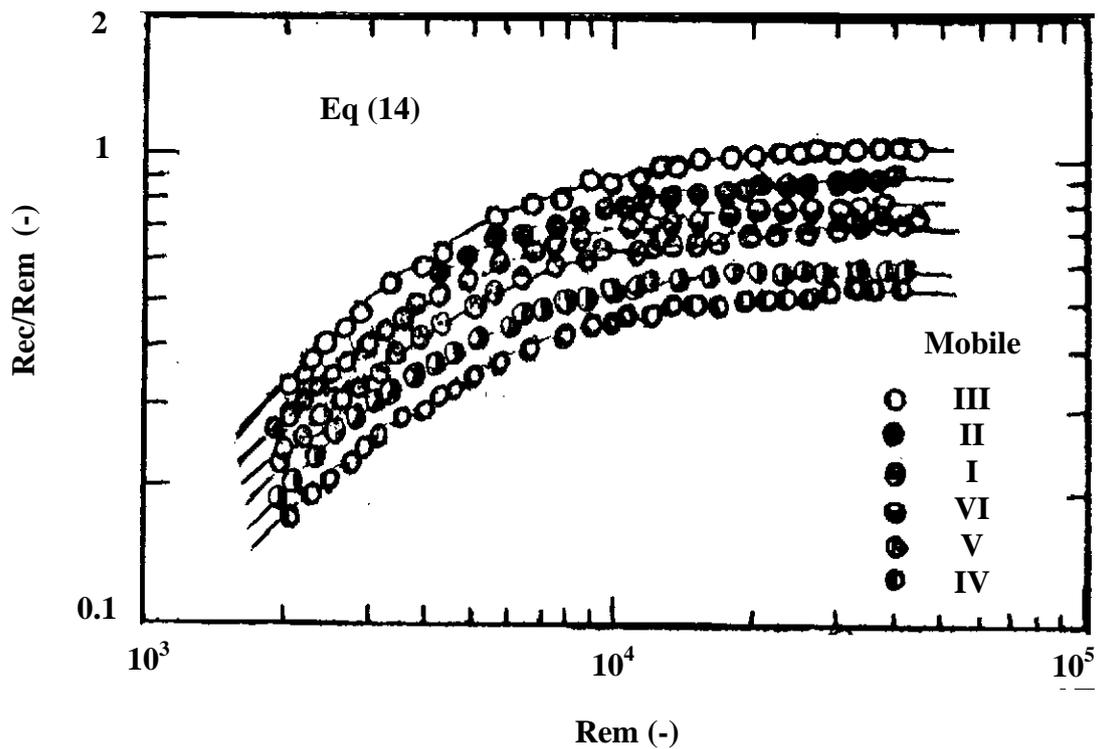
**TABLEAU 2 : Les différents mobiles d'agitation utilisés par [7]**

N°	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	φ (degré)
<b>I</b>	3,2	1,4	30
<b>II</b>	3,2	1,4	40
<b>III</b>	3,2	1,4	45

Hélices marines

N°	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	φ (degré)
<b>IV</b>	3,2	1,4	30
<b>V</b>	3,2	1,4	40
<b>VI</b>	3,2	1,4	45

Turbine à pale inclinée



**Fig. 9 : Variation du rapport Rec/Rem en fonction du nombre de Reynolds de mélange [7].**

L'hélice marine engendre une vitesse de circulation plus importante que la turbine et pour différents types d'agitateur l'angle d'inclinaison le plus élevé donne de grandes vitesses.

KHALID [16] a mis en évidence l'efficacité du mélange radial et trouve que l'évolution de la vitesse de circulation en fonction de la vitesse d'agitation déterminée par la méthode électrochimique est identique à celle obtenue par la méthode conductimétrique. Il en découle une corrélation liant ces deux grandeurs pour le réacteur de forme rectangulaire, définie par :

$$U_c = K N \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \operatorname{tg}\varphi \quad (15)$$

Ces résultats ont été comparés à ceux d'un réacteur de forme torique et pour lequel la corrélation proposée est la suivante :

$$U_c = 0.06 N \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \operatorname{tg}\varphi \quad (16)$$

Le résultat de cette comparaison montre que jusqu'à  $N=800\text{tr/mn}$  la géométrie du tore n'a que peu d'influence sur la circulation du fluide et qu'au delà de celle-ci, une légère divergence entre les résultats et la corrélation est constatée.

Les résultats expérimentaux corrélés sous forme adimensionnelle donnent :

$$\frac{\operatorname{Rec}}{\operatorname{Rem}} = \left( 1 + \frac{c}{\operatorname{Rem}^{0.7}} \right)^{-1} \quad (17)$$

Ce rapport demeure constant pour  $2 \cdot 10^4 < \operatorname{Rem} < 10^5$ .

### III-2- ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE LA VITESSE DE CIRCULATION

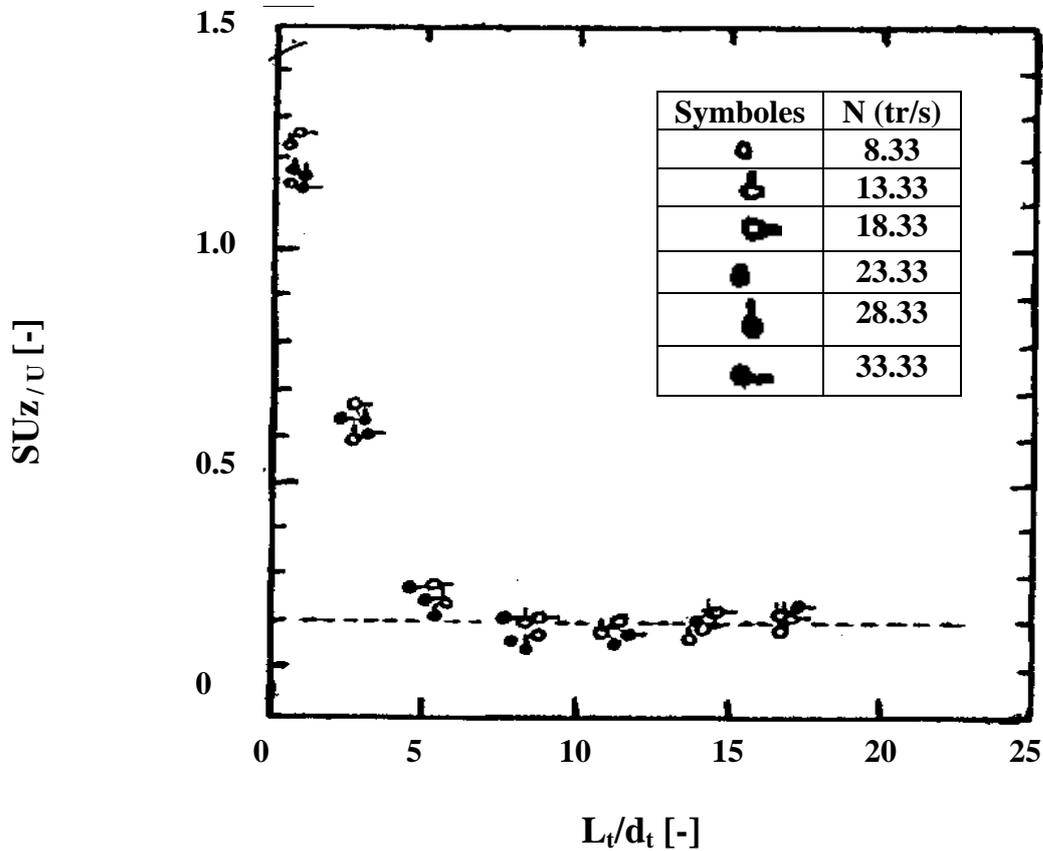
La connaissance de la distribution des vitesses dans les réacteurs à boucle donne d'importantes informations pour la caractérisation du mélange et de l'écoulement.

TANAKA et Coll.[7] ont mesuré cette distribution dans le réacteur torique en le divisant en sept sections, dans chacune d'elles le nombre de mesure effectués étant de 30 points. Ils trouvent que dans toute section la vitesse dans la région externe est plus grande que celle dans la région interne, ce résultat est similaire à celui de SATO et Coll.[2].

Dans le but de représenter l'évolution de la distribution de vitesses, ils ont introduit l'écart standard de la distribution de vitesse calculée à partir de :

$$\frac{\delta U_z}{U_c} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{U_i}{U_c} - n \left( \frac{\bar{U}_i}{U_c} \right) \right)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (18)$$

La représentation de  $\delta U_z/U$  fonction de la distance par rapport au mobile d'agitation, (Figure 10) montre que cette déviation pour toute vitesse d'agitation est plus importante juste en aval de l'agitateur et diminue brusquement pour atteindre enfin une valeur constante pour  $(L_t/d_t)=10$ .



**Fig. 10 : Variation de la déviation standard de la vitesse de circulation [7].**

SATO et Coll.[2] dans cette étude ont évalué la distribution de vitesse axiale et tangentielle (figure 11) à l'aide d'un tube de pitot dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire .

Ils ont examiné l'influence de la géométrie du mobile , de la vitesse d'agitation et de la présence de chicane sur cette distribution.

L'analyse des résultats a permis de faire les constatations suivantes :

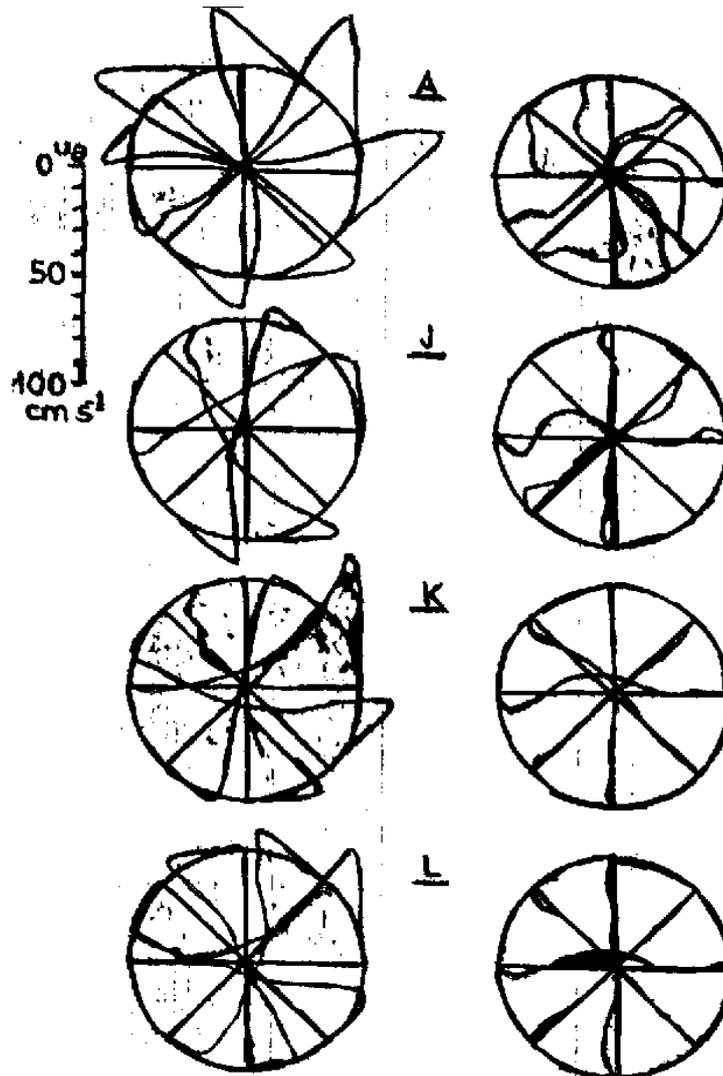
**- absence de chicane**

L'écoulement est caractérisé par une composante de vitesse tangentielle qui a tendance à s'atténuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne du mobile (figure11) . Par ailleurs l'intensité de cette dernière croit avec l'augmentation de la vitesse d'agitation et l'angle d'inclinaison des pales .

**- présence de chicane**

La composante de la vitesse tangentielle est brusquement atténuée, par ailleurs, la distribution de vitesse axiale est indépendante de l'agitateur et de la vitesse d'agitation.

Turbine à pale inclinée	
$N=20 \text{ s}^{-1}$	$N=20 \text{ s}^{-1}$
Sans chicanes	Avec chicanes ( $W_b=15 \text{ mm}$ )



**Fig. 11 : Variation de la vitesse tangentielle dans les différentes sections du réacteur à boucle [2].**

Le point A correspond à la position située juste en aval du mobile d'agitation, J est un point situé à la sortie d'un coude, K et L sont deux points situés dans la partie droite du tore.

### III-3- ETUDE DE MELANGE

Connaissant l'importance de la qualité de mélange lors de la mise en œuvre d'une transformation chimique ou biologique, on a recourt souvent au temps de mélange  $t_m$  pour caractériser des processus de mélange dans les bioréacteurs. Ce temps est défini comme étant l'intervalle de temps s'écoulant entre l'injection d'un traceur et sa répartition sur tout l'espace réactionnel jusqu'à un degré d'homogénéité donné.

BELLEVILLE et Coll.[11] ont choisi les critères adimensionnels ( $t_m/t_c$ ) et le nombre de Reynolds pour caractériser ce mélange. Ils trouvent que pour  $Rem > 5000$  la variation de ( $t_m/t_c$ ) en fonction de  $Rem$  est très peu significative et que ce rapport tend vers une constante égale à 15.

NOURI [14] a caractérisé le mélange et la qualité de mélange dans les réacteurs à boucle par deux approches :

1- **Temps de mélange spécifique ( $t_{ms}$ )** défini comme étant le rapport entre le temps de mélange et le volume du réacteur.

Il a constaté que pour un  $Rem$  donné, le degré de mélange souhaité est plus rapidement atteint dans les réacteurs à boucle de forme torique et aussi que  $t_{ms}$  dans les réacteurs à boucle varie suivant une loi de la forme :

$$t_{ms} = \alpha Rem^\beta \quad (19)$$

pour  $Rem = 5 \cdot 10^4$  le coefficient  $\beta$  est pratiquement identique pour tous les réacteurs utilisés.

2- **nombre de circulation  $N_\theta$**  tel que :

$$N_\theta = \frac{t_m}{t_c} \quad (20)$$

$N_\theta$  est le nombre de circulation nécessaire pour un degré d'homogénéisation. Il permet de caractériser le mélange global dans les différents réacteurs, il a été remarqué que quelque soit le nombre de  $Rem$  et les dimensions des mobiles d'agitation, le nombre de circulation reste constant et égal à 14, 15, 40 respectivement dans les réacteurs I, II, III.

**TABLEAU 3 : Caractéristiques géométriques des différents réacteurs à boucle[14]**

<b>réacteurs</b>	<b>Géométrie</b>	<b>V<sub>R</sub> (litre)</b>	<b>d<sub>t</sub> (mm)</b>	<b>L<sub>t</sub> (mm)</b>	<b>R<sub>t</sub> (mm)</b>	<b>L<sub>t</sub>/d<sub>t</sub></b>	<b>N<sub>θ</sub></b>
<b>I</b>	torique	2.1	55	884	135	16.07	14
<b>II</b>	torique	5.25	77	1130	18.	14.67	15
<b>III</b>	carrée	9.1	68	2500	415	36.76	40

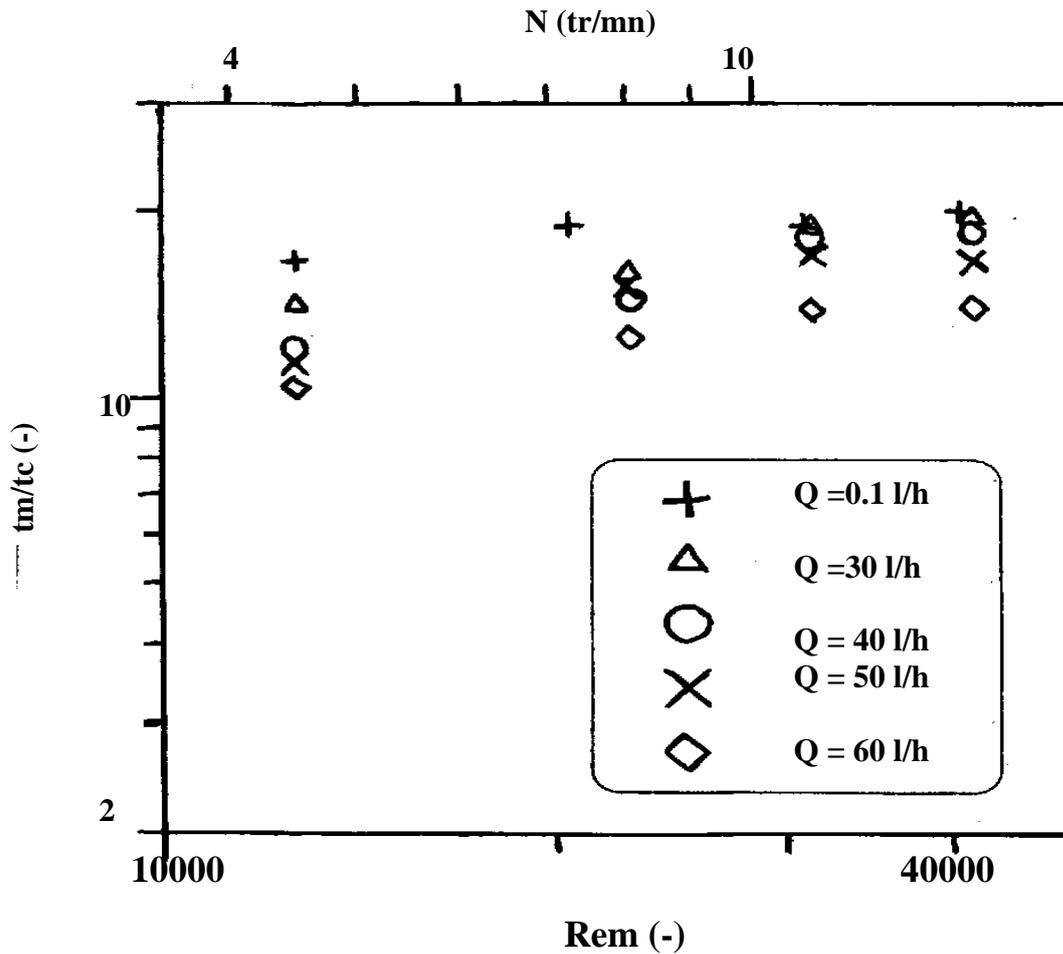
Pour un degré de mélange donné, les réacteurs toriques I et II nécessitent un nombre de circulation plus faible que le réacteur à boucle de forme carré (III), ceci pouvant être attribuer à l'influence des longueurs droites.

D'une part, il montre que le mélange global dans les réacteurs toriques est relativement indépendant du volume du réacteur, une relation empirique permettant de déterminer le nombre de circulation en fonction des caractéristiques géométriques des différents réacteurs a été proposé et l'écart relatif moyen avec les résultats expérimentaux n'excède pas 6%.

Par ailleurs il a étudié l'effet de la viscosité de la solution sur le mélange, il ressort que la variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation est indépendante de la viscosité de la solution.

D'autre part et pour les faibles nombres de Reynolds de mélange  $Re_m < 6000-7000$  la valeur de  $N_\theta$  semble dépendre de  $Re_m$  et au delà elle tend vers une valeur constante.

En comparant le temps de mélange, il ressort que ce dernier est plus important dans le réacteur torique en position verticale qu'en position horizontale. La transformation du réacteur torique fermé en réacteur continu entraîne des modifications des caractéristiques du mélange. D'après la figure 12 et à partir d'un  $Re_m$  d'environ 30000,  $N_\theta$  tend vers une valeur constante et décroît légèrement avec l'augmentation du débit dans le réacteur [14].



**Fig. 12 : variation du rapport  $t_m/t_c$  en fonction du nombre de Reynolds de mélange pour différentes valeurs du débit d'entrée dans le réacteur torique continu [14].**

Selon KHALID [16] les résultats des caractéristiques de mélange montrent que le rapport entre le temps de mélange et de circulation peut atteindre une valeur de 40 pour le réacteur à boucle de forme rectangulaire de 9.litre; par contre, il est de l'ordre de 13 pour le réacteur torique de volume 5.25litre.

Ces valeurs restent très grandes devant celles obtenues pour un réacteur agité qui est de l'ordre de 5.

### III-4- ETUDE DES PERTES DE CHARGE

La connaissance des pertes de charge dans le cas des réacteurs à boucle est importante pour l'évaluation de leurs performances et de la puissance dissipée.

SATO et Coll. [2] ont évalué les pertes de charge occasionnées dans les coudes et les longueurs droites et les ont comparées aux résultats expérimentaux .

Ils ont constaté que les pertes de charge dues aux deux contributions sont en bon accord avec celles calculées dans les parties droites et les coudes d'un réacteur à boucle de forme rectangulaire.

Le facteur de friction  $f$  dans les longueurs droites est déterminée par la formule de DREW'S :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.2 \log(\text{Rec} \sqrt{f}) + 1.2 \quad (21)$$

et le coefficient de perte de charge dans les coudes par la formule d'ITO :

$$\xi = 0,00241 \alpha \beta \text{Rec}^{-0.17} (R_t / r_t)^{0.84} \quad \text{pour } \text{Rec}(r_t / R_t)^2 > 91 \quad (22)$$

$$\alpha = 0,95 + 17.2 \left( \frac{R_t}{r_t} \right)^{-1.96} \quad \text{pour } \frac{R_t}{r_t} < 19.7 \quad (23)$$

$\beta$  : angle d'inclinaison du coude en degré

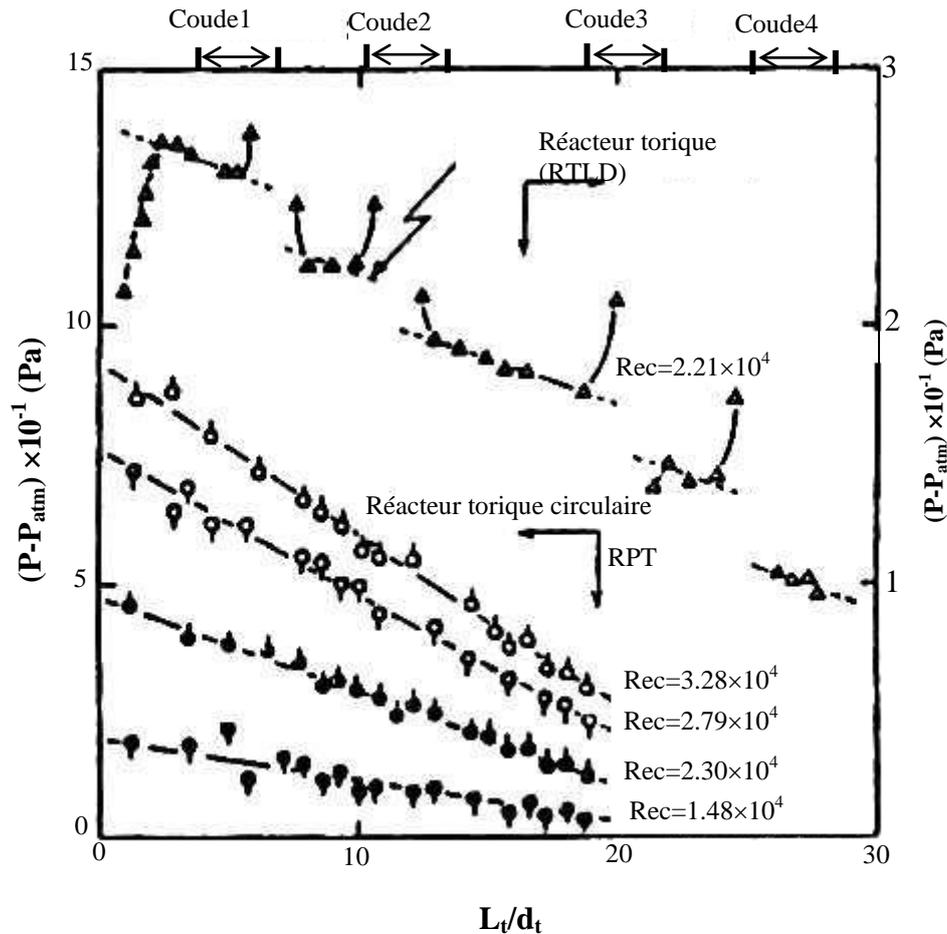
TANAKA et Coll.[7] ont montré que la chute de pression dans le cas d'un réacteur torique diminue en fonction de la distance par rapport au mobile d'agitation.

Les résultats obtenus (figure 13) montrent que les chutes de pression occasionnées dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire sont nettement importantes par rapport à celle dans un réacteur torique et notamment au niveau des coudes où cette chute est brusque.

Cette chute de pression est déterminée par l'équation de DARCY et WEISBACH :

$$\Delta P = f \left( \frac{L_t}{d_t} \right) \left( \frac{U_c^2 \rho}{2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{1}{f} = 2 \log(\text{Rec} \sqrt{f}) - 0.8 \quad (25)$$



**Fig. 13 : Variation de la chute de pression le long de la circonférence du réacteur [7]**

Après représentation des facteurs de friction en fonction de  $Rec$ , il a été observé que pour un  $Rec$  donné, ce facteur est plus important dans le cas du réacteur torique que dans des conduites à longueurs droites, l'écart étant de 20%.

NOURI [14] a étudié l'influence de la position du réacteur torique sur les pertes de charge au sein du réacteur. Il a constaté que pour une vitesse moyenne de circulation donnée, les pertes de charge sont plus importantes dans le réacteur torique en position verticale que celles en position horizontale.

### III-5- PUISSANCE CONSOMMEE PAR UN MOBILE D'AGITATION

La puissance consommée  $P$  par un mobile d'agitateur peut être considéré comme l'énergie par unité de temps nécessaire pour vaincre la résistance que le milieu agité oppose à la rotation des pales, pour cela on définit :

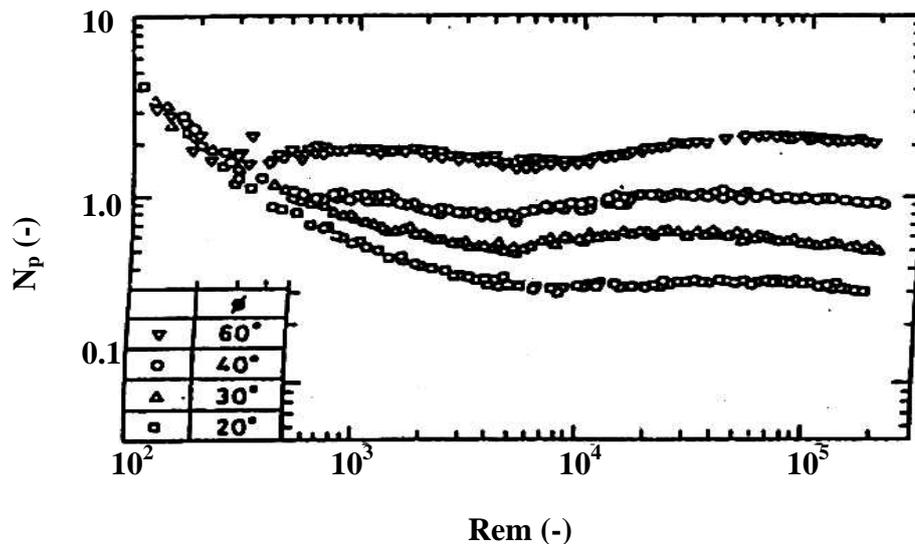
$$P = N_p \rho d_1^5 N^3 \quad (26)$$

$N_p$  : nombre de puissance.

$d_1$  : diamètre extérieur du mobile

$P$  : puissance consommée

MURAKAMI et Coll.[3] ont mesuré la puissance consommée dans un réacteur à boucle de forme rectangulaire. Ils ont constaté que la variation du nombre de puissance en fonction de  $Rem$  dans le réacteur torique sans chicane est similaire à celle observée dans un réacteur agité. La figure 14 montre que pour  $Rem$  inférieur à 200, la puissance consommée est très peu influencée par la variation de l'angle d'inclinaison de la pale de la turbine, contrairement au cas où  $Rem$  est supérieur à 200, on note une variation importante.



**Fig. 14 : Variation du nombre de puissance en fonction du nombre de Reynolds de mélange d'après [3]**

Pour un nombre de Reynolds compris entre  $10^4$  et  $10^5$ , le nombre de puissance est proportionnel à  $(\sin\phi)^2$ . La présence de chicanes a très peu d'influence sur le nombre de puissance, contrairement au réacteur agité où leur présence affecte l'écoulement et par conséquent la puissance consommée augmente. D'autre part, le mode de fonctionnement du réacteur (fermé ou continu) n'influe pas sur la puissance consommée.

TANAKA et Coll.[7] ont montré dans le cas d'un réacteur torique que, la dépendance entre  $N_p$  et  $Re_m$  est similaire à celle du réacteur agité et du réacteur à boucle de forme rectangulaire[2].

La représentation de  $N_p$  en fonction de  $\sin \phi$  (figure 15) montre que pour  $Re_m$  supérieur à  $10^4$ ,  $N_p$  est proportionnel à  $\sin \phi^{1.5}$  et que le nombre de puissance dans le cas d'un agitateur à pale inclinée est plus grand que celui obtenu pour une hélice marine. Par conséquent, ils recommandent pour le réacteur torique l'hélice marine.

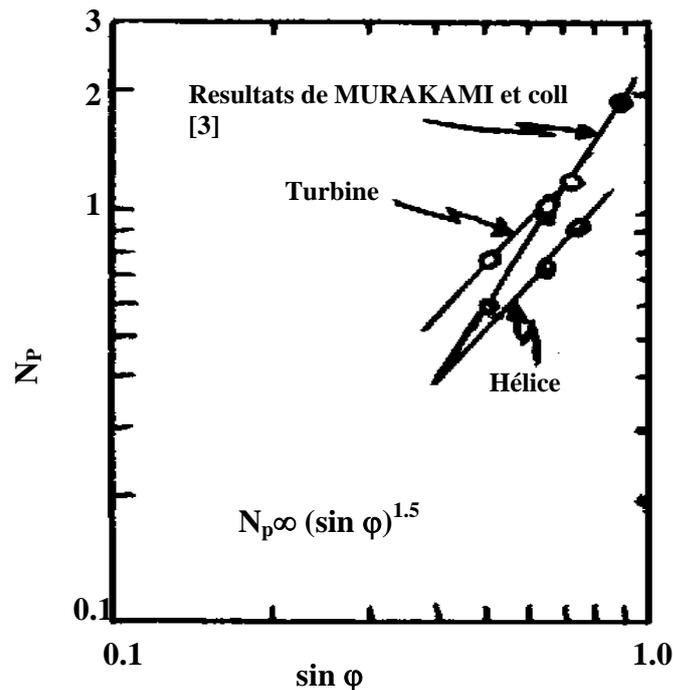


Fig. 15 : Variation du nombre de puissance en fonction de  $\sin \phi$  [7]

HOSOGAI et Coll.[10] ont montré que dans le cas d'un réacteur torique le nombre de puissance était proportionnel à  $N^3$ , ceci est en bon accord avec les résultats obtenus pour les réacteurs classiques agités.

Ils ont établi une relation empirique qui permet de calculer le taux de la dissipation d'énergie  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_p = \frac{8.8 \cdot 10^{-2} \cdot Rec^{-0.25} \cdot U_c^3}{d_t} \quad (27)$$

**RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX RESULTATS :**

AUTEURS	Géométrie du réacteur	Mobile utilisé	Principales corrélations
<b>BELLEVILLE et coll.[11]</b>	Réacteur torique R <sub>t</sub> =135mm, L <sub>t</sub> =850mm , d <sub>t</sub> =55mm, V <sub>R</sub> =2000cm <sup>3</sup>	Hélice marine	$\frac{U}{U'} = 1 - N^{-0.246} Fg^{1.57}$ avec $Fg = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2}$
<b>SATO et coll.[2]</b>	Réacteur de forme rectangulaire. R <sub>t</sub> =11.7cm, L <sub>t</sub> =280cm, D <sub>t</sub> =10cm, V <sub>R</sub> =22l	Turbine à pale inclinée Hélice marine	$\frac{U}{U'} = K_1 \frac{Rey^{0.7}}{250 + Rey^{0.7}}$ K <sub>1</sub> = constante
<b>HOSOGAI et coll.[10]</b>	Réacteur torique R <sub>t</sub> =160mm, dt=50mm, V <sub>R</sub> =2.3l	Turbine à pale inclinée	$\frac{Rec}{Rem} = \left( \frac{c_1}{Rem^{c_2}} + c_3 \right)^{-1}$ $\frac{Rec}{Rem} = 1$ , pour 2.10 <sup>4</sup> <Rem<10 <sup>5</sup>
<b>TANAKA et coll. [7]</b>	Réacteur torique dt=50mm, V <sub>R</sub> =2.3l	Hélice marine Turbine à pale inclinée	$\frac{Rec}{Rem} = \left( \frac{c_1}{Rem^{c_2}} + c_3 \right)^{-1}$ $\frac{Rec}{Rem} = c^{st}$ pour Rem>1.5 10 <sup>4</sup>
<b>MURAKAMI et coll. [3]</b>	Réacteur de forme rectangulaire R <sub>t</sub> =11.7cm, L <sub>t</sub> =280cm dt=10cm, V <sub>R</sub> =22l	Turbine à pale inclinée	Pour Rem=10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> N <sub>p</sub> =f (sinφ) <sup>2</sup> Pour réacteur agité N <sub>p</sub> =f (sin) <sup>0.5</sup> Turbine à 40° est recommandé
<b>NOURI [14]</b>	Réacteur torique V <sub>R</sub> =2.1l , d <sub>t</sub> =5.5cm V <sub>R</sub> =5.25l , d <sub>t</sub> =7.7cm Réacteur de forme rectangulaire V <sub>R</sub> =9.1l , d <sub>t</sub> =6.8cm	Hélice marine	N <sub>0</sub> =0.60(L <sub>t</sub> /d <sub>t</sub> ) <sup>1.17</sup> Rey=1.3.Fg.Rem pour Rem>4000-6000 Rec=4.10 <sup>-3</sup> Fg Rem <sup>1.67</sup> pour Rem< 4000-6000 $F_g = \left[ \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \right]^{0.025} \sin \phi$

<b>KHALID [16]</b>	Réacteur de forme rectangulaire $R_t=41,5\text{mm}$ , $d_t=68\text{mm}$ , $L_t=2.50\text{m}$ , $V_R =9.21$	Hélice marine	$Uc = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} \text{tg}\varphi N$ $\frac{Rec}{Rem} = \left(1 + \frac{c}{Rem^{0.7}}\right)^{-1}$ <p>c : dépend du type et de la géométrie de l'hélice  ce rapport tend vers une constante pour <math>210^4 &lt; Rem &lt; 10^5</math></p>
--------------------	---	---------------	---

## **IV – CONCLUSION**

A la lumière de ce chapitre, nous avons d'une part montré l'intérêt que présente le réacteur à boucle par les différents avantages et applications qu'il offre et d'autre part cette synthèse a permis d'orienter notre travail en dénombrant un certain nombre de paramètres et de facteurs importants ceci dans le but d'apporter une modeste contribution dans ce domaine. Ainsi, l'étude de l'influence de ces différents éléments sur l'écoulement et le mélange dans le réacteur torique fera l'objet du prochain chapitre.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NORWOOD. , D-D et al.,  
Japan patent , showa 37 - 10087, cité dans [2], (1962).
- [2] SATO Y., MURAKAMI Y.,  
« flow pattern , circulation velocity and pressure loss in loop reactor » ,  
J. Chem . Eng . Japan , 12, (6), 448-453, (1979).
- [3] MURAKAMI Y., HIROSE.,  
« Power consumption and pumping characteristics in a loop reactor » ,  
Ind . Eng . Chem .Process . Des . Dev, 21, 273-276, (1982).
- [4] LAEDERACH H. , WIDMER F.,  
« Le bioreacteur torique » , Informations chimie, (249), 157-160, (1984).
- [5] KREBSER U., MEYER H-P., FICHTER A.,  
« A comparison between the performance of continuously stirred-tank bioreactor and a torus bioreactor with respect to highly viscous culture broths » ,  
J. Chem . tech . biotechnol , 43, 107-116, (1988).
- [6] TANAKA M., O'SHIMA E . ,  
«Dispersing behaviour of droplets in suspension polymerisation of styrene in a loop reactor » , The canadian Journal of chem Eng , 66, 29-35, (1988).
- [7] TANAKA. M., SENDAI.T., HOSOGAI. K.,  
« Flowing characteristics in a circular loop reactor » , Chem . Eng . Res . Des, 67, 423-427, (1989).
- [8] DERYUAN. LE., KUO. J-F.,  
« Study on the continuous loop tubular reactor for emulsion polymerisation of styrene » ,  
Polymer Engineering and science, 30, (3), 187-192 , (1990).
- [9] DERYUAN. LE., KUO. J-F., wang. J-H.,  
« The performance of a continuous loop tubular reactor for emulsion polymerisation of styrene » ,  
Journal of chem Eng of japan , 23, (3), 290-296, (1990).
- [10] HOSOGAI. K., TANAKA. M.,  
« Study of suspension polymerisation of styrene with a circular loop reactor » ,  
Polymer Eng and science, 32, (6), 431-437, (1992).
- [11] BELLEVILLE. P., NOURI. L., LEGRANG. J.,  
« mixing characteristics in the torus reactor » ,  
Chem. Eng. Technol , 15, 282- 289, (1992).
- [12] BELLEVILLE. P., LEGRAND. J., BRUXELMANE. M.,  
« Etude de la vitesse de circulation dans un système agité en géométrie toroïdale » ,  
99- 10, (1994).

- [13] LEGRANG. J., GUEGUEN.J., BEROT.S ; POPINEAU.Y ; NOURIL ;  
« Acetylation of pea isolate in a torus micro reactor »,  
Bio and bioengineering , 53, (4), 410-414, (1997).
- [14] NOURI. L.,  
« Etude des performances du réacteur torique , Application à l'hydrolyse Enzymatique  
des protéines végétales »,  
Thèse de doctorat , Ecole centrale de Nantes – Université de Nantes , (1994).
- [15] NOURI. L., LEGRANG. J., POPINEAU.Y ; BELLEVILLE. P ;  
« Enzymatic hydrolysis of wheat proteins »  
Part I : Enzymatic kinetics and study of limited hydrolysis in a batch stirred reactor.  
Chem. Eng. Journal , 65, 187-194, (1997).
- [16] KHALID. A.,  
« Etude de l'écoulement généré par une hélice dans un réacteur de forme toroïdale »  
Thèse de doctorat , école centrale de Nantes – Université de Nantes, (1993).

*Chapitre II*  
*Etude Expérimentale*

## SOMMAIRE

I INTRODUCTION	44
II DISPOSITIF EXPERIMENTAL	44
II-1 REACTEUR TORIQUE	44
II-2 DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOURS	45
II-2-1 METHODE CONDUCTIMETRIQUE	46
II-2-2 DESCRIPTION DE LA SONDE CONDUCTIMETRIQUE	46
II-2-3 ETALONNAGE DE LA SONDE CONDUCTIMETRIQUE	48
III EFFICACITE DU MELANGE RADIAL	51
IV CARACTERISATION DE L'ECOULEMENT	52
V ETUDE DE LA VITESSE MOYENNE DE CIRCULATION	53
V-1 CORRELATION DES RESULTATS	55
VI REPRESENTATION ADIMENTIONNELLE DE LA VITESSE MOYENNE DE CIRCULATION EN FONCTION DE LA VITESSE D'AGITATION	60
VII ETUDE DU MELANGE	64
VII-1 VARIATION DU TEMPS DE MELANGE EN FONCTION DE LA VITESSE D'AGITATION	64
VII-2 CARACTERISATION DU MELANGE GLOBAL	65
CONCLUSION	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70
ANNEXES	61

## **RESUME**

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'écoulement et du mélange dans le réacteur torique par analyse des courbes de distribution des temps de séjours déterminées à l'aide de la méthode conductimétrique.

Dans cette partie on s'est d'abord intéressé à la variation de la vitesse de circulation  $U_c$  en fonction de la vitesse d'agitation  $N$ , c'est ainsi qu'une corrélation liant ces deux grandeurs est proposée en introduisant un facteur géométrique tenant compte des caractéristiques géométriques du mobile d'agitation et du réacteur.

On s'est aussi intéressé à la caractérisation globale du mélange à l'aide de deux paramètres adimensionnels : le nombre de circulation  $\theta$  et le produit  $N \cdot tm$  .

## I INTRODUCTION

Ce chapitre se base sur la caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique. La circulation du fluide est engendrée par la rotation d'un mobile d'agitation dans ce cas il s'agit d'hélice marine et de turbine à pale inclinée.

Une méthode basée sur la distribution des temps de séjours (DTS) est utilisée pour déterminer les paramètres relatifs à l'écoulement et au mélange.

En outre, ce travail permettra de proposer des corrélations reliant la vitesse de circulation aux conditions d'agitation.

## II DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### II-1 REACTEUR TORIQUE

Le réacteur torique conçu et réalisé dans le cadre de cette étude, est constitué de huit coudes en PVC à 45° chacun sans éléments droits (Figure 1), les quatre quadrants du tore sont reliés par des brides formant ainsi un espace réactionnel fermé. Les caractéristiques du réacteur sont données dans le tableau N°1. La circulation du fluide à l'intérieur est assurée par un mobile d'agitation à débit axial de type hélice marine à trois pales et de turbine à pale inclinée. La rotation du mobile est assurée par un moteur de type Heidolph à vitesse variable.

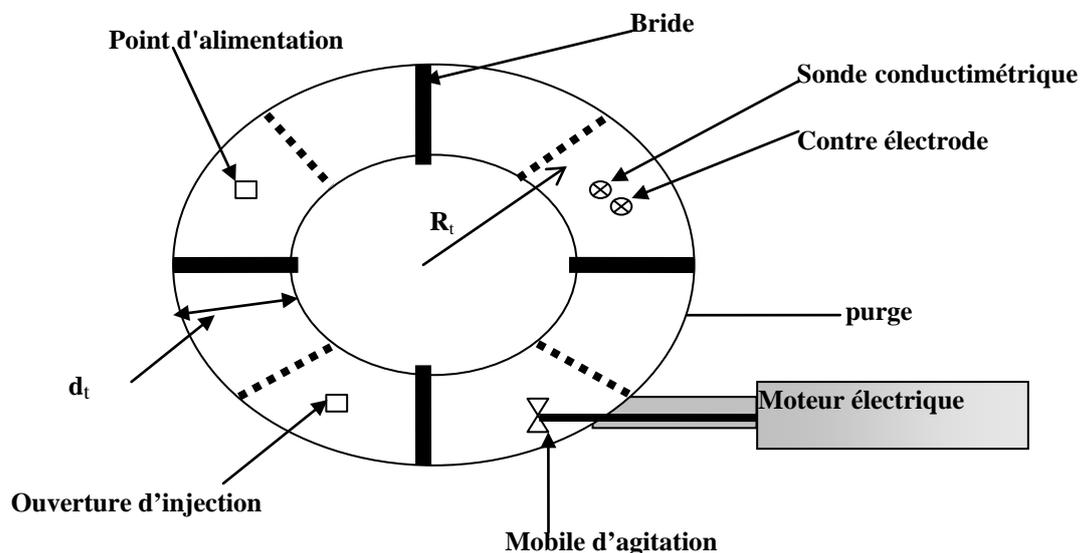


Fig. 1 : Schéma représentatif du réacteur torique .

**TABLEAU N°1 : Caractéristiques du réacteur torique.**

Diamètre de la section du réacteur $d_t$ (mm)	Longueur moyenne du réacteur $L_t$ (mm)	Rayon de courbure du réacteur $R_t$ (mm)	Volume du réacteur $V_R(l)$
90	1380	220	8

**TABLEAU N°2 : Caractéristiques des mobiles d'agitation.**

Mobiles	Géométrie	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$\phi$ (degré)
<b>I</b>	Hélice marine	25	12	30
<b>II</b>	Hélice marine	50	12	30
<b>III</b>	Hélice marine	75	12	30
<b>IV</b>	Hélice marine	50	12	45
<b>V</b>	Turbine	50	15	45
<b>VI</b>	turbine usinée	55	15	45°

## II-2 DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOURS (DTS)

La description du fonctionnement d'un réacteur peut s'appuyer sur la notion de réacteur idéal, qui fait appel aux deux états limites de macro-mélange correspondant aux deux modèles d'écoulements suivants [1] :

- L'écoulement piston, où toutes les molécules ont le même temps de séjour.
- L'écoulement en mélange parfait, où les temps de séjours sont quelconques et où la composition 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 et qui peuvent s'écarter notablement du temps de séjour moyen. Il existe donc une distribution des temps de séjours (D.T.S) qui est une caractéristique de l'état de macro mélange du fluide dans le système.

La D.T.S d'un fluide peut-être atteinte expérimentalement par diverses techniques. Dans notre cas, l'étude de la D.T.S a été obtenue par la méthode des traceurs [2] qui consiste à marquer les molécules entrant dans le réacteur, et de les détecter à la sortie.

Pour cela, on utilise un traceur ayant les mêmes propriétés hydrodynamiques que le fluide mais décelable par une propriété physique caractéristique telle que la conductivité électrique, thermique etc.

L'injection du traceur à l'entrée du réacteur est de type impulsion et en très faible quantité, de manière à ne pas perturber le régime d'écoulement. A la sortie, on examine la concentration du traceur par un détecteur ayant un temps de réponse négligeable devant le temps de séjours dans le réacteur, dans ce cas une micro détection des fluctuations de concentration dans le réacteur s'avère nécessaire.

Pour la détermination de la DTS, on a choisi la méthode la plus couramment utilisée [3,4,5], qui est la méthode conductimétrique car elle requiert des moyens et des capteurs très simples.

### **II-2-1 METHODE CONDUCTIMETRIQUE**

La méthode conductimétrique est basée sur la mesure de la variation de la conductivité électrique après y avoir injecté sous forme d'impulsion un traceur. La courbe donnant la conductivité en fonction du temps est une sinusoïde dans le cas des réacteurs à boucle dont la période est assimilée au temps de circulation dans le réacteur torique.

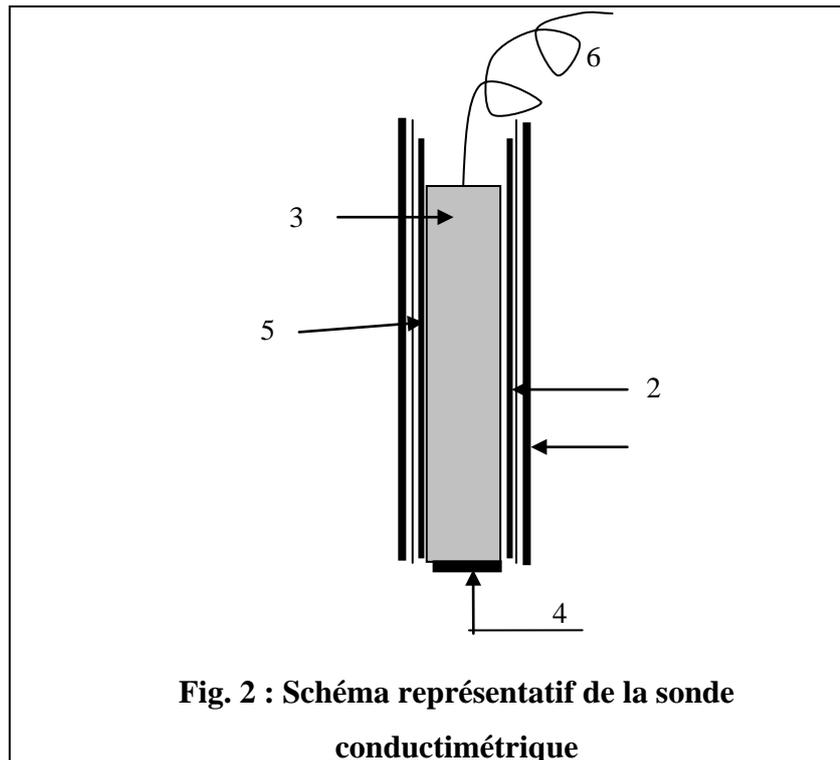
Afin de minimiser les perturbations de l'écoulement du fluide au sein du réacteur torique, la détermination de la DTS a été réalisée par utilisation de micro sonde conductimétrique. Ce type de micro sonde a déjà été décrite et employée par divers auteurs dont LAMB [6], MANNING [7] et TORREST [8].

### **II-2-2 DESCRIPTION DE LA SONDE CONDUCTIMETRIQUE**

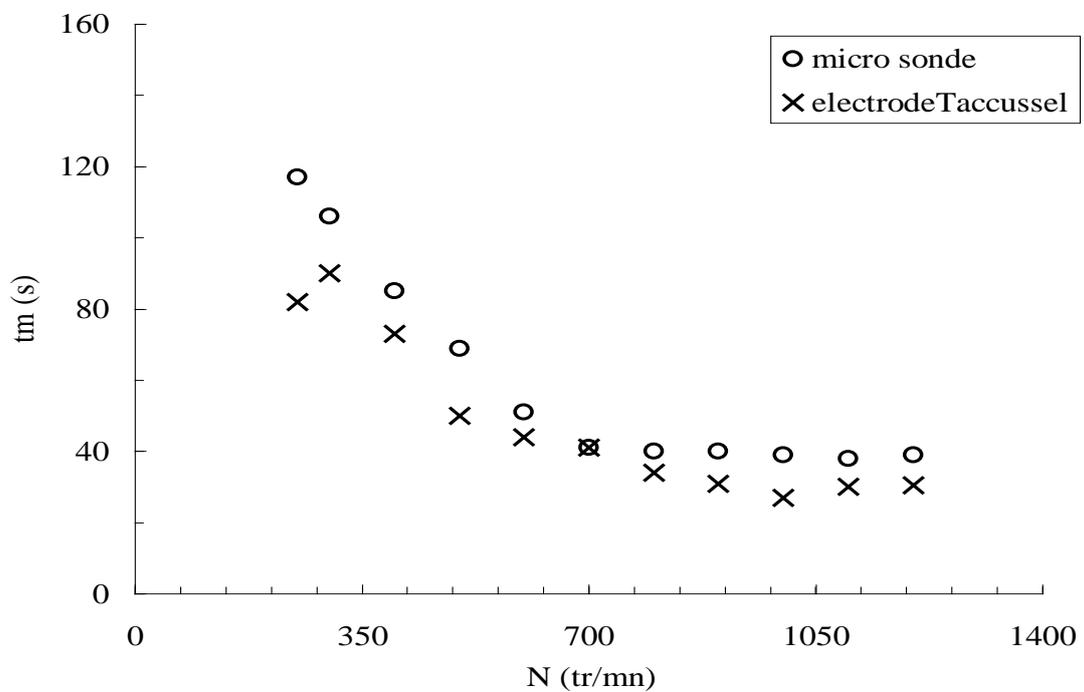
La micro sonde conductimétrique (Figure 2) est constituée par un fil de platine de 0,4mm de diamètre recouvert par un isolant électrique ensuite inséré dans une aiguille hypodermique en inox, la sonde est isolée électriquement par de la colle araldite et une gaine thermoretractable. A son extrémité supérieure on fixe par soudure un fil électrique au fil de platine et à l'autre bout, on sectionne perpendiculairement le fil à sa longueur maintenu actif uniquement sur sa section droite qui est recouverte de noir de platine.

La contre électrode est une plaque de nickel de 5cm<sup>2</sup> de surface située près de la sonde. L'ensemble (électrode et contre électrode) est reliée à un conductimètre de type CD 60 lui même connecté à un enregistreur ABB pour l'enregistrement de la courbe réponse du réacteur.

- 1- Gaine thermorétractable
- 2- Aiguille hypodermique
- 3- Fil de platine
- 4- section active
- 5-Araldite (colle)
- 6- fil électrique



L'analyse des courbes de la DTS permet l'évaluation de deux paramètres essentiels à savoir :  
Le temps de circulation et le temps de mélange (figure 3).



**Fig. 3 : courbe de distribution des temps de séjours**

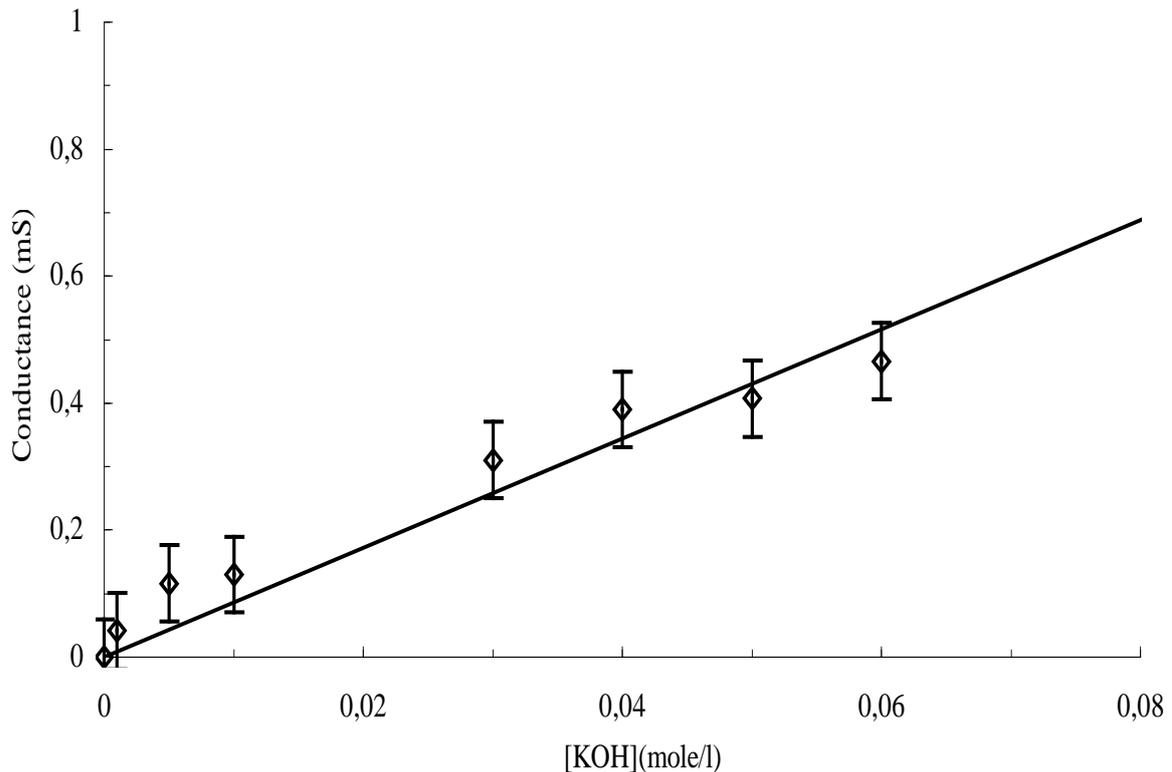
**Temps de circulation ( $t_c$ ) :** il correspond à la durée nécessaire à un élément fluide pour achever une circulation complète dans le réacteur. Expérimentalement il correspond à l'intervalle de temps entre deux pics successifs de concentration.

**Temps de mélange ( $t_m$ ) :** il est défini comme l'intervalle de temps entre l'injection du traceur et sa répartition sur tout l'espace réactionnel jusqu'à un degré d'homogénéisation choisi. En général, ce degré est de l'ordre de 99% telles que les variations de la concentration ne constituent plus que 1% de la valeur moyenne de la concentration.

### II-2-3 ETALONNAGE DE LA SONDE CONDUCTIMETRIQUE.

La courbe de calibration de la sonde est donnée par la variation de la conductance en fonction de la concentration de l'électrolyte à une fréquence de 62.5 HZ grace à un conductimetre de type CD 60.

La valeur de la conductance est mesurée pour six solutions aqueuses de KOH à différentes concentrations ( 0.001, 0.005, 0.01, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 M). Sur la figure 4 nous avons représenté la variation de la conductance en fonction de la concentration

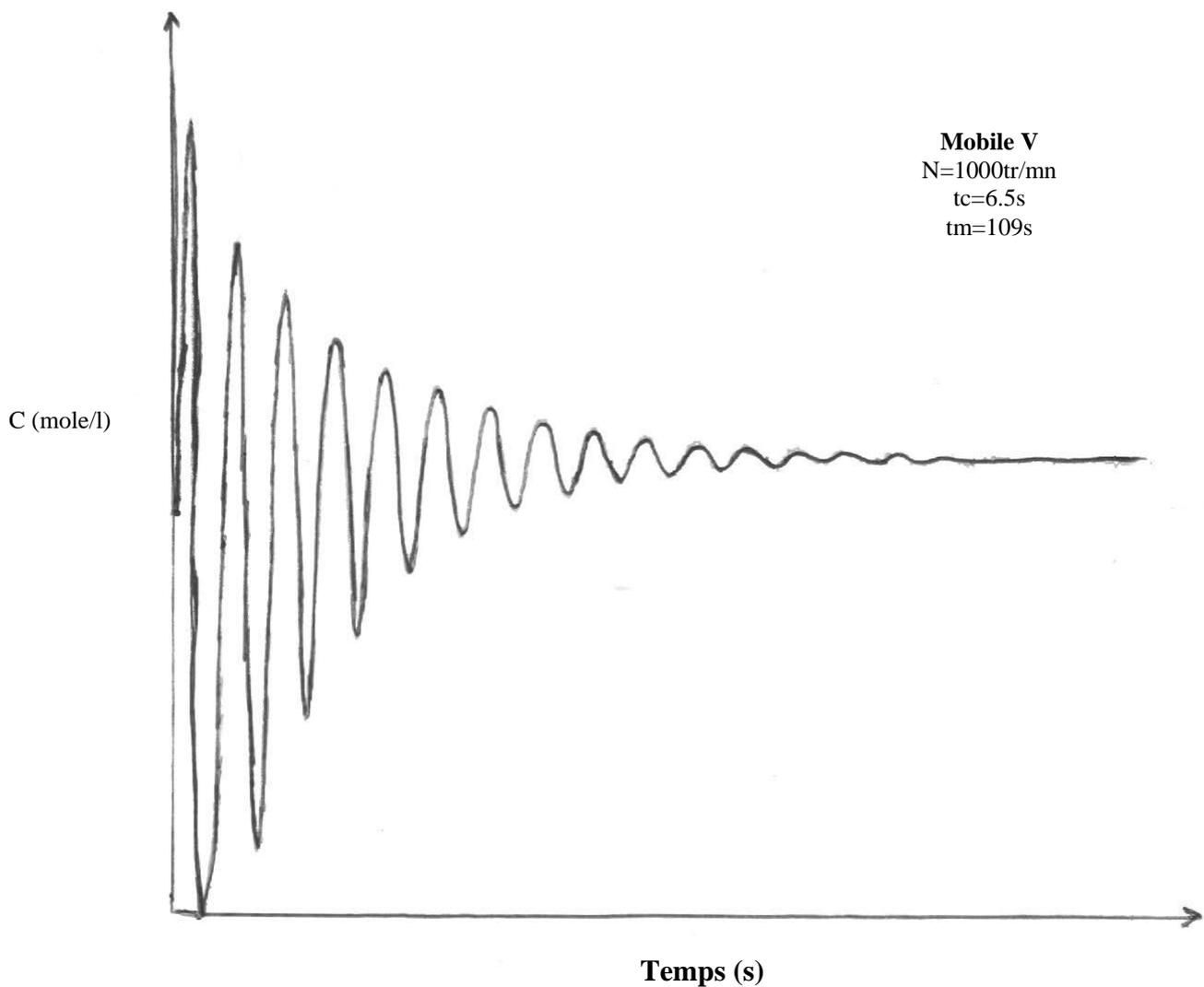


**Fig. 4 : Etalonnage de la sonde conductimétrique**

Nous constatons de cette dernière que sur la gamme de 0.001-0.06M la conductance varie linéairement en fonction de la concentration avec une précision de 6% d'écart. La reproductibilité de ce résultat a été vérifié (annexe II-1).

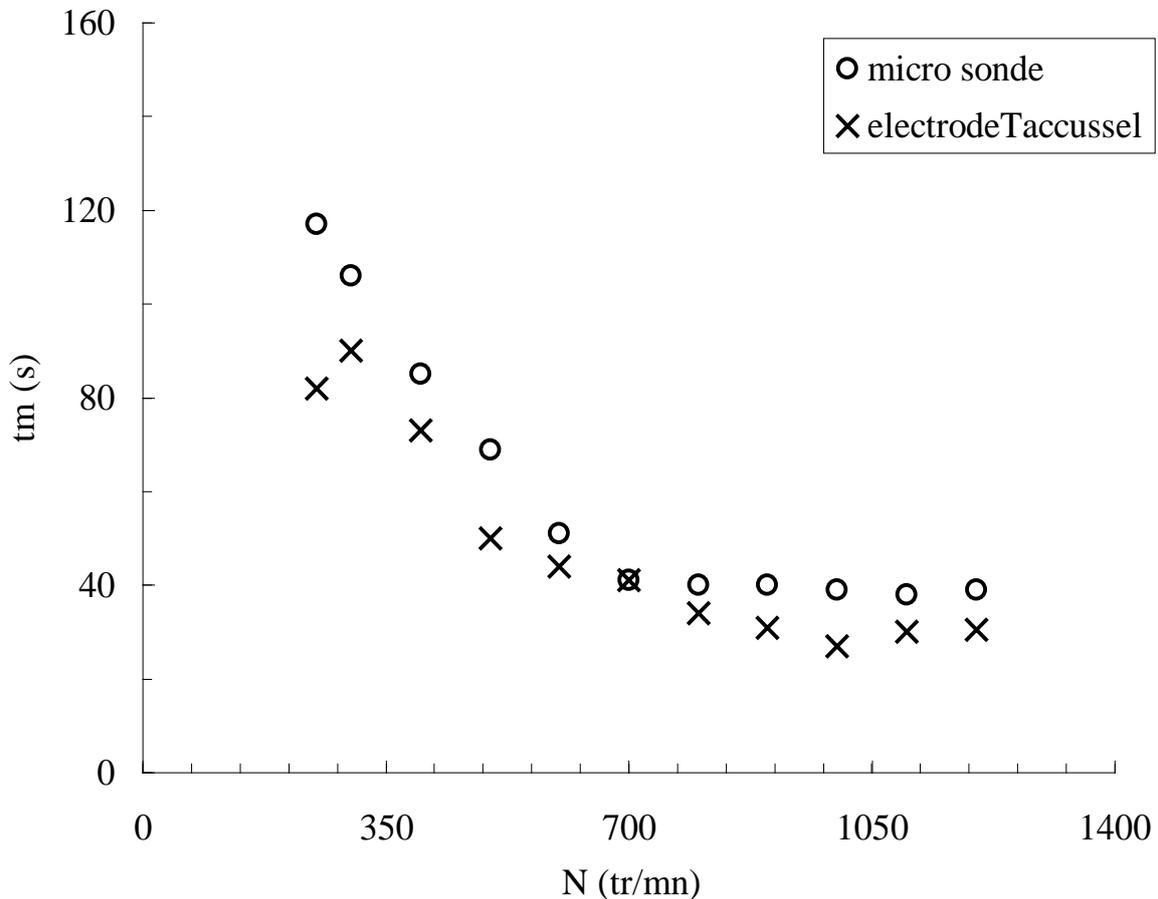
Pour cette étude, les courbes de la distribution de temps de séjours (DTS) sont obtenues après injection sous forme d'impulsion de l'hydroxyde de potassium comme traceur à une concentration de 15M. le volume du traceur injecté est de 2ml correspondant à un volume négligeable, environ 0.025% devant le volume total du réacteur (annexe II-2). Le choix de cette concentration est basée sur le fait qu'à cette valeur nos courbes de DTS sont bien exploitables

La courbe réponse présente des pics de concentration qui correspondent au passage du traceur devant la sonde à chaque circulation, un exemple de cette courbe expérimentale de DTS est donnée par la figure 5. Les autres courbes sont données en annexe II-3.



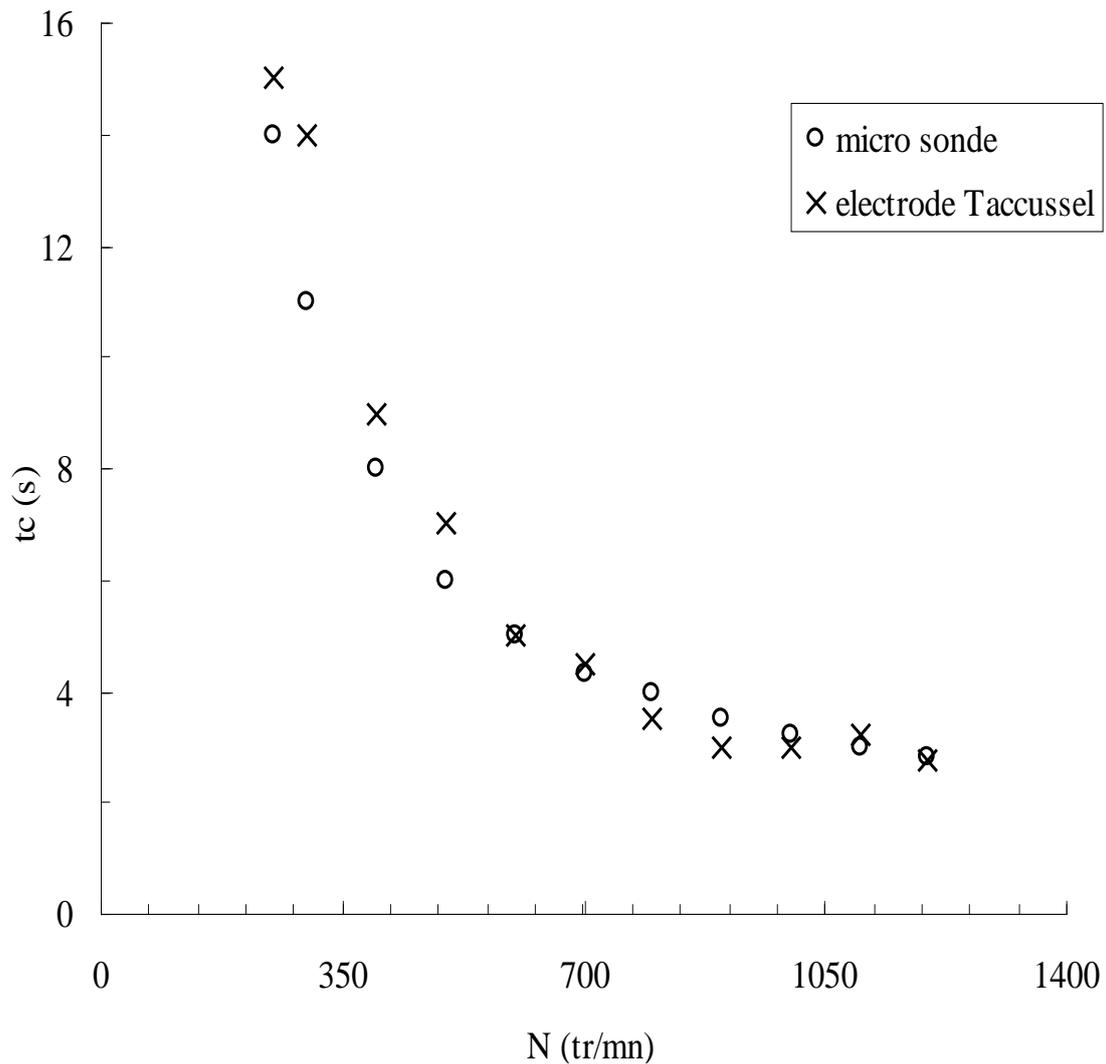
**Fig. 5 : Courbe expérimentale de DTS**

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de cette micro sonde, nous nous sommes proposées d'effectuer une série d'expérience avec la micro sonde conductimétrique et la sonde Taccussel, en opérant évidemment dans les mêmes conditions de travail et en employant le mobile d'agitation IV.



**Fig. 6: variation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation**

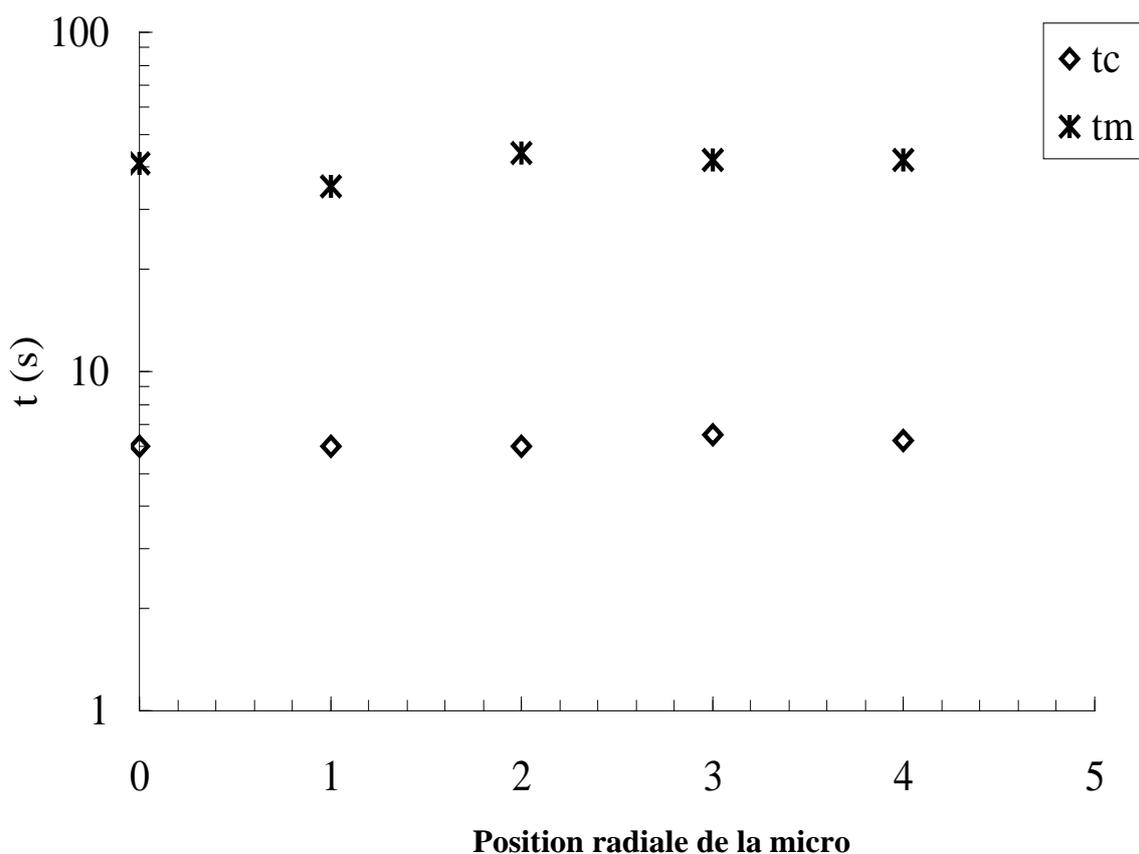
Il s'avère donc d'après la figure 6 et la figure 7 que les deux sondes donnent quasiment les mêmes résultats pour le temps de circulation mais pour ce qui est du temps de mélange on note quelques perturbations de la réponse avec la sonde Taccussel pouvant être du au fait que la taille de cette dernière fait obstacle à l'écoulement, ceci nous amène donc à opter pour la micro sonde, (en plus de cela la micro sonde conductimétrique est réalisée au sein du laboratoire à l'aide de moyens peu coûteux, nous avons donc opté pour cette dernière pour toutes ces raisons).



**Fig. 7: variation du temps de circulation en fonction de la vitesse d'agitation**

### III EFFICACITE DU MELANGE RADIAL DANS LE REACTEUR TORIQUE

Le mélange radial dans le réacteur torique est défini comme étant l'aptitude à la dispersion du traceur dans la direction radiale. Il est déterminé en plaçant la sonde dans cinq positions radiales 4mm, 3mm, 2mm, 1mm et à la parois. La détermination expérimentale des courbes de DTS est obtenue pour le mobile IV à une vitesse d'agitation de 500tr/mn.

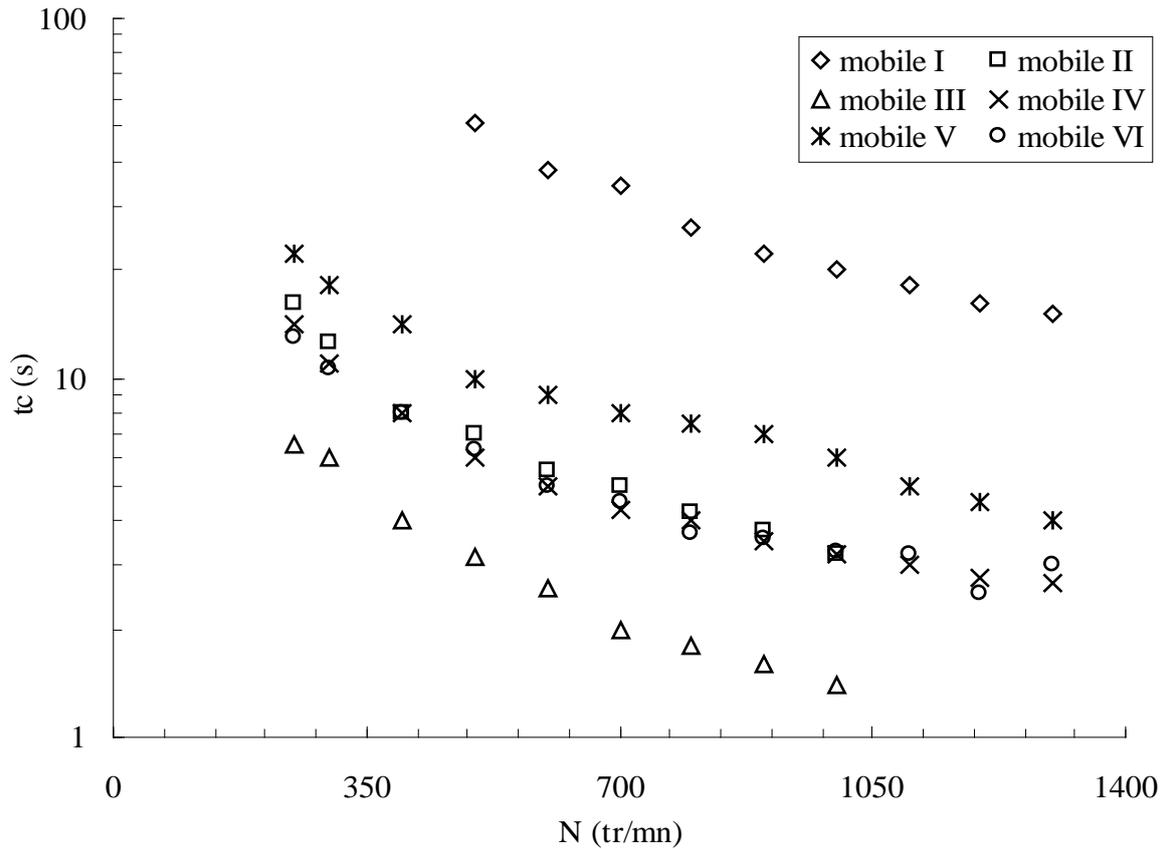


**Fig.8 : Influence de la profondeur de la sonde sur le temps de circulation et le temps de mélange**

On constate d'après la figure 8 qu'il n'y'a pratiquement aucune variation de  $t_c$  et  $t_m$  et ce pour les différentes positions de la sonde, ce résultat est similaire à celui trouvé par NOURI [9] et KHALID[10] dans des réacteurs de même type mais de volumes différents.. Globalement la concentration en traceur est indépendante de la position radiale de la sonde, ceci démontre l'efficacité du mélange radial. Cette constatation permet d'espérer un volume mort négligeable dans le réacteur torique. Pour la suite de nos expériences le temps de circulation et le temps de mélange seront évalués indépendamment de la position de sonde.

#### **IV CARACTERISATION DE L'ECOULEMENT**

Les valeurs du temps de circulation ( $t_c$ ) sont déterminées par analyse des courbes de DTS pour chaque vitesse d'agitation et différents mobiles d'agitation, ce temps correspond à la durée nécessaire à un élément fluide pour parcourir une longueur du tore. Sur la figure 9 nous avons représenté la variation de  $t_c$  en fonction de la vitesse d'agitation ( $N$ ) et en annexe II-4 nous avons donné les résultats expérimentaux pour les différents mobiles.



**Fig. 9: Variation du temps de circulation en fonction de la vitesse d'agitation**

On constate d'après la figure 9 que le temps de circulation diminue avec l'augmentation de la vitesse d'agitation et ce pour l'ensemble des agitateurs. D'autre part, pour toute vitesse de rotation donnée et tout type d'agitateur, le temps de circulation diminue avec l'augmentation du diamètre et de l'angle d'inclinaison des pales dans le cas de l'hélice marine.

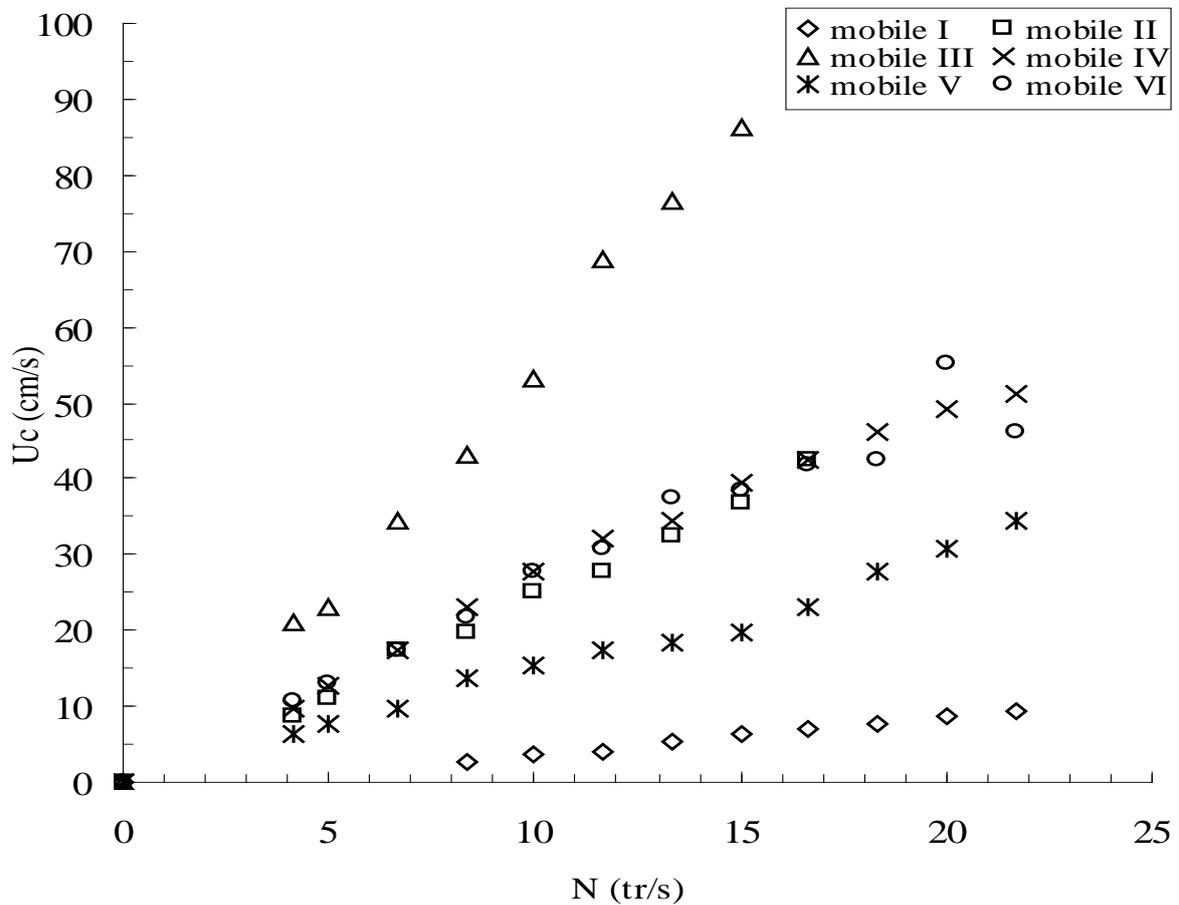
Aussi nous remarquons que l'hélice marine donne un temps de circulation inférieur à celui de la turbine à pale inclinée. Il est important de signaler que le mobile VI (en Inox) a été usiné localement dans un atelier et malgré les quelques imperfections qu'il présentait ce dernier a donné des résultats similaires aux autres mobiles d'agitation.

## V ETUDE DE LA VITESSE MOYENNE DE CIRCULATION

Comme l'analyse des courbes expérimentales de DTS permet de déterminer le temps de circulation, on peut donc définir la vitesse de circulation  $U_c$  par la relation suivante :

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

Pour les différents mobiles, nous avons représenté sur la figure 10 la variation de la vitesse moyenne de circulation en fonction de la vitesse d'agitation dans le réacteur torique.



**Fig. 10 : variation de la vitesse de circulation en fonction de la vitesse d'agitation**

Nous remarquons que la vitesse de circulation varie linéairement avec la vitesse de rotation quelque soit le type et les caractéristiques géométriques des mobile , ce résultat est similaire à ceux trouvés par SATO et Coll.[11], NOURI [9], KHALID [10] et HAMMANI [12].

Pour toute vitesse d'agitation, la vitesse moyenne de circulation augmente avec le diamètre du mobile d'agitation et l'angle d'inclinaison des pales, cette dernière constatation est valable seulement pour les hélices marines.

La turbine à pale inclinée donne une vitesse plus petite que celle de l'hélice, ce résultat est similaire à celui de TANAKA et Coll.[13].

## V-1 CORRELATION DES RESULTATS.

Sur la base du précédent résultat, nous avons proposé une corrélation permettant de prédire la vitesse moyenne de circulation en fonction de la vitesse de rotation, ceci en introduisant un facteur géométrique spécifique ( $F_g$ ) à cette géométrie toroïdale qui tient compte d'une part du rapport entre la surface balayée par les pales du mobile et la section de la veine fluide et d'autre part de la prédominance de la vitesse axiale d'après SATO et Coll [11].

$$\text{nous avons donc :} \quad U_C = A.N \quad (2)$$

Ou :  $A$  est une constante déterminée expérimentalement et qui dépend des caractéristiques géométriques du réacteur et du mobile d'agitation.

$$U_C = K.F_g.N \quad (3)$$

$$\text{Avec :} \quad F_g = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} R_t \sin \varphi \quad (4)$$

$K$  : coefficient déterminé par ajustement linéaire de  $A$  en fonction de  $F_g$

D'ou :

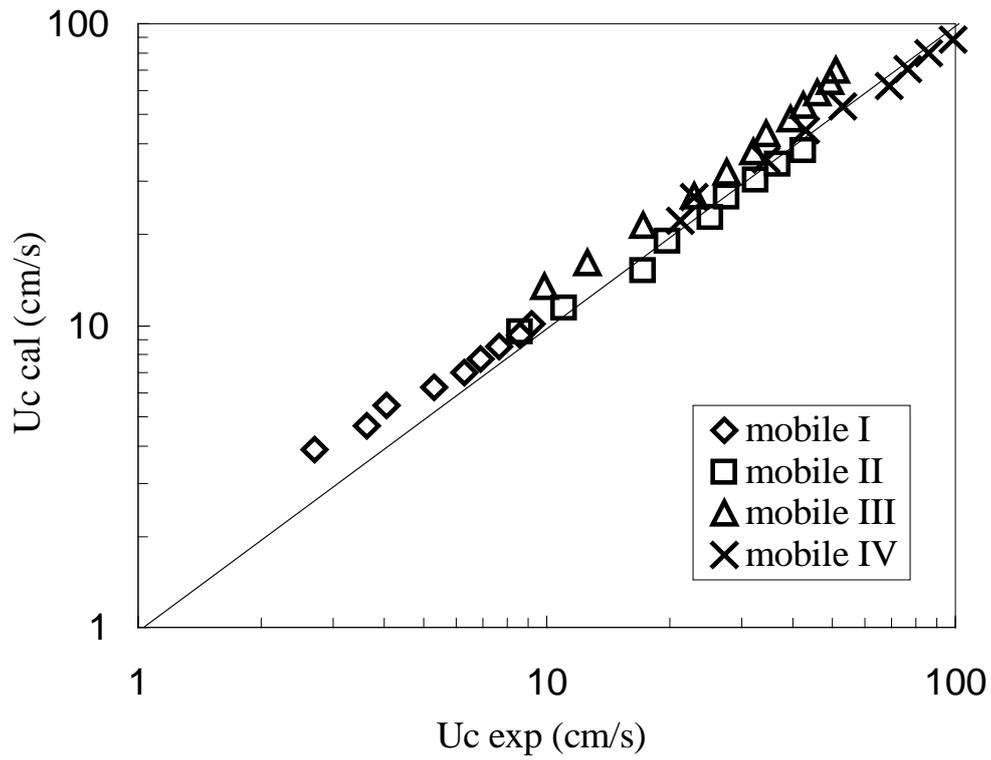
$$U_C = K N \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} R_t \sin(\varphi) \quad (5)$$

$d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_t$ ,  $R_t$  et  $\varphi$  sont respectivement le diamètre extérieur, le diamètre intérieur du mobile, le diamètre du tube, le rayon du tore et l'angle d'inclinaison des pales.

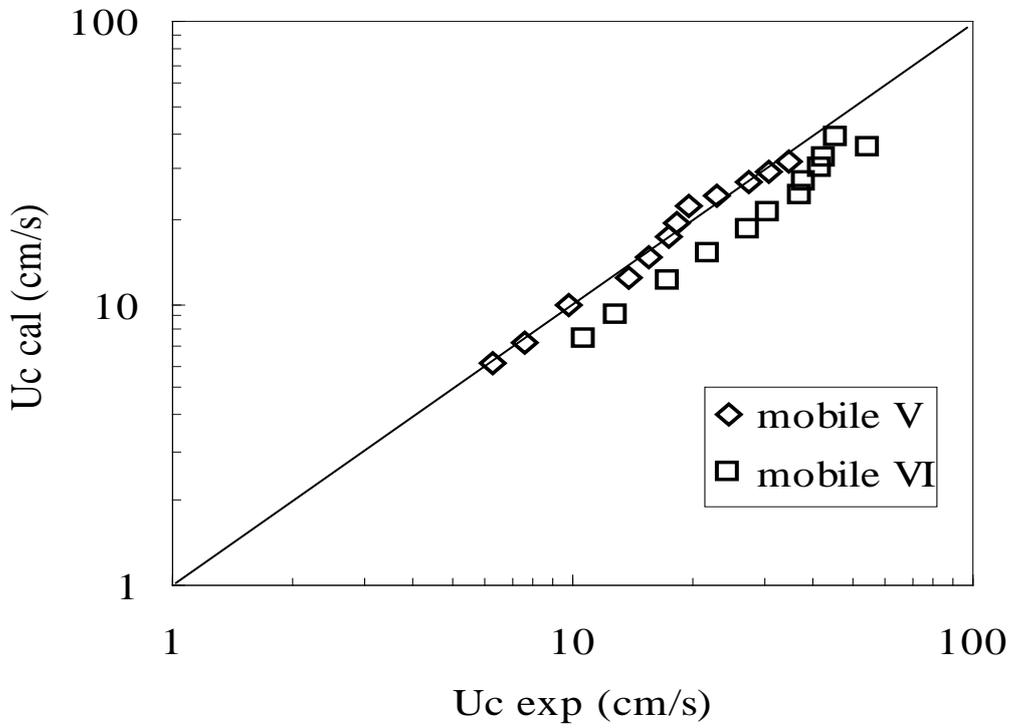
Nous avons effectué un ajustement de  $A$  en fonction de  $F_g$  (voir annexe II-5) dont le résultat est le suivant :

- Pour les hélices marines  $K=0.714$  (coefficient de corrélation : 0.96 ).
- Pour les turbines à pale inclinée  $K=0.415$  (coefficient de corrélation : 0.94 ).

Les figures 11 et 12 présente la variation de la vitesse calculée en fonction de la vitesse expérimentale pour les différentes hélices marines et turbines respectivement.



**Fig. 11: Variation de la vitesse corrélée en fonction de la vitesse expérimentale cas des hélices marines**



**Fig. 12: Variation de la vitesse corrélée en fonction de la vitesse expérimentale cas de la turbine**

Nous constatons que la représentation graphique de l'équation 5 (figure 11) dans le cas des hélices marines est en bon accord avec les résultats expérimentaux et l'écart relatif moyen est environ égal à 10%.

Contrairement aux hélices, les résultats obtenus avec les turbines sont moins concordants avec une déviation de l'ordre de 21% .

Dans ce qui va suivre, on se propose d'effectuer une comparaison entre nos résultats expérimentaux avec ceux obtenus par les différentes corrélations citées dans la littérature en vue de vérifier la validité de ce qui précède. Toutes ces corrélations se présentent sous forme linéaire

$$U_c = A.N \quad (6)$$

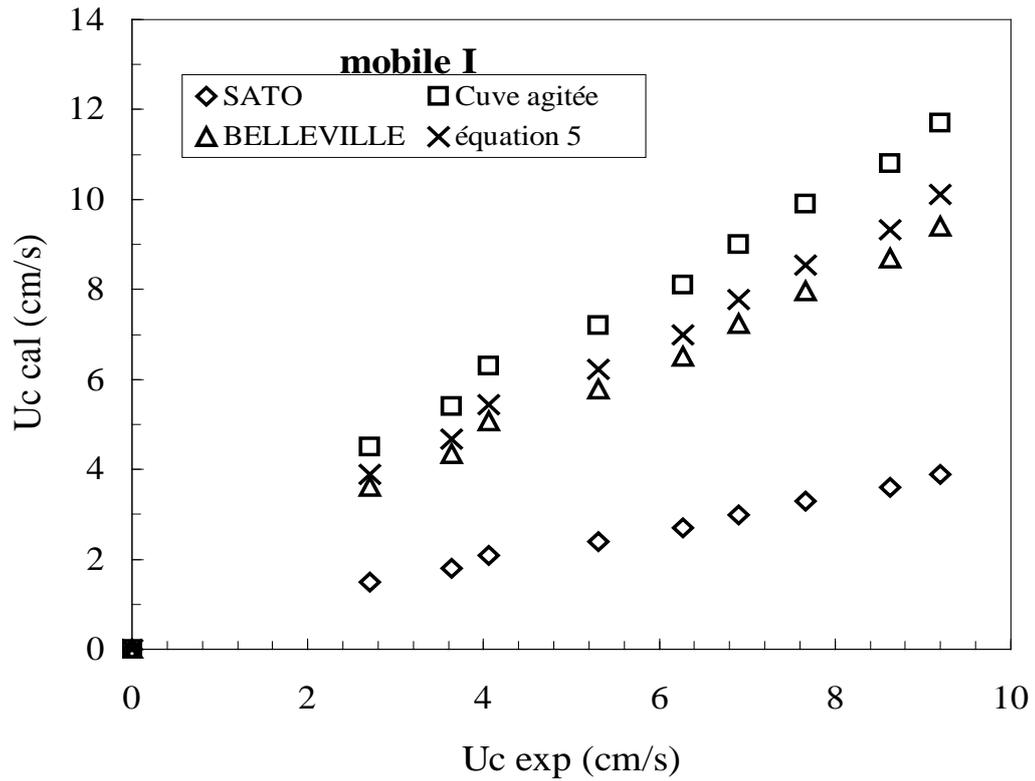
avec  $A = K F_g \quad (7)$

Dans le tableau N°3 nous donnerons ces différentes corrélations.

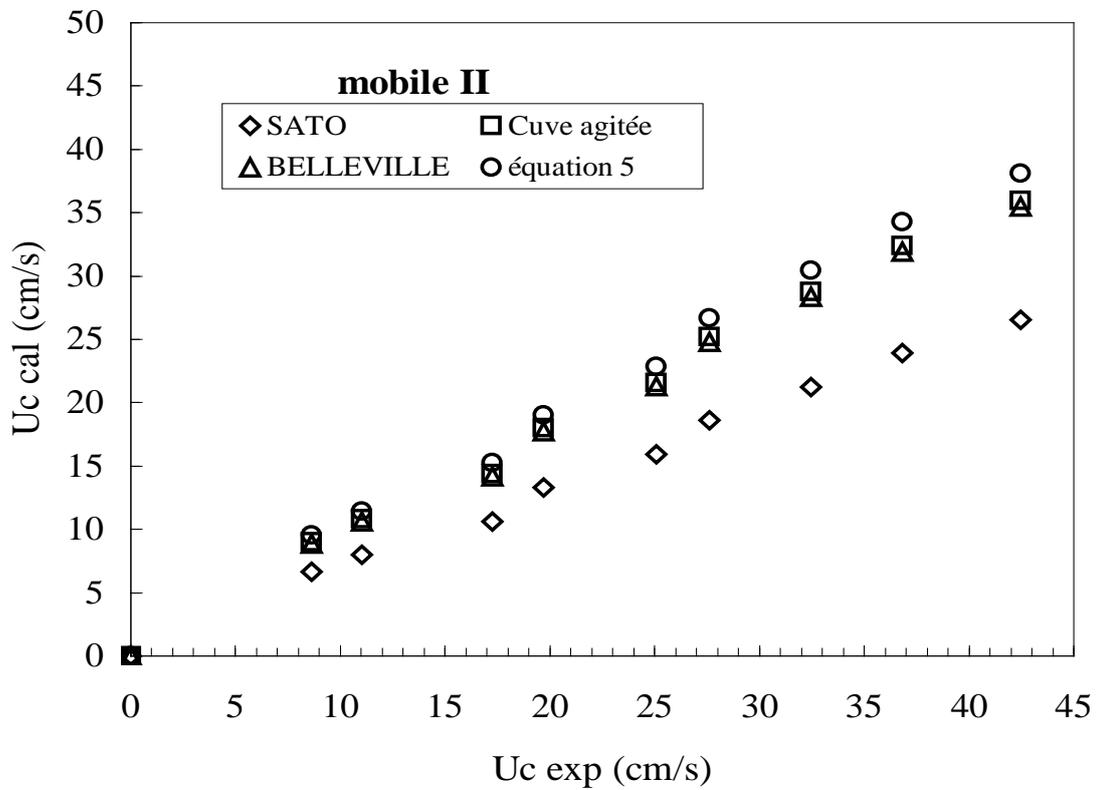
**TABLEAU N°3 : Corrélations trouvées dans la littérature.**

Auteurs	Type de Réacteur	$F_g$
SATO et Cool.[11]	Torique à longueur droite	$\frac{d_1^3 - d_2^3}{d_t^2} \sin \varphi$
BELLEVILLE et coll[14]	Cuve agitée	$\frac{d_1^2}{d_t} \operatorname{tg} \varphi$
BELLEVILLE et coll[14]	Torique de forme circulaire	$\frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} R_t \operatorname{tg} \varphi$

Afin d'effectuer une comparaison entre nos résultats et ceux des autres travaux, nous allons tracer (figure13 a-b-c-d-e) et ce pour chaque mobile d'agitation la vitesse calculée en fonction de la vitesse expérimentale et ceci à l'aide des différentes équations citées dans le premier chapitre. Pour retrouver ces équations il suffit de remplacer dans l'équation N°7 l'expression du facteur géométrique donné dans le tableau ci-dessus.



**Fig 13-a**



**Fig 13-b**

**Fig.13 : Variation de la vitesse corrélée en fonction de la vitesse expérimentale**

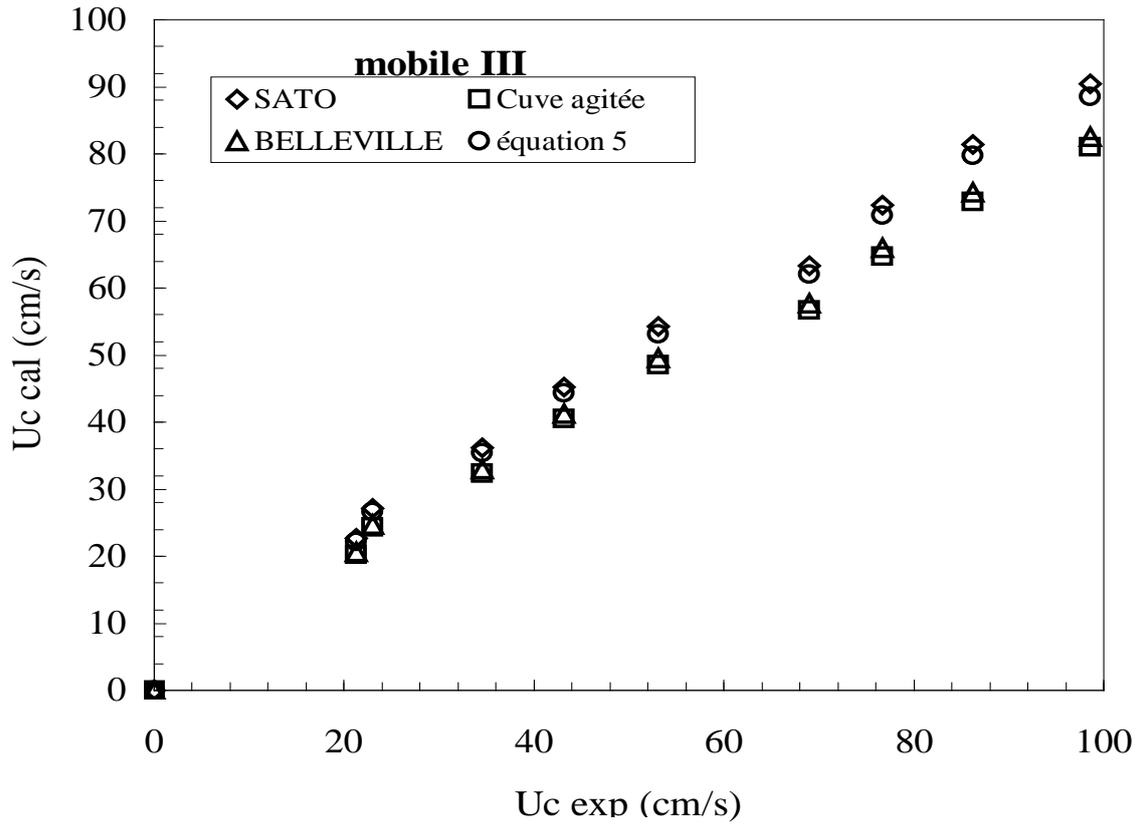


Fig 13-c

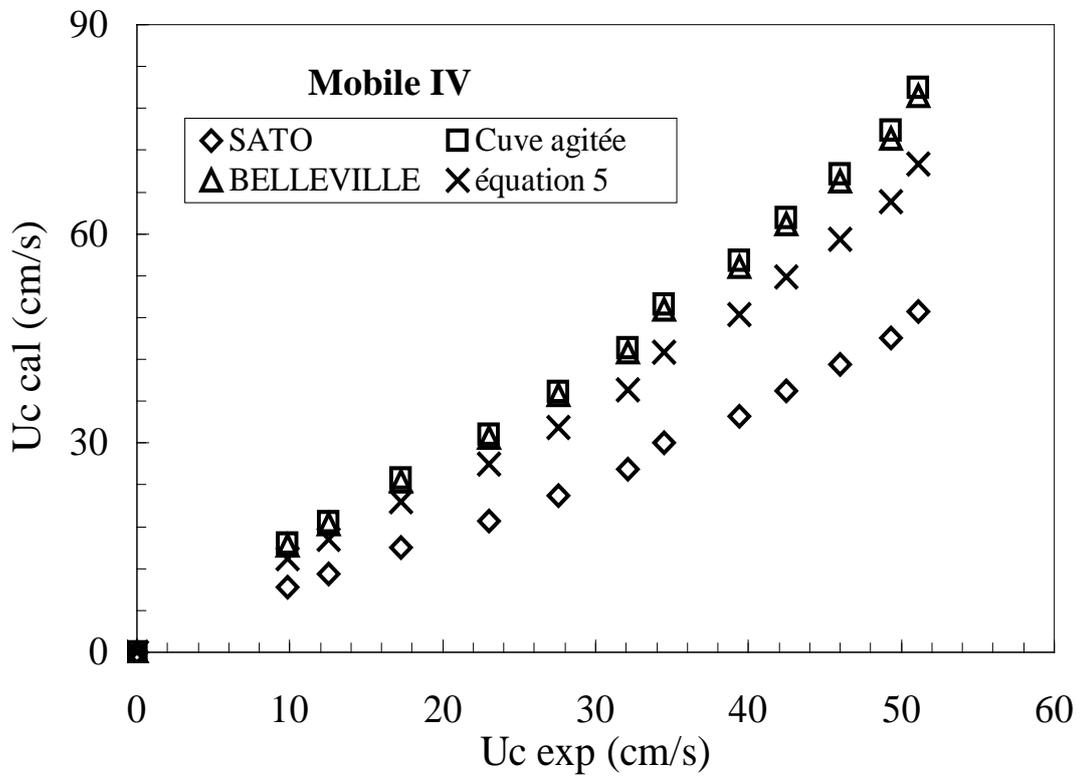
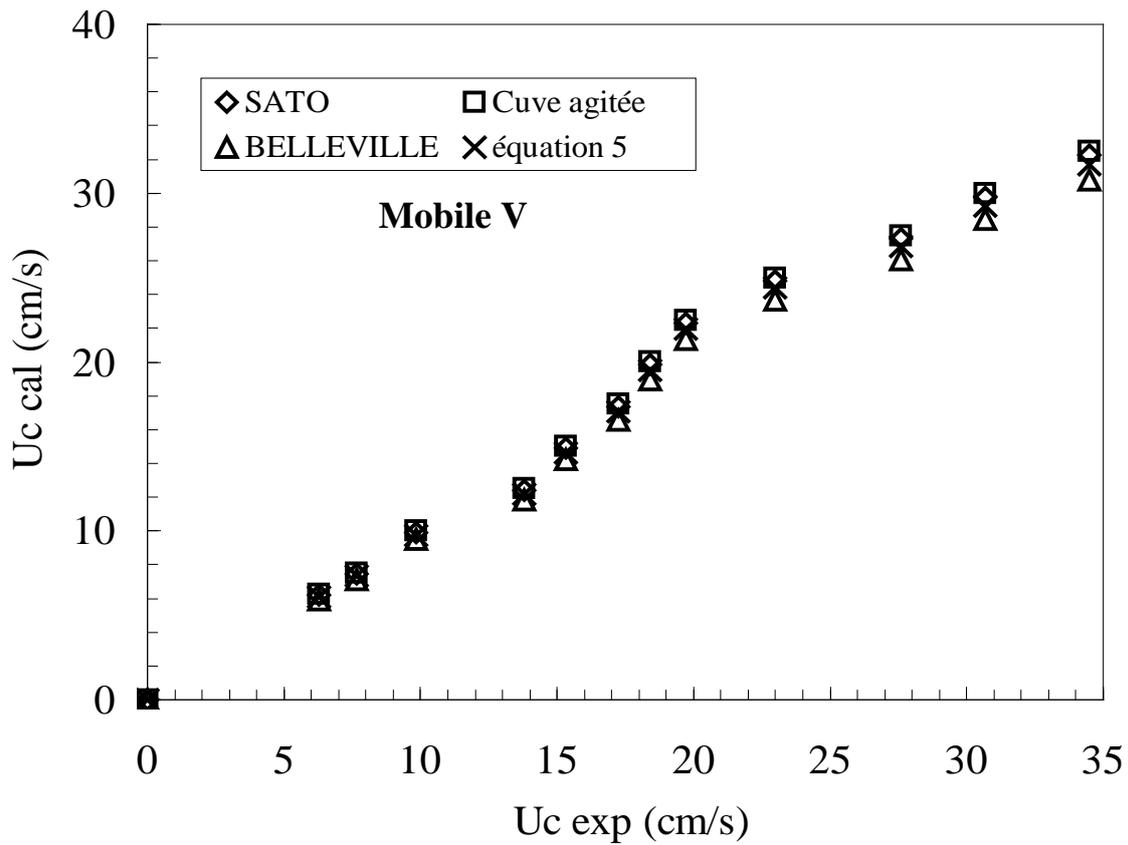


Fig 13-d

Fig.13 : Variation de la vitesse corrélée en fonction de la vitesse expérimentale



**Fig 13-e**

**Fig.13 : Variation de la vitesse corrélée en fonction de la vitesse expérimentale**

A Partir de ces précédentes figures on observe que la corrélation proposée représente de manière satisfaisante nos résultats expérimentaux.

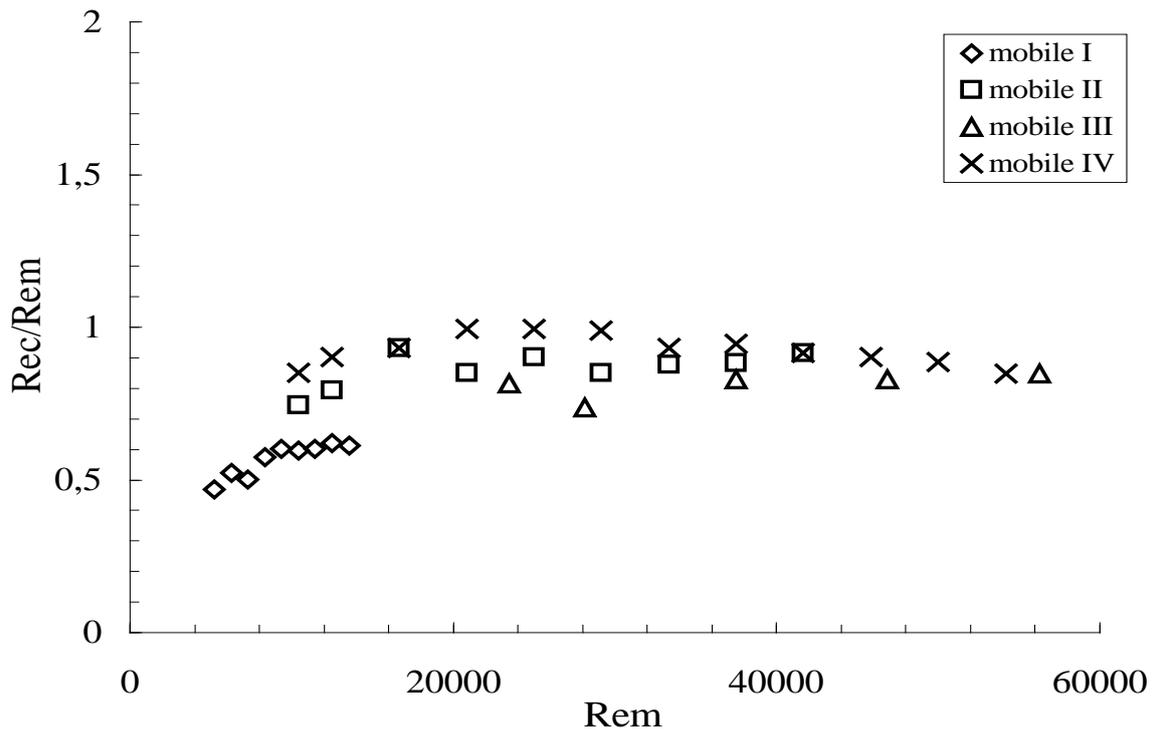
## **VI REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DE LA VARIATION DE LA VITESSE MOYENNE DE CIRCULATION EN FONCTION DE LA VITESSE D'AGITATION.**

Afin d'étudier la dépendance entre la vitesse moyenne de circulation et la vitesse de rotation, nous allons essayer de donner nos résultats sous forme adimensionnelle en tenant compte des propriétés du fluide en circulation ainsi que des conditions qui génèrent le mouvement, pour cela nous avons fait intervenir :

le nombre de Reynolds de circulation du fluide ( $Rec = \frac{U_c d_t}{\nu}$ )

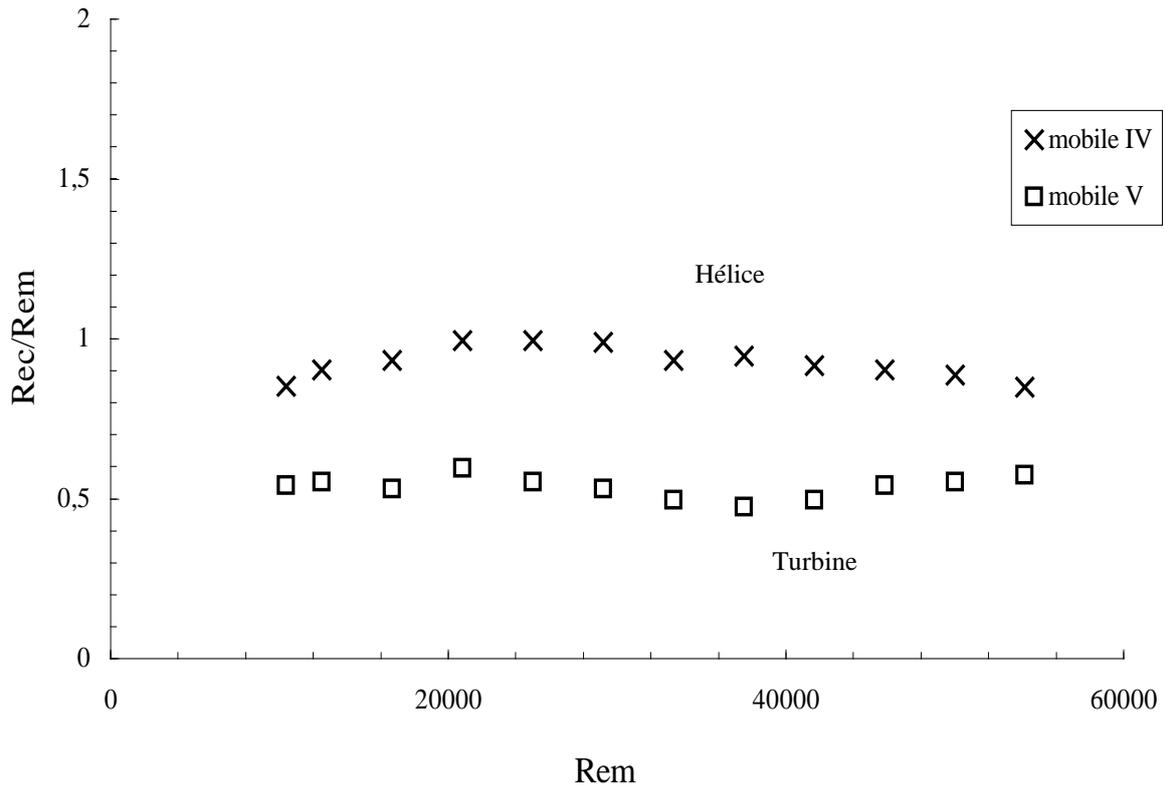
le nombre de Reynolds du mélange ( $Rem = \frac{N d_1^2}{\nu}$ )

La figure 14 représente la variation du rapport ( $\frac{Rec}{Rem}$ ) en fonction de  $Rem$  dans le cas des hélices marines.



**Fig .14 : Variation du rapport  $Rec/Rem$  en fonction de  $Rem$  dans le cas des hélices marines**

Nous remarquons que ce rapport augmente légèrement avec l'augmentation de  $Rem$  jusqu'à une valeur évaluée à  $Rem=2.10^4$  et au delà de celle-ci on obtient un rapport relativement constant compris entre 0.8-1, ceci indépendamment du diamètre extérieur et de l'angle d'inclinaison des pales de l'hélice. ce résultat est similaire à celui de HOSOGAI et coll [15] dans le cas des hélices marines.



**Fig. 15 : Variation de Rec/Rem en fonction de Rem**

Selon la figure 15 et pour un nombre de Reynolds de mélange donné, on trouve que le rapport (Rec/Rem) est plus grand pour l'hélice, ceci est confirmé par le fait que l'hélice marine engendre une vitesse de circulation plus importante par rapport à celle de la turbine, ce résultat est en bon accord avec celui de TANAKA et coll[13].

On peut donc représenter la variation de Rec en fonction de Rem par une loi dont la forme est la suivante :

$$Rec = a Rem^b \quad (8)$$

Le tableau 4 donne les valeurs de a et b pour le cas des hélices marines :

**TABLEAU N°4 : Valeurs de a et b**

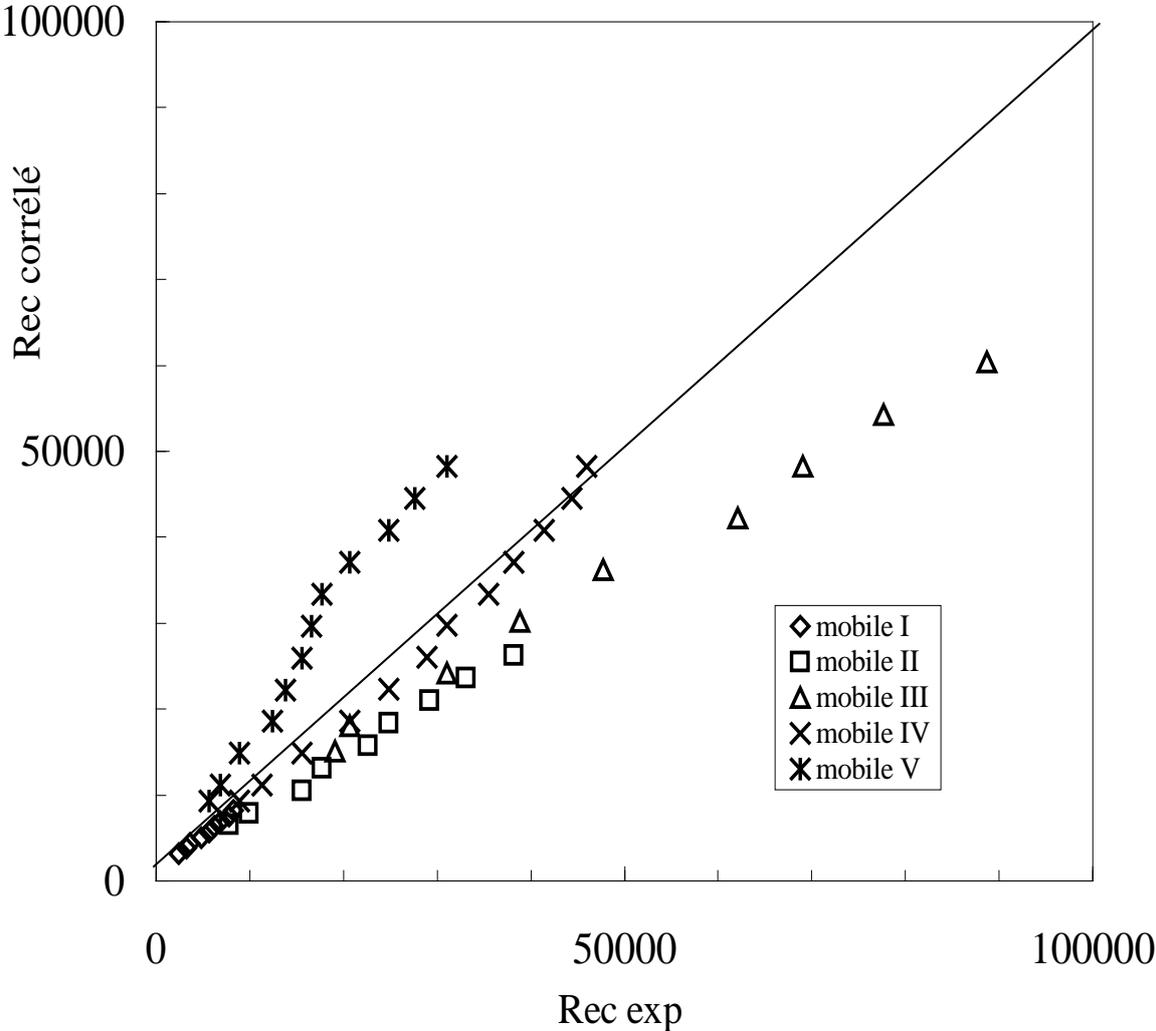
Mobile	I	II	III	IV	V
<b>a</b>	0.04	0.31	0.90	0.97	0.68
<b>b</b>	1.2	1.1	1.1	0.99	0.9759

On constate que b est relativement constant, par contre a dépend des caractéristiques géométriques des hélices marines.

Dans le but de pouvoir exprimer ce coefficient (a) en fonction des différents paramètres qui caractérisent le mobile d'agitation, nous avons pensé à proposer une relation qui lierait Rem à Rec, pour cela nous avons considéré la relation proposée par NOURI[9] dans un domaine où  $Rem > 6.10^3$  car dans son étude celle-ci a été vérifiée seulement pour deux hélices marines de même angle d'inclinaison .

$$Rec = 1.3 \left[ \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_i^2} \right]^{0.025} \sin \varphi Rem \tag{9}$$

La méthodologie à suivre pour cette étude réside dans la représentation graphique de Rec corrélé en fonction de Rec expérimental pour chaque mobile d'agitation



**Fig.16 : Variation de Rec corrélée en fonction de Rec expérimental**

D'après la figure 16 , nous constatons que les valeurs calculées par l'équation N°9 sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, l'écart moyen est estimé à environ 11% pour les hélices marines.

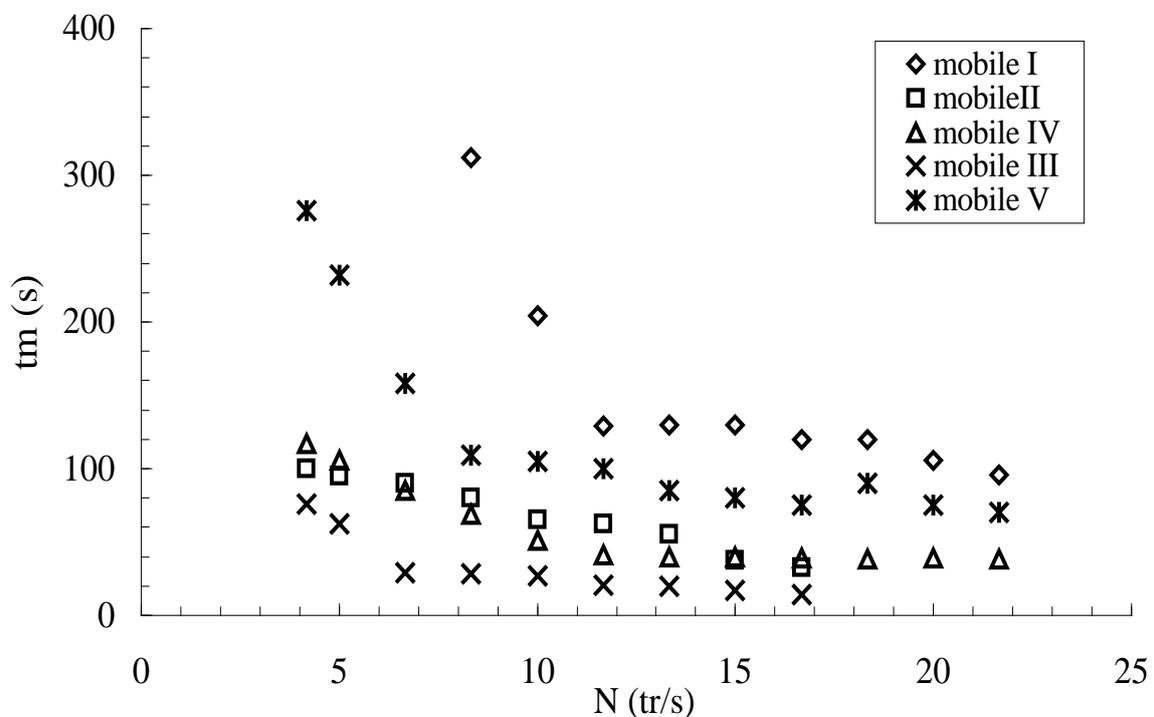
Il a été constaté qu'à partir d'un nombre de Reynolds de circulation compris entre 35000-48000 et pour les mobiles III et V l'écart devient plus grand, cet écart est aussi augmenté par utilisation de la turbine à pale inclinée.

## VII ETUDE DU MELANGE

Afin de caractériser le processus de mélange dans le réacteur torique on a souvent recours au temps de mélange. Il est défini comme l'intervalle de temps entre l'injection du traceur et sa répartition dans tout l'espace réactionnel jusqu'à un degré d'homogénéisation défini. Le temps de mélange est fonction de la vitesse, de la valeur du degré d'homogénéisation choisi, de la géométrie, des dimensions et des conditions d'agitation.

### VII-1 VARIATION DU TEMPS DE MELANGE EN FONCTION DE LA VITESSE D'AGITATION

L'étude de la variation du temps de mélange ( $t_m$ ) en fonction de la vitesse de rotation est représentée par la figure 17 . Les valeurs expérimentales du temps de mélange sont données en annexe II-6.



**Fig. 17 : Variation du temps de mélange en fonction de la vitesse de rotation**

On constate que pour une vitesse d'agitation donnée, le temps de mélange augmente avec la diminution du diamètre des pales du mobile (mobile I,II, III) ce qui explique que plus la surface balayée par les pales par rapport à celle du tube est grande plus le mélange au sein du réacteur se fait d'une manière rapide, par contre l'angle d'inclinaison (mobile II, IV) n'influe que très peu sur le temps de mélange.

Aussi, dans le cas d'une agitation par hélice marine, nous trouvons que le temps de mélange est plus petit que dans le cas d'une turbine à pale inclinée, sur la base de ce résultat on recommande l'hélice marine à la turbine.

## VII-2 CARACTERISATION GLOBALE DU MELANGE.

Dans le paragraphe précédent, nous avons caractérisé le mélange par la représentation du temps de mélange en fonction de la vitesse d'agitation , dans celui - ci , nous allons définir le mélange global à l'aide de deux paramètres adimensionnels qui sont :

### 1 - le nombre de circulation : $N_{\theta}$

Le nombre de circulation  $N_{\theta}$  est défini par le rapport du temps de mélange sur le temps de circulation

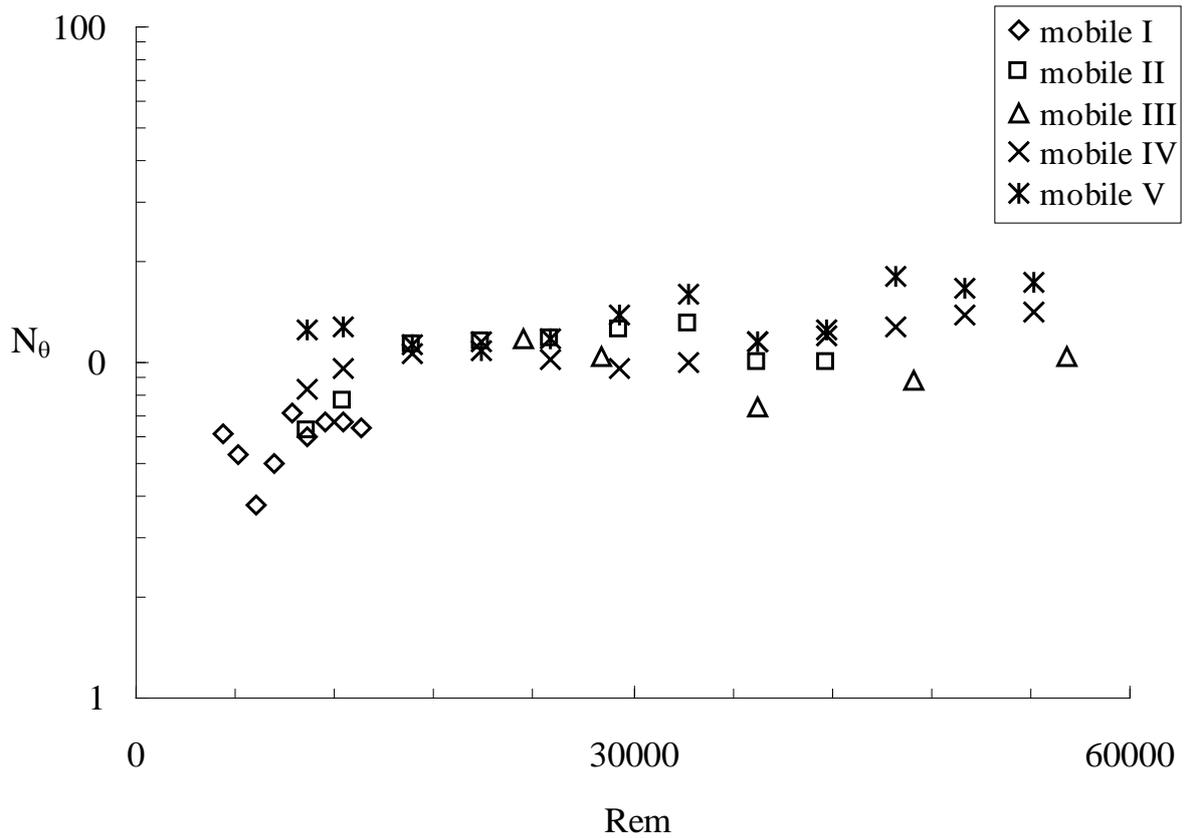
$$N_{\theta} = \frac{tm}{tc} \quad (10)$$

$N_{\theta}$  est appelé nombre de circulation nécessaire pour obtenir un degré d'homogénéité donné.

D'après la figure 18 donnant  $N_{\theta}$  en fonction du nombre de Reynolds de mélange, nous constatons pour l'hélice marine, que quel que soit le nombre de Rem et les dimensions des mobiles d'agitation, le nombre de circulation semble relativement constant et est égal à 10 (tableau N°5) , par contre il est légèrement supérieur dans le cas de la turbine à pale inclinée. ces valeurs sont assez grandes devant celle observée pour un réacteur agité ( $N_{\theta}=5$ ) [9].

**TABLEAU N°5 : Valeurs de  $N_{\theta}$  pour les différents mobiles d'agitation.**

Mobile	I	II	III	IV	V
$N_{\theta}$	6	10	10	11	14
$d_1/d_t$	0.28	0.55	0.83	0.55	0.55



**Fig.18 : Variation du nombre de circulation en fonction de Rem**

D'autre part, en comparaison aux travaux de HAMMANI [12] et de NOURI [9] dans des configurations diverses, nous avons illustré dans le tableau 6 les différents résultats retrouvés dans la littérature, il en ressort que le nombre de circulation dans le réacteur torique est plus faible que dans le réacteur à longueur droite, ceci peut être dû à l'existence des longueurs droites. Par ailleurs, pour les réacteurs parfaitement toriques, le mélange est relativement indépendant du volume du réacteur [9].

**TABEAU N°6 : Valeurs moyennes du nombre de circulation**

Auteurs	NOURI [9]	NOURI [9]	Le notre	NOURI [9]	HAMMANI [12]
Réacteurs	Torique	Torique	Torique	Carrée	Torique
$V_R (l)$	2.1	5.25	8	9	14.5
$L_t/d_t$	16.06	14.67	15.33	36.76	36.25
$N_\theta$	15	14	10	40	25

## 2 - le produit $N.t_m$

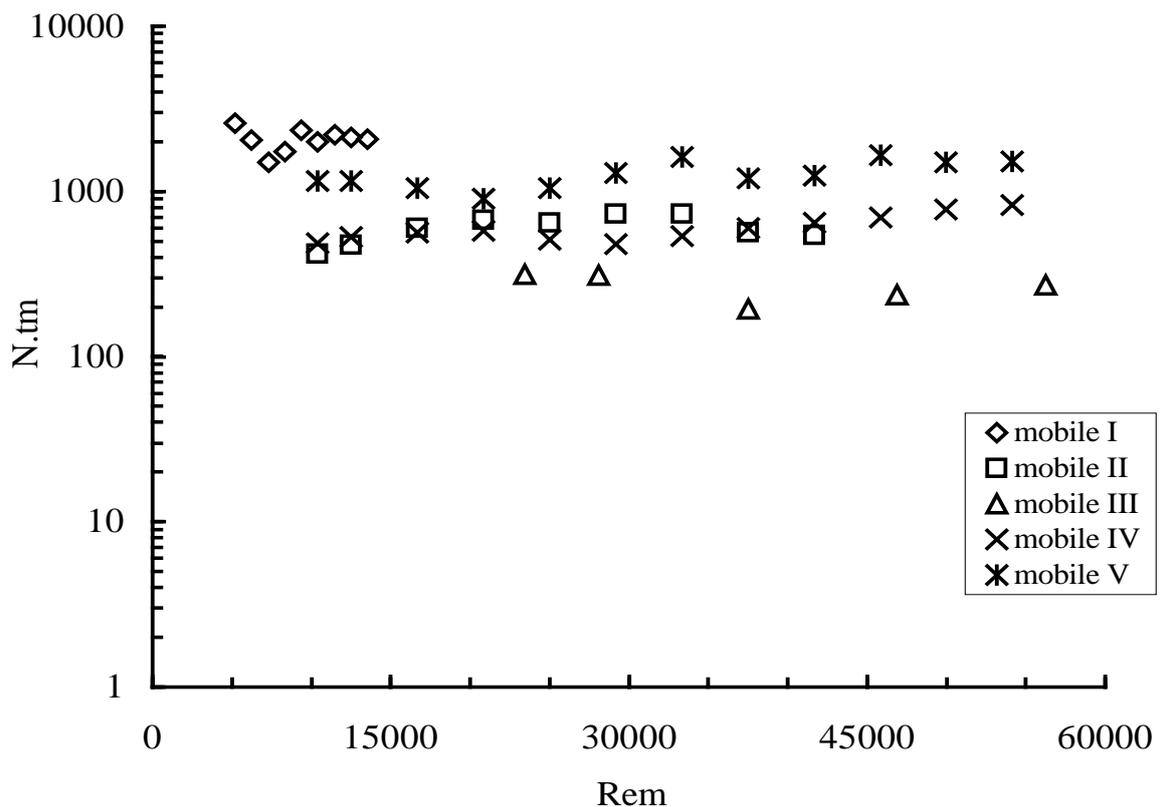
La caractérisation du mélange par le produit adimensionnel  $N.t_m$  est basée sur la représentation graphique de ce produit en fonction du nombre de Reynolds de mélange.

Il a été constaté selon la figure 19 que ce produit est relativement indépendant du diamètre et de l'angle d'inclinaison des pales de l'hélice marine excepté pour le mobile I, ceci peut être attribuer au fait que la surface balayée par le mobile est faible et donc l'aspect tourbillonnaire de l'écoulement s'atténue d'où l'augmentation du temps de mélange (voir tableau 7)

La valeur du produit  $N.t_m$  est double dans le cas de la turbine par rapport à celle obtenue par l'hélice marine, donc le type de mobile utilisé influe sur  $N.t_m$ .

**TABLEAU N° 7 : Valeurs du produit  $N.t_m$**

Mobile	I	II	III	IV	V
$N.t_m$	2068	258	597	602	1278



**Fig. 19 : Variation du produit  $N.t_m$  en fonction de  $Rem$**

BELLEVILLE et coll[11] a trouvé que ce produit est compris entre (1300-2700) dans le cas du réacteur torique avec des hélices marines.

Toutes ces valeurs sont largement plus élevées devant celles obtenues dans le cas du réacteur agité. RACHEZ et Coll [16] a montré que dans le cas d'une cuve agitée munie de chicane ,  $N_{tm}=15.6$  pour une turbine à six pale type Rushton et  $N_{tm}=5.8$  pour une hélice marine.

KAWASE et coll[17] a trouvé que ce produit tend vers 42.7 pour un réacteur agité en régime turbulent pour un fluide Newtonien. HAMMANI[12] a montré que ce produit est relativement constant et égal à 3071 pour  $Re_m > 10^4$  dans un réacteur de forme torique de volume 14.5l.

## CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre réside dans la caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique fermé par la méthode conductimétrique, la circulation du fluide est engendrée par un mobile d'agitation.

La détermination des courbes expérimentales de la distribution des temps de séjours est basée sur l'utilisation d'une micro sonde conductimétrique.

Cette étude a permis de montrer que la géométrie toroïdale à l'avantage de présenter un mélange radial efficace du à l'écoulement hélicoïdal généré par le mobile d'agitation et accentué au niveau des coudes, par conséquent, ce type de réacteur ne présente pas de volume mort ce qui permet une extrapolation plus aisée de ces performances.

A partir de la caractérisation de l'écoulement, nous avons montré que la vitesse moyenne de circulation varie linéairement avec la vitesse d'agitation.

Pour prédire cette variation une corrélation a été proposée et est basée sur l'utilisation d'un facteur géométrique qui tient compte des caractéristiques du mobile et du réacteur.

$$U_c = K N \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} R_t \sin(\phi)$$

D'autre part, une représentation adimensionnelle a permis de corréler le nombre de Reynolds de circulation au nombre de Reynolds de mélange par :  $Rec = a Rem$ , ou  $a$  dépend des caractéristiques géométriques du mobile d'agitation utilisé.

Nous avons remarqué que le rapport (Rec/Rem) augmente avec l'augmentation de Rem et que cette croissance se limite à  $Rem=2.10^4$ , au delà de cette valeur on obtient un rapport relativement constant compris entre 0.8 et 1, ceci indépendamment du diamètre extérieur et de l'angle d'inclinaison des pales de l'hélice.

La caractérisation globale du mélange par le nombre de circulation a montré que celui-ci tend vers une valeur moyenne constante et égale à 10.

On recommande l'hélice marine à la turbine à pale inclinée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

2

- [1] RONZE D, PIERRARD P, ZOULALIANA 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, (166), 21-27, (1991).
- [2] VILLERMAUX J,  
« Génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs ».  
Tec, Doc, Lavoisier , (1993).
- [3] BRODBERGER JF, VALENTIN G, STORCK A.  
« Utilisation d'une microsonde conductimétrique pour l'étude des phénomènes de mélange au sein de cuves agitées ».  
Entropie, (112), 20-28, (1983).
- [4] GIBSON C.H, SCHWARTZ W.H,  
« Detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field ».  
J. Fluid Mech, 16, 357-364 , (1963).
- [5] BRODBERGER J.F, VALENTIN.G, STORCK G,  
« A conductimetric method for the study of mixing phenomena in liquids ».  
Electrochim. Acta, 28, (5), 619-626, (1983).
- [6] LAMB D.E, MANNING F.S, WILHEIM R.H,  
« Measurement of concentration fluctuation with an electrical conductivity probe ».  
AIChE Journal, 6, (4), 682-685, (1960).
- [7] MANNING F.S, WILHEIM R.H,  
« Concentration fluctuation in a stirred baffled vessel ».  
AIChE Journal, vol 9, n° 1 , 12-19, (1963).
- [8] TORREST R.S, RANZ W.E,  
« Improved conductivity system for measurement of turbulent concentration fluctuation ».  
I.E.C Fundamentals, 8, (4), 810-816, (1969).
- [9] NOURI. L ,  
« Etude des performances du réacteur torique , Application à l'hydrolyse Enzymatique des protéines végétales ».  
Thèse de doctorat , Ecole centrale de Nantes – Université de Nantes, (1994).
- [10] KHALID. A,  
« Etude de l'écoulement généré par une hélice dans un réacteur de forme toroïdale ».  
Thèse de doctorat , école centrale de Nantes – Université de Nantes , (1993).
- [11] SATO Y., MURAKAMI Y,  
« flow pattern , circulation velocity and pressure loss in loop reactor ».  
J. Chem . Eng . Japan, 12, (6), 448-453, (1979).

- [12] HAMMANI S ,  
« Caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique ».  
Mémoire de magistère EMP, Bordj- El – Bahri, (1999).
- [13] TANAKA. M., SENDAI.T., HOSOGAI. K,  
« Flowing characteristics in a circular loop reactor ».  
Chem . Eng . Res . Des, 67, 423-427, (1989).
- [14] BELLEVILLE. P., LEGRAND. J., BRUXELMANE. M,  
« Etude de la vitesse de circulation dans un système agité en géométrie toroïdale ».  
99- 104, (1992).
- [15] HOSOGAI. K., TANAKA. M.,  
« Study of suspension polymerisation of styrene with a circular loop reactor ».  
Polymer Eng and science, vol 32, (6), 431-437, (1992).
- [16] RACHEZ D, DAVID R, VILLERMAUX J,  
« Un nouveau modele de circulation interne dans une cuve agitée de type industriel ».  
Entropie, (101), 32-39, (1981).
- [17] KAWASE Y, MOO-YOUNG M,  
« Mixing time in bioreactors ».  
J. Chem. Tech. Biotechnol, 44, 63-75, (1989).

# *Annexes*

## ANNEXE II-1

Reproductibilité du résultat de la courbe d'étalonnage.

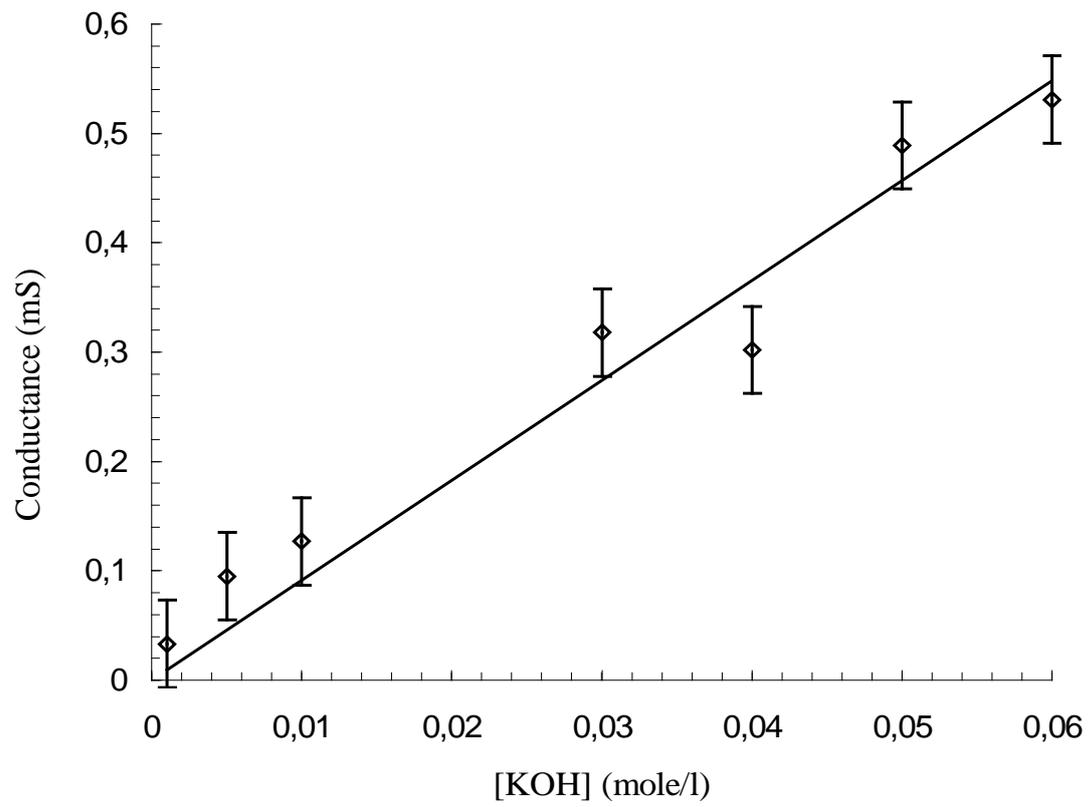
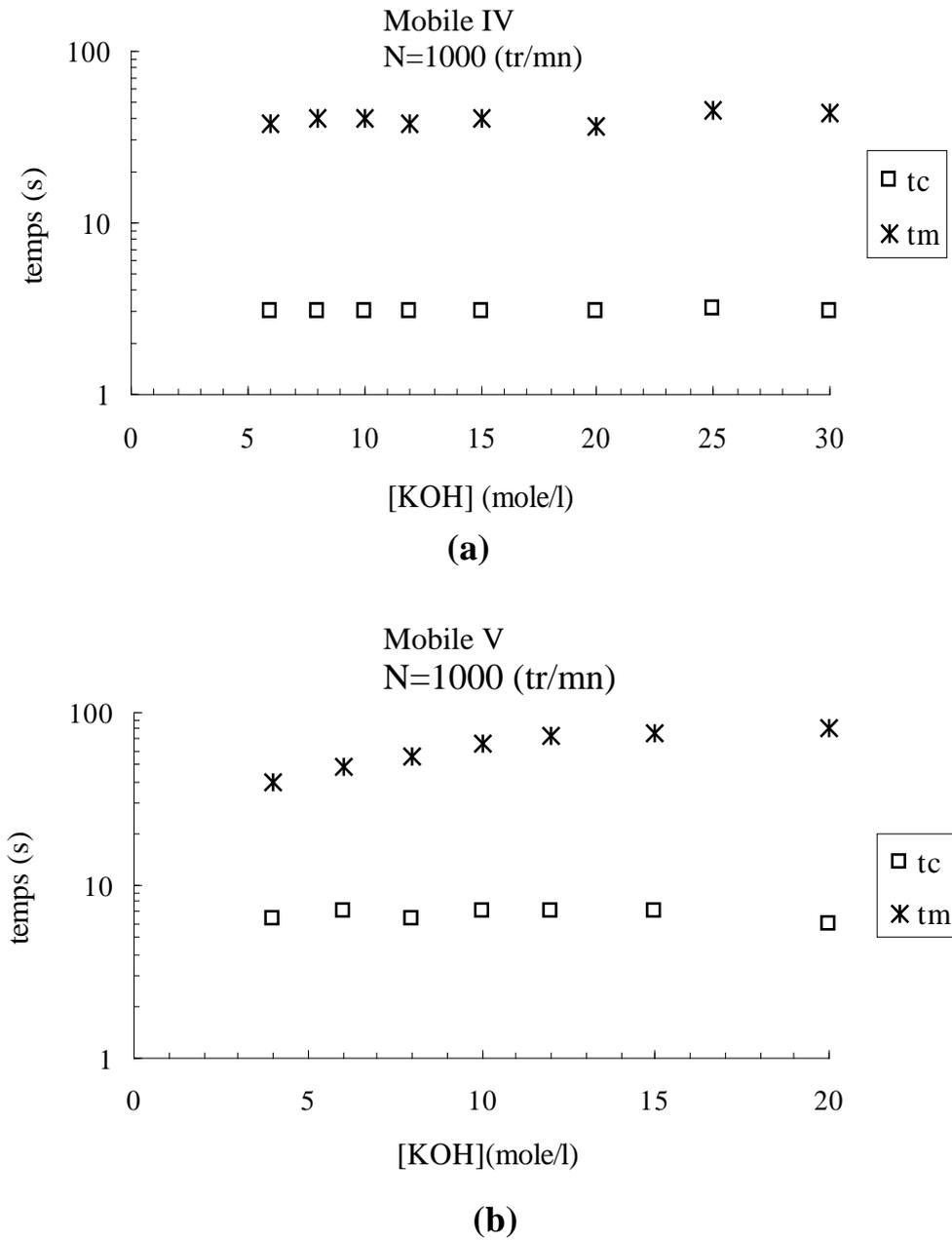


Fig.1 : Reproductibilité de la courbe d'étalonnage

## ANNEXE II- 2

Optimisation des conditions opératoires

### A- Optimisation de la concentration du traceur



**Fig.2 : Influence de la concentration du traceur sur le temps de circulation et de mélange**

### B- Optimisation du volume de traceur à injecter.

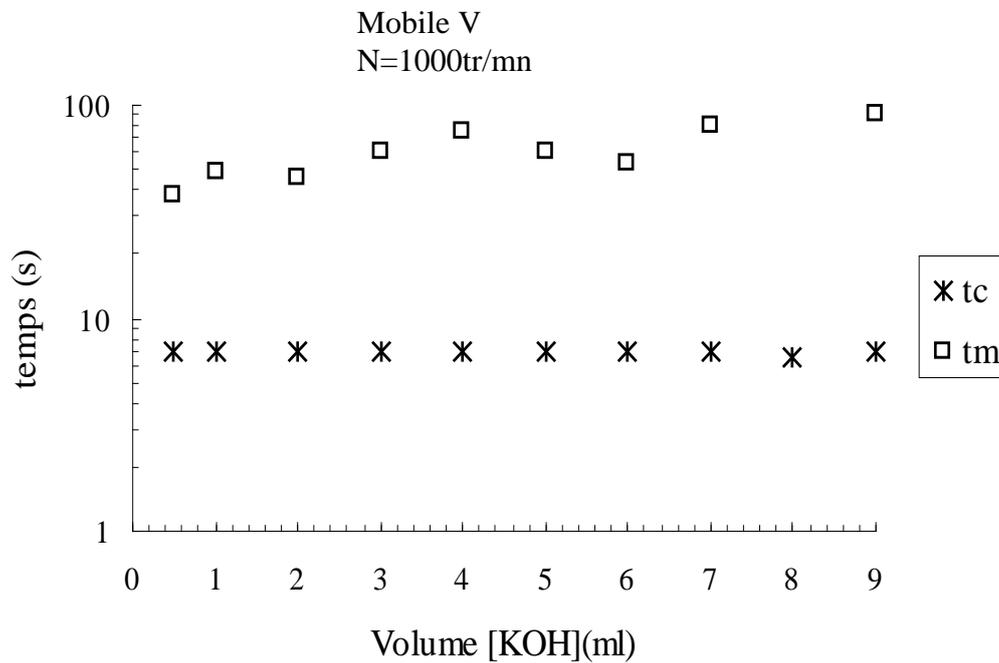


Fig.3 : Influence du volume d'injection sur le temps de circulation et de mélange

### C- Influence de la profondeur du mobile d'agitation

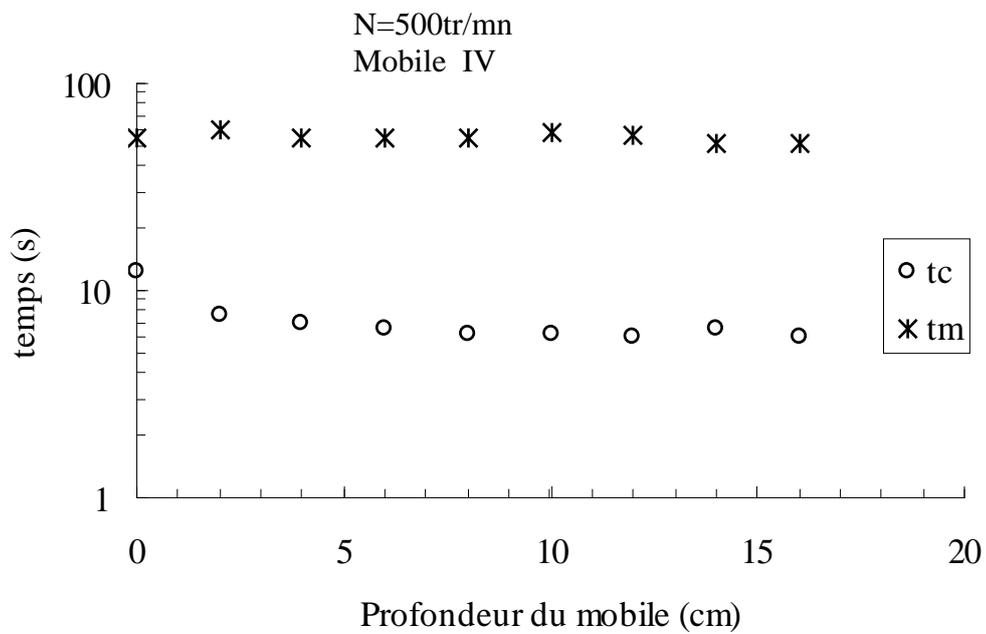


Fig.4 : Influence de la profondeur du mobile d'agitation sur le temps de circulation et de mélange

## ANNEXE II- 4

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

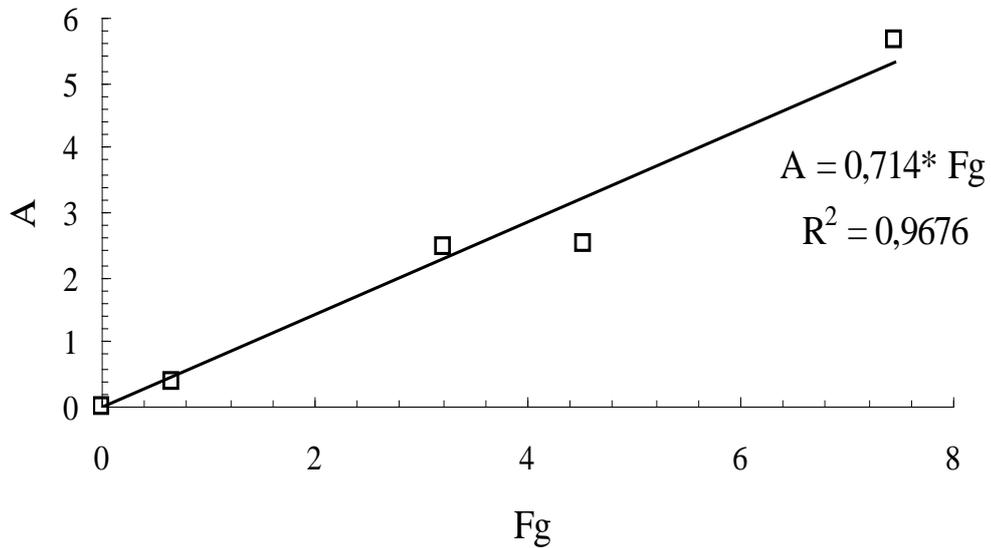
Dans le tableau ci dessous nous avons donné les valeurs du temps de circulation (tc) déterminées a partir des courbes de DTS pour tous les mobiles utilisés.

**TABLEAU N°1 : Valeurs expérimentales du temps de circulation**

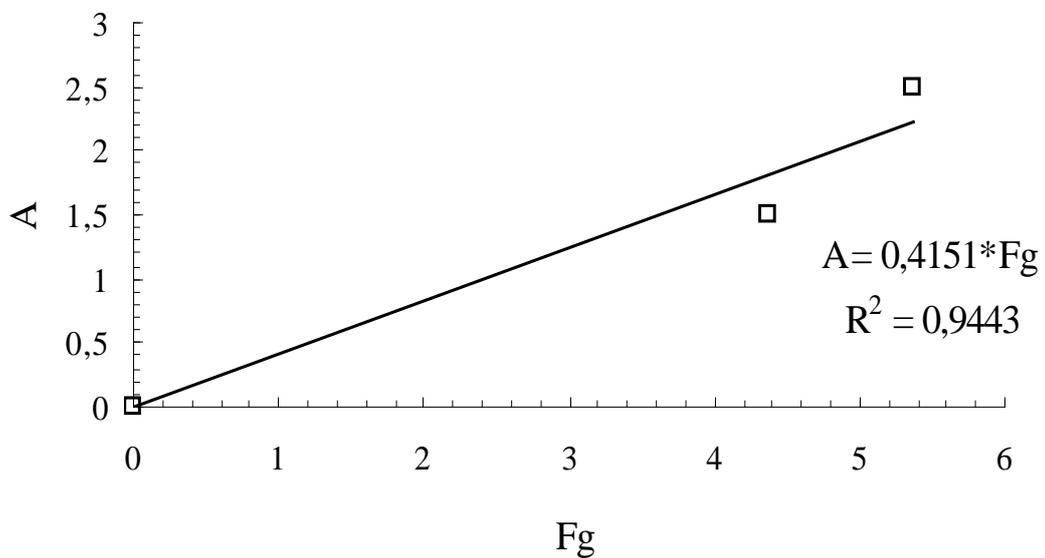
<b>N(tr/mn)</b>	<b>tc(s) mobile I</b>	<b>tc(s) mobile II</b>	<b>tc(s) mobile III</b>	<b>tc(s) mobile IV</b>	<b>tc(s) mobile V</b>	<b>tc(s) mobile VI</b>
250		16	6.5	14	22	13
300		12.5	6	11	18	10.6
400		8	4	8	14	8
500	51	7	3.2	6	10	6.3
600	38	5.5	2.6	5	9	5
700	34	5	2	4.3	8	4.5
800	26	4.2	1.8	4	7.5	3.7
900	22	3.7	1.6	3.5	7	3.6
1000	20	3.2	1.4	3.2	6	3.3
1100	18			3	5	3.2
1200	16			2.8	4.5	2.5
1300	15			2.7	4	2.5

## ANNEXE II- 5

Courbes d'ajustement de A en fonction de Fg pour la détermination du coefficient de proportionnalité K



**Cas des hélices marines**



**Cas des turbines**

**Fig.7 : Variation de A en fonction de Fg**

## ANNEXE II- 6

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans le tableau ci dessous on a donné les valeurs du temps de mélange (tm) déterminées à partir des courbes de DTS pour tous les mobiles utilisés.

**TABLEAU N°2 : Valeurs expérimentales du temps de mélange**

<b>N(tr/mn)</b>	<b>tm(s) mobile I</b>	<b>tm(s) mobile II</b>	<b>tm(s) mobile III</b>	<b>tm(s) mobile IV</b>	<b>tm(s) mobile V</b>	<b>tm(s) mobile VI</b>
250		100	76	117	276	80
300		95	62.5	106	232	61
400		90	29.2	85	158	57.5
500	312	80	28.4	69	109	41
600	204	65	27	51	105	29
700	129	62.5	20.6	41	111	29
800	130	55	20	40	121	22.5
900	156	37.5	17.2	40	80	23
1000	120	32.5	14	39	75	15
1100	120			38	90	22.5
1200	106			39	75	19.5
1300	96			38	70	18

# *Chapitre III*

## *Modélisation*

## SOMMAIRE

I INTRODUCTION	82
II PRESENTATION DES MODELES IDEAUX	83
II-1 MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE.	83
II-2 MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE ET RECIRCULATION TOTALE	85
II-3 MODELE DES MELANGEURS EN CASCADE	86
III SYNTHESE DES TRAVAUX.	87
IV PARTIE EXPERIMENTALE	91
IV-1 APPLICATION DU MODELE DE DISPERSION AXIALE AVEC RECIRCULATION TOTALE	91
IV-1-1 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE D'AGITATION SUR LE NOMBRE DE BODENSTEIN.	92
IV-1-2 INFLUENCE DE LA COURBURE DES COUDES SUR LA DISPERSION DANS LE REACTEUR TORIQUE.	94
IV-2 APPLICATION DU MODELE DES REACTEURS AGITES EN SERIE.	97
CONCLUSION	100
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
ANNEXES	103

## **RESUME**

Le présent chapitre est consacré à l'étude du comportement hydrodynamique dans le réacteur torique fermé par deux modèles représentatifs : modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (MPDART) et modèle des mélangeurs en cascade avec recirculation totale (MMCRT).

Le but est d'examiner l'influence de la vitesse d'agitation ainsi que de la géométrie des coudes sur le phénomène de dispersion à l'intérieur du réacteur par application du modèle MPDART.

Par ailleurs le modèle MMCRT a permis de déterminer le nombre de réacteurs en série qui représente le réacteur torique utilisé

## I INTRODUCTION

Comme la méthode des traceurs a permis de déterminer les courbes expérimentales de la distribution des temps de séjours, nous nous sommes donc posés le problème de rendre compte de l'allure observée au moyen de modèles hydrodynamiques simples permettant de prédire par la suite la conversion et servir de base à l'extrapolation du réacteur.

Le processus de mélange dans les réacteurs à boucle est dû à deux effets fondamentaux [1] :

- Mélange longitudinal pour chaque circulation.
- Inter-mélange (backmixing) dû à la recirculation

Le mélange longitudinal dans la circulation du fluide est causé par la différence de vitesse des lignes de courant, la diffusion moléculaire, la turbulence et les tourbillons secondaires le long de la boucle de circulation.

L'existence des tourbillons à l'intérieur du réacteur induit un écoulement turbulent, par référence à la théorie[2] on conçoit que le régime turbulent soit celui qui a le plus de similitude avec l'écoulement piston retenu comme modèle, ceci est d'autant plus vrai que l'écoulement sera plus turbulent.

On peut donc rattacher quantitativement ces deux types d'écoulement et de considérer le régime turbulent comme addition d'un écoulement piston de même vitesse moyenne et d'un phénomène de diffusion moléculaire dans la direction axiale. Ce dernier est gouverné par la loi de FICK.

Tous ces effets font que l'écoulement au sein du réacteur à boucle est tellement complexe qu'il est très difficile d'avoir une approche précise de son comportement réel.

Nous avons donc été amenés à considérer les modèles élémentaires connus pour les cas idéaux :

- Modèle piston avec dispersion axiale
- Modèle des mélangeurs en cascade

## II- PRESENTATION DES MODELES IDEAUX

### II-1 MODELE PISTON AVEC DISPERSION AXIALE.

Ce modèle a été utilisé avec succès depuis une quarantaine d'années pour caractériser des écoulements très diversifiés [3] tels que : écoulement axial dans des conduites vides écoulement dans des lits fixes ou fluidisés, hydrodynamique dans une cellule de Couette-Taylor.

Ce modèle consiste à superposer à l'écoulement piston convectif de vitesse axiale  $U_z$  une dispersion aléatoire dans le sens de l'écoulement due aux fluctuations locales de la composante axiale de vitesse obéissant à la loi de FICK [4 ] dont le flux axial est donné par :

$$F = U_z C - D_{ax} \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1)$$

avec :

$D_{ax}$  : coefficient de dispersion axiale ou longitudinale dépendant des conditions d'écoulement.

$U_z$  : Vitesse axiale moyenne.

$C$  : concentration du traceur.

$Z$  : coordonnée spatiale dans le sens de l'écoulement.

Les variations de la concentration du traceur en fonction du temps sont décrites par l'équation du bilan de matière suivante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ax} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - U_z \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (2)$$

On distingue essentiellement trois cas qui diffèrent par les conditions aux limites régnant au point d'injection du traceur ( $Z=0$ ) et au point de mesure de la réponse ( $Z=L$ ) :

**1<sup>er</sup> cas** : écoulement dit ouvert à la dispersion : pour lequel le phénomène de dispersion axiale s'étend aux zones situées respectivement avant le détecteur d'entrée et après le détecteur de sortie.

**2<sup>eme</sup> cas** : écoulement dit fermé à la dispersion : pour lequel la dispersion axiale est limitée à la région située entre les deux détecteurs.

**3<sup>eme</sup> cas** : écoulement dit semi – ouvert.

Dans le cas d'un réacteur ouvert à la dispersion, et dans un système de coordonnée X se déplaçant à la vitesse moyenne  $U_z$  du fluide, l'équation du bilan de matière devient :

$$D_{ax} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

avec :

$$X = Z - U_z t.$$

Si l'on suppose qu'initialement,  $N_0$  moles de traceur par unité de section sont injectées en  $X=0$ , la solution de l'équation N°3 est :

$$C = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi D_{ax} t}} \exp\left[\frac{-X^2}{4D_{ax} t}\right] \quad (4)$$

En introduisant l'abscisse axiale  $Z=X+U_z t$ , avec  $Z= U_z t_c$  Soit  $X= U_z (t_c-t)$

La concentration en fonction du temps à la sortie sera :

$$C = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi D_{ax} t}} \exp\left[\frac{-U_z^2 (t_c - t)^2}{4D_{ax} t}\right] \quad (5)$$

Par définition si tout le traceur est réparti entre  $Z=0$  et  $Z=L$ , on a :  $C_0 = \frac{N_0}{L}$

D'où :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{L}{\sqrt{4\pi D_{ax} t}} \exp\left[\frac{-U_z^2 (t_c - t)^2}{4D_{ax} t}\right] \quad (6)$$

En introduisant le nombre de Bodenstein ( $Bo$ ) comme paramètre adimensionnel défini par :

$$Bo = \frac{U_z L_t}{D_{ax}} \quad (7)$$

La fonction de distribution de temps de séjours est donnée par :

$$E(t) = \frac{1}{t_c} \frac{C}{C_0} \quad (8)$$

Avec  $t_c = \tau$

A partir des équations N°7 et N°8, l'équation N°6 devient :

$$E(t) = \frac{1}{t_c} \frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Bo}{t \tau}} \exp\left[\frac{-Bo(t_c - t)^2}{4 t \tau}\right] \quad (9)$$



or la concentration mesurée est égale à la somme de toutes les concentrations en ces différents points  $Z=L_t, Z=2L_t, Z=3L_t, \dots, jL_t$ .

$$\frac{C(\theta)}{C_o} = \sqrt{\frac{Bo}{4\pi\theta}} \sum_{j=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{Bo(j-\theta)^2}{4\theta}\right] \quad (13)$$

Ce modèle permet de déterminer le nombre de Bodenstein (Bo) qui peut être considéré comme étant le rapport entre la vitesse de transport par convection et la vitesse de transport par dispersion dont la signification peut être divisé en deux :

- Bo tend vers l'infini : la dispersion est négligeable par rapport à la convection donc écoulement Piston.
- Bo tend vers zéro : la convection est beaucoup plus faible que la dispersion alors on a mélange global dans la région d'écoulement.

Ce modèle permet donc à partir de la détermination du nombre de Bodenstein de calculer le coefficient de dispersion longitudinale, ce dernier a la même dimension que le coefficient de diffusivité mais il est généralement plus grand que le coefficient de diffusion car il comprend différents effets à savoir (différences de vitesse, présence de coudes) causant ainsi la déviation par rapport à l'écoulement piston.

### II-3 MODELE DES MELANGEURS EN CASCADE

La cascade de réacteurs agités permet de réaliser la transition entre les performances du réacteur agité et celles du réacteur piston [4]. On peut représenter l'écoulement du fluide dans un réacteur réel en assimilant celui-ci à une cascade de n réacteurs agités en série de même volume total.

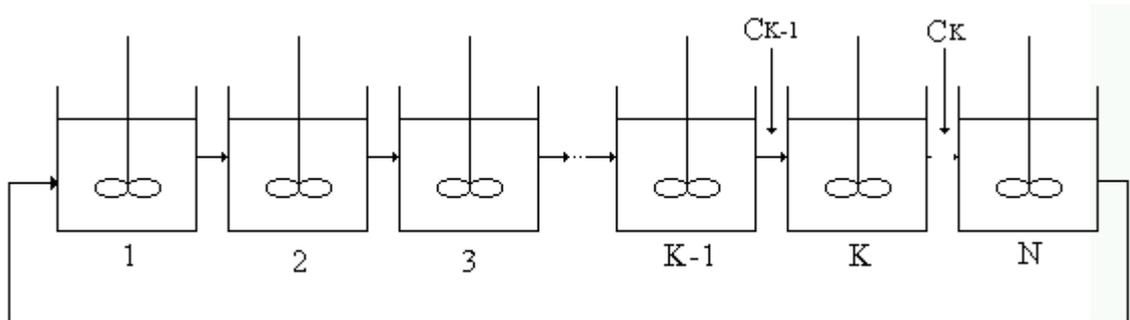
Le seul paramètre caractérisé par ce modèle est le nombre de réacteurs en série noté (n). La fonction de distribution des temps de séjour est la suivante :

$$\frac{C(\theta)}{C_o} = \frac{n^n \theta^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-n\theta) \quad (14)$$

n=1 correspond bien entendu au réacteur agité unique.

Quand n tend vers l'infini, on se rapproche de l'écoulement piston et les courbes de distribution des temps de séjours sont voisines de Gaussiennes symétriques.

Dans un système à recirculation (figure 2), on aura une réponse à chaque passe du traceur et la réponse dans ce cas serait la somme de toutes les contributions à partir de la première, seconde, jusqu'à la m passes.



**Fig. 2 : Modèle des mélangeurs en cascade avec recirculation totale**

La réponse dans ce cas est donnée par [6]:

$$\frac{C(\theta)}{C_0} = n \exp(-n\theta) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(n\theta)^{m n-1}}{(m n - 1)!} \quad (15)$$

Maintenant que nous avons présenté les différents modèles idéaux existant dans la théorie, nous allons effectuer la synthèse de l'ensemble des travaux consacrés à l'étude du comportement de l'écoulement et du mélange dans les réacteurs à boucle objet de cette étude, par analogie aux réacteurs agités. Mais il est important de noter que très peu d'études ont été réalisées dans ce domaine.

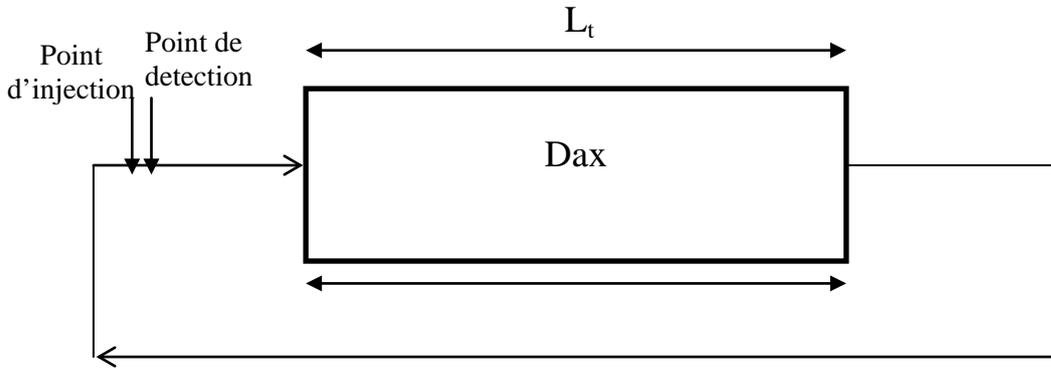
### III SYNTHÈSE DES TRAVAUX.

VONCKEN et coll [5] en 1963 furent les premiers à proposer le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale pour modéliser 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 peu 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.

Le modèle proposé décrit la région de circulation par un tube infiniment long ou on a une dispersion longitudinale et une recirculation du fluide, l'équation décrivant ce modèle est la même que celle déjà citée (équation N°13) seulement, le traceur dans ce cas est injecté et détecté au même point (figure 3) donc nous avons un écoulement fermé à la dispersion



**Fig. 3 : Modèle de piston avec dispersion axiale et recirculation totale.**

Ces auteurs ont remarqué que pour un nombre de Reynolds de mélange supérieur à  $2.10^4$ , le nombre de Bodenstein est indépendant de la vitesse d'agitation, par contre il est proportionnel au rapport de diamètre du mobile sur le diamètre du réacteur ( $d_1/d_t$ ). Les résultats obtenus par ce modèle ont été comparés à ceux obtenus par le modèle des mélangeurs en cascade, ils trouvent que le nombre de réacteurs agités est égal à la moitié du nombre de Bodenstein .

$$n = \frac{Bo}{2} \quad (16)$$

Le nombre de réacteurs agités déterminé dans ce cas est situé entre 15 à 20.

TAKAO et coll.[7] ont donné la solution mathématique générale à une injection impulsion d'un traceur dans un réacteur à boucle. La spécificité de ce cas réside dans le fait que le point d'injection est différent du point de détection.

Dans cette étude la solution mathématique proposée est pour des conditions aux limites ouvert à la dispersion et recirculation totale, donnée par les coordonnées spatio-temporelles est :

$$\frac{C(z_m^*, \theta)}{C_0} = \sum_{j=1} \left( \frac{Bo}{4\pi\theta} \right)^{0.5} \exp\left( \frac{-Bo(j + z_m^* - \theta)^2}{4\theta} \right) \quad (17)$$

Avec :  $z_m^* = \frac{z_m}{L_t}$

La solution de VONCKEN est un cas particulier de cette équation pour lequel  $z_m^* = 0$ .

BELLEVILLE et coll.[8] ont choisi le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale pour déterminer le nombre de Bodenstein et le coefficient de dispersion axiale pour différentes vitesses d'agitation et différentes hélices marines dans un réacteur torique fermé.

Ils ont trouvé que le nombre de Bodenstein et le nombre de Peclet sont indépendants du nombre de Reynolds de mélange et des caractéristiques géométriques de l'hélice utilisée.

Le nombre Bodenstein obtenu est de l'ordre de 100 à 120. Par analogie au modèle de la cascade l'écoulement dans le réacteur peut être représenté par une série de 50 à 60 réacteurs agités, ce résultat permet d'assimiler l'écoulement dans le réacteur à boucle à un écoulement piston.

Le coefficient de dispersion axiale a été corrélé par :

$$D_{ax} = 0.14 d_t U \quad (18)$$

U : vitesse moyenne de circulation.

Pour un nombre de Bodenstein supérieur à 30 la relation suivante a été établie :

$$\frac{N_{\theta}}{Bo} = 0.133 \quad (19)$$

L'objectif de l'étude entreprise par BENKHALIFA et coll.[9] est la détermination du type d'écoulement et des caractéristiques du mélange dans le réacteur torique continu et fermé par différents modèles représentatifs.

Pour le réacteur torique fermé, le modèle choisi étant le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale.

Pour le réacteur torique ouvert, deux modèles d'écoulement ont été utilisés pour décrire le fonctionnement :

**1<sup>er</sup> modèle :** Ils ont considéré que les réacteurs de forme toroïdale sont représentés par un écoulement piston avec dispersion axiale et recyclage d'une partie du courant.

**2<sup>ème</sup> modèle :** Ce modèle a été utilisé par KERSTING et coll.[10] en 1995 pour représenter les réacteurs bouclés à vis, il tient compte des positions respectives de l'alimentation et du soutirage. Le réacteur est divisé en deux zones, une zone de circulation et une zone d'agitation.

En conclusion à cette étude, il ressort que les modèles choisis pour les deux configurations sont en bonne adéquation avec les valeurs expérimentales. Le passage du réacteur torique fermé au réacteur torique ouvert ne perturbe pas l'écoulement à l'intérieur du réacteur. En mode continu, les deux modèles utilisés sont satisfaisants, mais le second modèle apporte plus d'informations sur l'écoulement.

KAWASE et coll.[11] ont proposé dans le cas d'un réacteur agité de configuration standard, d'une part une équation reliant le coefficient de dispersion axiale  $D_{ax}$  aux conditions d'agitation par :

$$D_{ax} = 0.422 d_1^2 N \quad (20)$$

et d'autre part, ils ont corrélié le temps de mélange au coefficient de dispersion axiale par :

$$t_m = \frac{2 d_t}{D_{ax}} \quad (21)$$

JOSHI et coll[12] a proposé une relation empirique reliant la vitesse d'agitation au coefficient de dispersion axiale déterminé dans le cas de réacteur agité de configuration géométrique standard ( $H = d_t$  et  $d_1 = d_t / 3$ ). Cette dernière est donnée par :

$$D_{ax} = 0.465 d_1^2 N \quad (22)$$

NOURI [13] a caractérisé l'écoulement et le mélange dans les différents réacteurs à boucle fermé (cités au chapitre I) par le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale. Il a trouvé que le nombre de Bodenstein et le nombre de Peclet sont indépendants du nombre de Reynolds de circulation et des dimensions des hélices marines, et par analogie au réacteurs agités en série, il a représenté les réacteurs à boucle par une série d'au moins 50 réacteurs agités. Il a aussi corrélié le coefficient de dispersion axiale par :

$$D_{ax} = 0.135 d_1^2 N \quad (23)$$

## IV PARTIE EXPERIMENTALE

### IV-1 APPLICATION DU MODELE DE DISPERSION AXIALE AVEC RECIRCULATION TOTALE

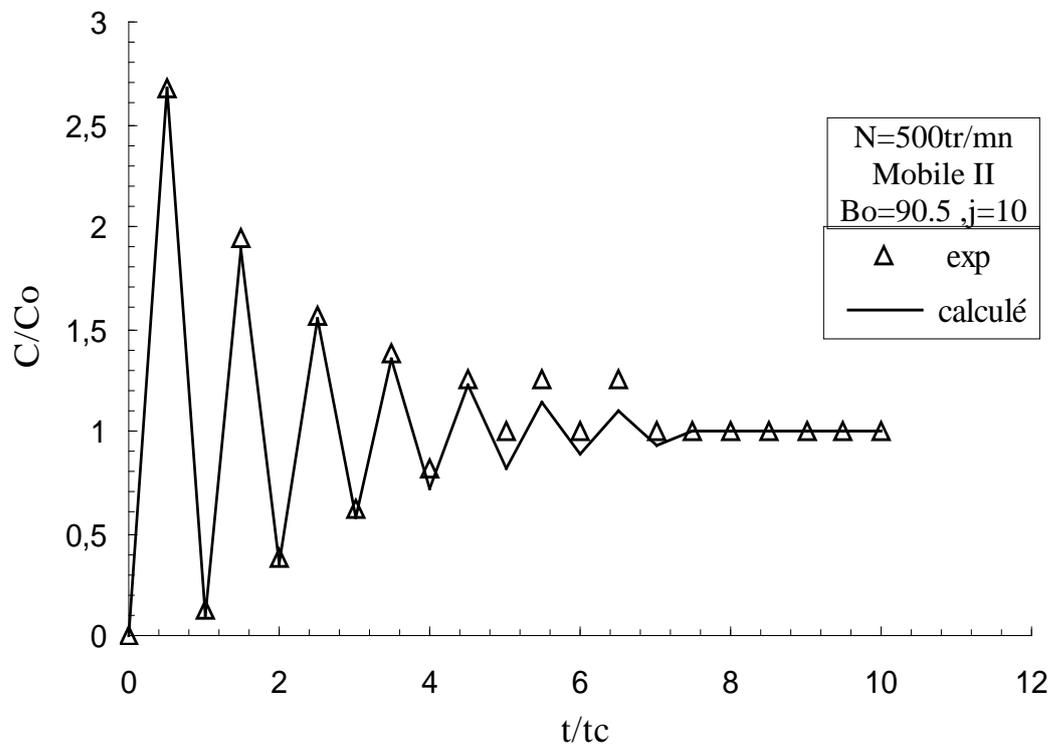
L'application de ce modèle à nos résultats expérimentaux permet de déterminer un paramètre caractéristique qui est le nombre de Bodenstein d'ou le coefficient de dispersion.

Ce paramètre est obtenu après superposition des courbes expérimentales et celles du modèle donnée par l'équation N°13. Les valeurs expérimentales de  $C/C_0$  ainsi que l'organigramme de détermination de  $Bo$  sont donnés en annexe III-1et III- 2. Sur la figure 4 nous avons donné un exemple qui représente graphiquement les résultats de cette modélisation et ce pour différentes vitesses d'agitation et hélices marines dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous.

**TABLEAU 1 : Caractéristiques géométriques des hélices marines utilisées**

Hélices marines	I	II	III
$d_1$ (mm)	50	75	50
$d_2$ (mm)	12	12	12
$\varphi$	$30^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$

L'ensemble des courbes obtenues sont données en annexe III-4



**Fig. 4: Représentation des valeurs de  $C/C_0$  expérimentales et calculées**

#### IV-1-1 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE D'AGITATION SUR LE NOMBRE DE BODENSTEIN.

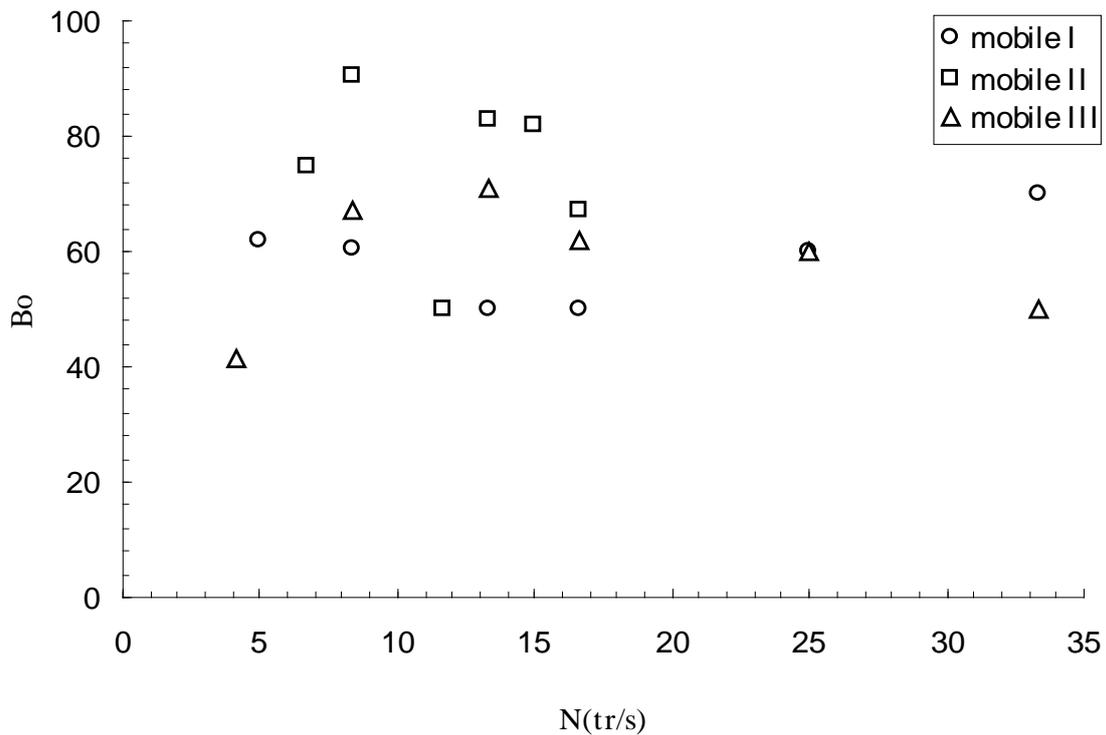
Les valeurs expérimentales du nombre de Bodenstein et du coefficient de dispersion obtenues sont rassemblées dans le tableau N°2

**TABLEAU 2 : Valeurs du nombre de Bodenstein et du coefficient de dispersion pour les différentes hélices utilisées.**

MOBILE I			MOBILE II			MOBILE III		
N (tr/mn)	Bo	Dax (cm <sup>2</sup> /s)	N (tr/mn)	Bo	Dax (cm <sup>2</sup> /s)	N (tr/mn)	Bo	Dax (cm <sup>2</sup> /s)
300	62	24.57	400	75	63.48	250	41	32.78
500	60	44.97	500	90	65.76	500	67	47.37
800	50	89.62	700	50	190.44	800	71	67.06
1000	50	117.19	800	83	127.47	1000	62	94.51
1500	60	158.70	900	82	145.15	1500	60	117.55
2000	70	170.04	1000	67	203.03	2000	50	190.44

On constate donc que le nombre de Bodenstein est relativement indépendant de la vitesse d'agitation (figure5) et est égal en moyenne à 59, 74, 59 respectivement pour les hélices marines I, II, III, aussi il augmente avec l'augmentation du diamètre du mobile d'agitation par contre il reste relativement constant quand on change l'angle d'inclinaison des pales.

Les valeurs de Bo obtenues dans notre réacteur sont supérieures à 50, ce qui permet de caractériser l'hydrodynamique à l'intérieur par un écoulement proche de l'écoulement piston.



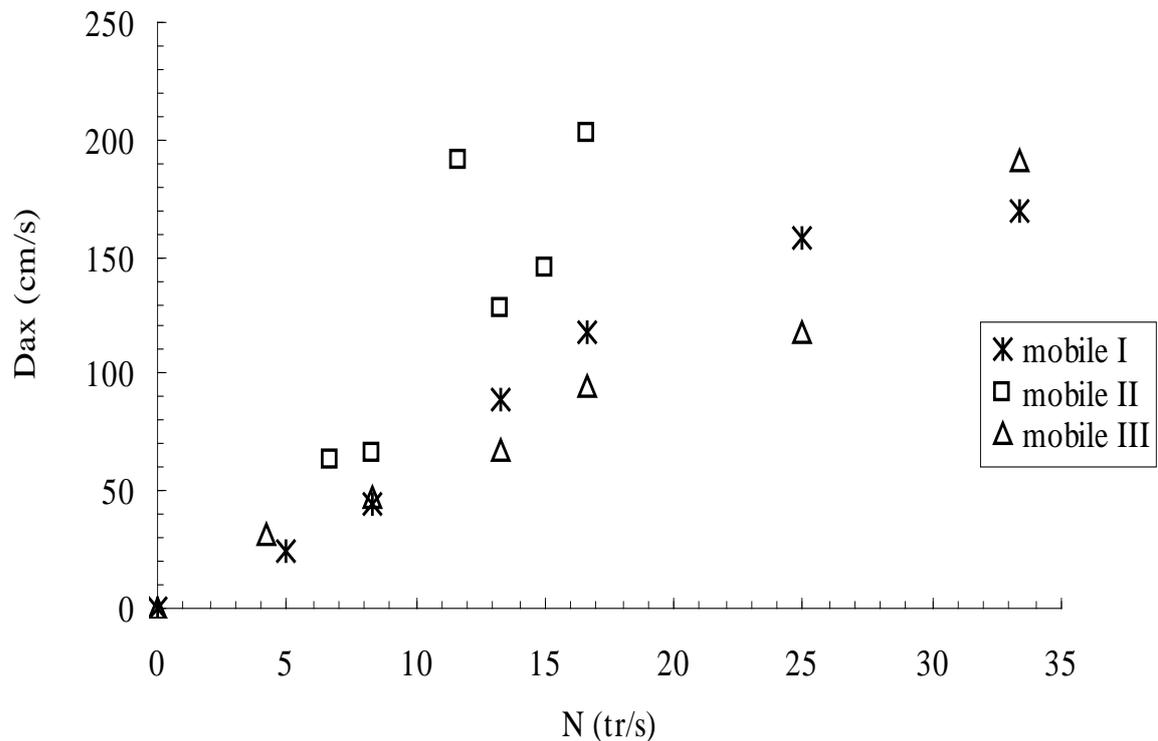
**Fig. 5 : Variation du nombre de Bodenstein en fonction de la vitesse d'agitation**

Sur la figure 6 nous avons représenté la variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation pour les différentes hélices marines.

Nous observons que ce coefficient de dispersion augmente avec l'augmentation de la vitesse d'agitation. Pour une vitesse de rotation donnée, le coefficient de dispersion augmente avec le diamètre du mobile ceci est conforme aux résultats de HAMMANI[14] et semble relativement diminuer avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison des pales, cette dernière constatation doit être validée pour d'autres mobiles.

Sur la base des résultats trouvés dans la littérature et après plusieurs essais, une relation empirique est proposée et permet d'avoir le coefficient de dispersion pour les différents mobiles utilisés, cette dernière est donnée par :

$$D_{ax} = 0.2d_1^2N \quad (24)$$



**Fig. 6 : Variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation**

La corrélation donnée par l'équation N°24 représente de manière satisfaisante les résultats expérimentaux avec une marge d'erreur de 20% pour le mobile I et II et 10% pour le mobile III.

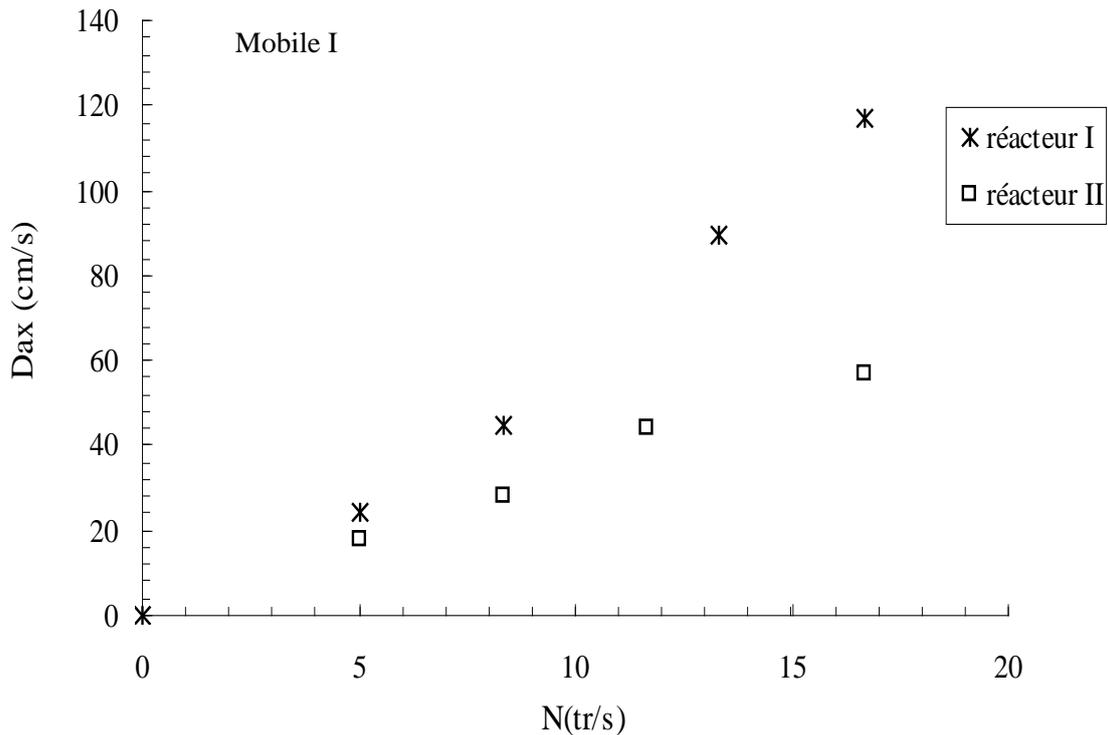
#### **IV-1-2 INFLUENCE DE LA COURBURE DES COUDES SUR LA DISPERSION DANS LE REACTEUR TORIQUE.**

Afin d'étudier l'effet des coudes sur le phénomène de dispersion à l'intérieur du réacteur torique, nous avons comparé nos résultats expérimentaux à ceux obtenus dans un réacteur torique à grand rayon de courbure [14].

**TABLEAU 3 : Caractéristiques des deux réacteurs.**

	coude	$d_t$ (mm)	$V_R$ (litre)	$L_t$ (mm)
<b>Réacteur I</b>	45°	90	8	1380
<b>Réacteur II[14]</b>	90°	80	14.5	2900

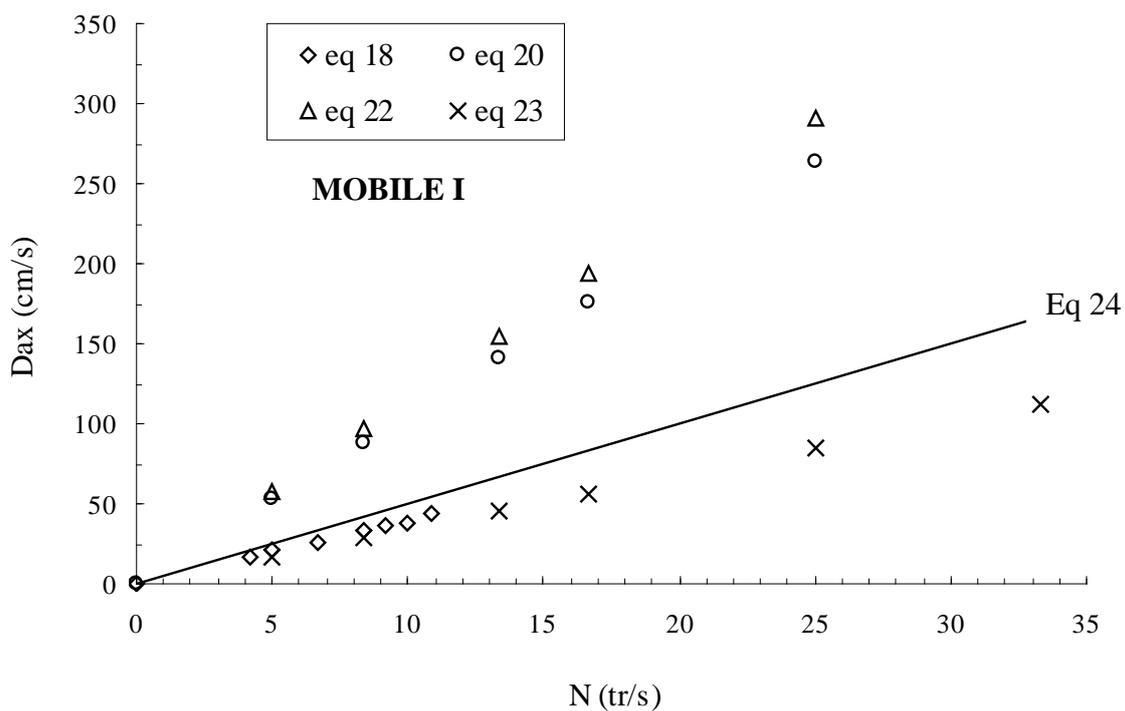
D'après la figure 7, on constate que les valeurs de  $D_{ax}$  sont plus élevées dans le réacteur I, ceci est causé par l'augmentation de la structure tourbillonnaire le long de la circonférence du réacteur torique I généré par l'hélice marine et entretenue par la courbure des coudes d'où une plus forte agitation. contrairement au réacteur II où l'aspect axial du mouvement prédomine ceci est dû à la présence de longueurs droites.



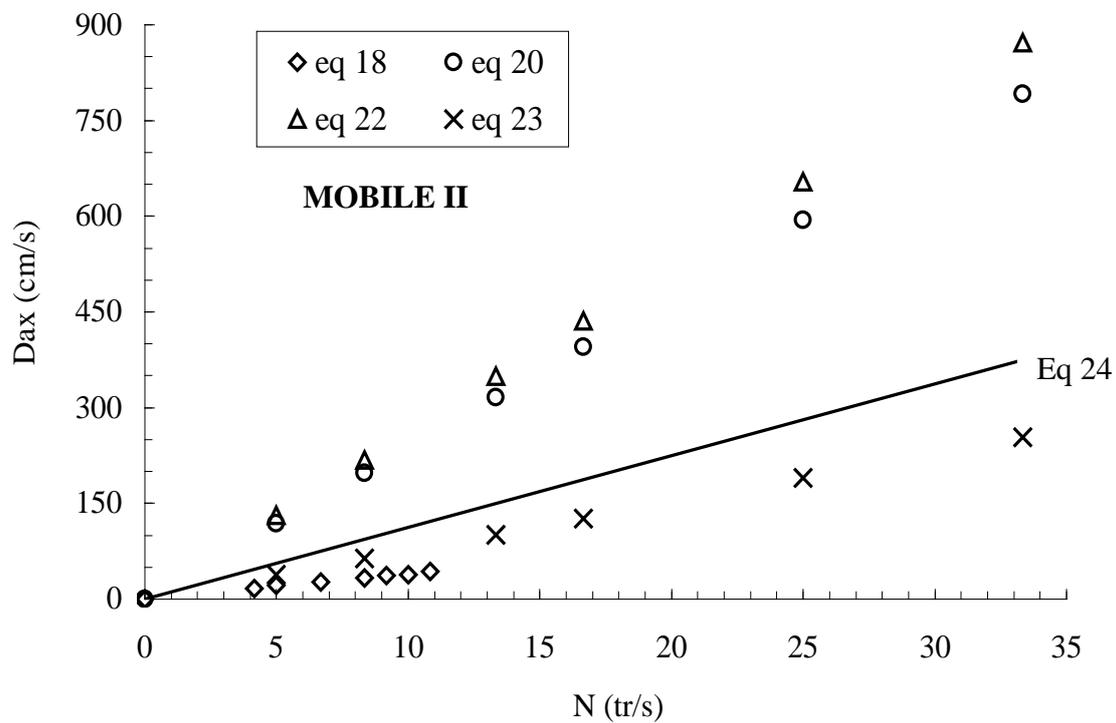
**Fig. 7 : Variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation dans deux réacteurs différents**

Afin de comparer nos résultats expérimentaux avec ceux donnés par les équations N°18, N°20, N°22, N°23 et notre relation, nous avons représenté sur les figures 8a-b la variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation.

On constate et ceci pour tous les mobiles d'agitation utilisés, que nos résultats expérimentaux présentent des valeurs de coefficient de dispersion faibles comparées à celles du réacteur agité, ce résultat est similaire à celui de BELLEVILLE [8] et élevées par rapport à celles du réacteur à boucle sous ces diverses formes, ceci peut être dû à l'existence de coudes qui ont tendance à diminuer l'aspect axial de l'écoulement d'où une dispersion plus grande.



( 8 a )



( 8 b )

**Fig. 8 : Variation du coefficient de dispersion en fonction de la vitesse d'agitation**

#### IV-2 APPLICATION DU MODELE DES REACTEURS AGITES EN SERIE.

Dans le paragraphe précédent nous avons caractérisé l'hydrodynamique dans le réacteur torique par un écoulement proche de celui de l'écoulement piston donc ce dernier peut être représenté par une série de réacteurs agités ; on s'est proposé d'appliquer le modèle des mélangeurs en cascade pour déterminer le nombre de réacteurs agités correspondant à notre réacteur torique. Les valeurs expérimentales de  $C/C_0$  ainsi que l'organigramme de détermination du nombre de réacteurs en série est donné en annexe III-3. La figure 9 est un exemple de courbe obtenue par superposition des résultats expérimentaux et calculés par le modèle. Le tableau N°4 regroupe l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus pour les différentes hélices .

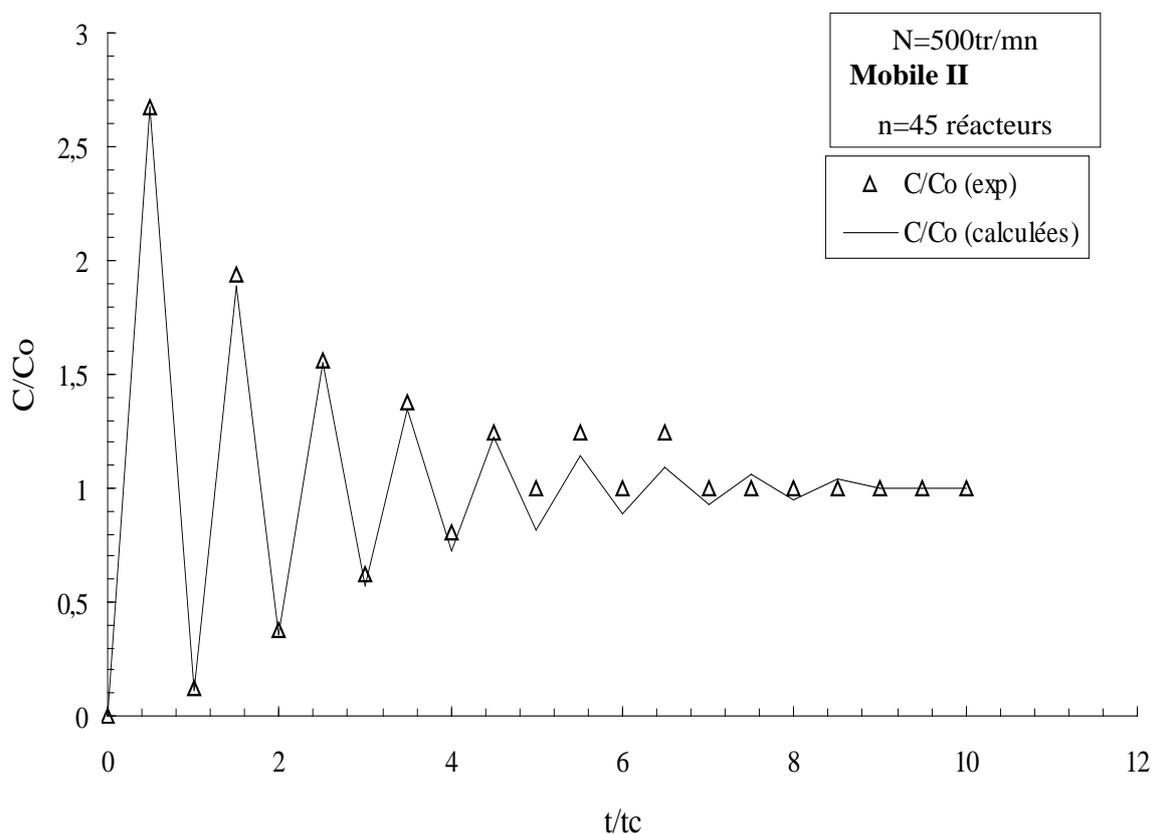


Fig.9 : Représentation des valeurs de  $C/C_0$  expérimentales et calculées

**TABLEAU 4 : Les valeurs de n et Bo pour les différents agitateurs.**

MOBILE I			MOBILE II			MOBILE III		
N (tr/mn)	n	Bo	N (tr/mn)	n	Bo	N (tr/mn)	n	Bo
300	30	62	400	26	75	250	28	41.5
500	33	60	500	45	90	500	35	67
800	26	50	700	26	50	800	35	71
1000	26	50	800	42	83	1000	30	62
1500	30	60	900	42	82	1500	25	60
2000	34	70	1000	35	67	2000	27	50

On remarque que le nombre de réacteurs en série est pratiquement indépendant de la vitesse d'agitation pour un mobile d'agitation donné, donc le réacteur torique peut être représenté en moyenne par 30, 36 et 30 réacteurs en série respectivement pour les mobiles I, II, III.

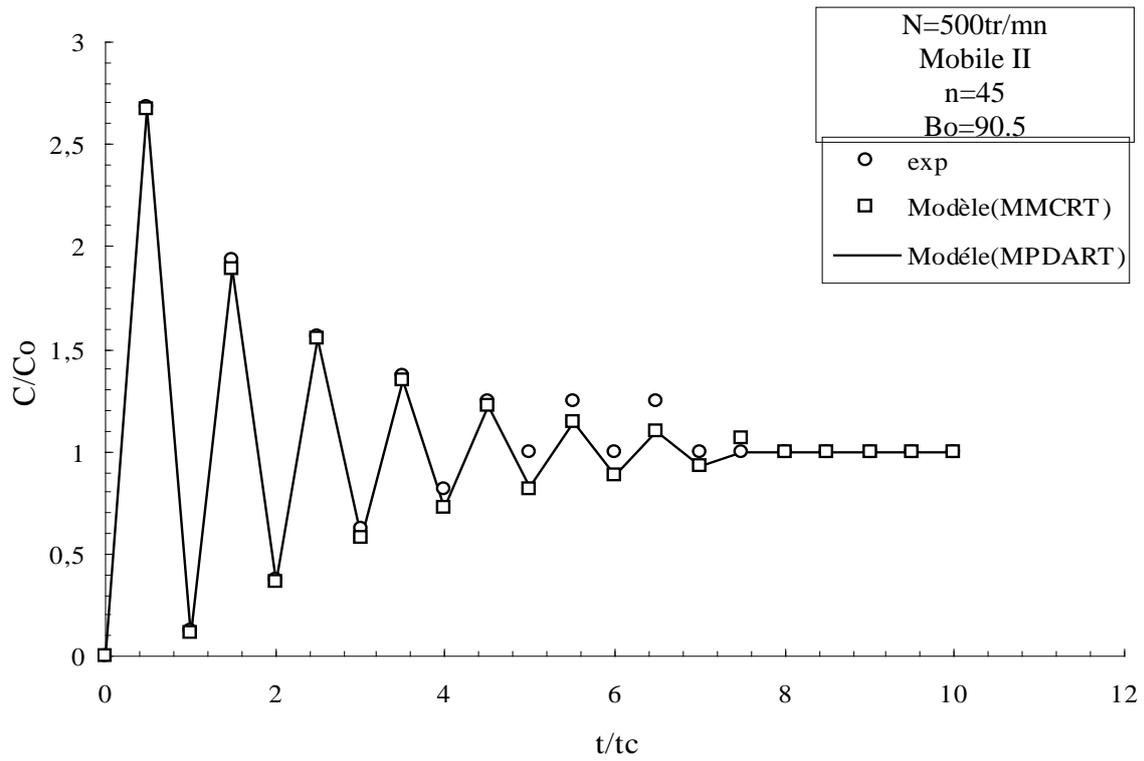
L'analyse des valeurs des paramètres caractéristiques données par les deux modèles permet de relier le nombre de Bodenstein au nombre de réacteurs en série par :  $n = \frac{Bo}{2}$ , ce résultat est similaire à celui de [5,8,13].

La représentation graphique donnée par la figure 10 permet de conclure que les modèles choisis représentent assez bien nos résultats expérimentaux. L'écart estimé est de :

6% pour le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (MPDART).

7% pour le modèle des mélangeurs en cascade (MMCRT).

L'ensemble de nos résultats est donné en annexe III- 5.



**Fig. 10 : Représentation des valeurs de C/Co obtenues par les deux modèles**

## CONCLUSION

L'étude de l'écoulement et du mélange dans le réacteur a été représentée par deux modèles à savoir : Modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (MPDART) et Modèle des mélangeurs en cascade (MMCRT).

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le nombre de BODENSTEIN ( $Bo$ ) est relativement indépendant de la vitesse d'agitation et est égal en moyenne à 60-80, cette valeur de  $Bo$  permet de caractériser l'hydrodynamique à l'intérieur du réacteur par un écoulement proche de l'écoulement piston.

Par ailleurs, nous avons observé que le coefficient de dispersion axiale ( $D_{ax}$ ) augmente linéairement avec la vitesse de rotation selon la relation suivante :  $D_{ax} = 0.2d_1^2N$ , et d'autre part en comparaison avec un réacteur torique à grand rayon nous avons constaté que les valeurs de  $D_{ax}$  sont plus élevées dans notre réacteur.

L'application du modèle MMCRT a permis de représenter le réacteur par une série de 30 à 36 réacteurs agités.

Les modèles choisis sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et l'écart estimé

est de 6% pour le modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale et de 7% pour le modèle des mélangeurs en cascade avec recirculation totale.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BLENKE. H.  
« Advances in biochemical Engineers »  
loop reactors, 13, 121, (1979).
- [2] TRAMBOUZE . P ; VAN LANDEGHEM. H ; WAUQUIER . J.P.  
« Les réacteurs chimiques, conception, calcul, mise en œuvre »  
Edition Technip, (1984).
- [3] LEGENTILHOMME . P ; BRUJES . L ; LEGRAND . J.  
« Distribution de temps de séjours du liquide en écoulement tourbillonnaire  
non- entretenu liquide-solide »  
Chem. Eng. Journal, 67, (2), 83-96, (1997).
- [4] VILLERMAUX . J.  
« Génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs. »  
Edition technique et documentation, LAVOISIER , (1982).
- [5] VONCKEN . R.M ; HOLMES . D . B ; DEN HARTOG . H .W.  
« Fluid flow in turbine stirred, baffled tanks – II Dispersion during circulation. »  
Chem Eng Science, 19, 209-213, (1964).
- [6] LEVENSPIEL .O.  
« Chemical Reaction Engineering »  
2eme Edition Jhon Wiley et Sons, INC , 290, (1972).
- [7] TAKAO . M ; HIROSET . T ; MURAKAMI . Y.  
« A Mathematical solution for response of tracer pulse in a loop reactor  
with open boundary and recycle. »  
C.E.S , 37, (5-J), 796-797, (1981).
- [8] BELLEVILLE . P ; NOURI . L ; LEGRAND . J.  
« Mixing characteristics in the torus reactor. »  
Chem. Eng. Technol 15, 282-289, (1992).
- [9] BENKHELIFA .H ; LEGRAND . J ; LEGENTILHOMME . P ; MONTILLET.A ;  
BELLEVILLE . P.  
« Modelling of continuous toroïdal reactors. »  
Récents Progrès en génie des procédés, 11, (51), 19-26, (1997).
- [10] KERSTING . CH ; PRUSS . J ; WARNECKE . H-J.  
« Residence time distribution of a screw loop reactor : Experiments and Modeling. »  
Chem . Eng . Science, 50, (2), 299-308, (1995).

- [11] KAWASE . Y ; MOO-YOUNG . M.  
« Mathematical models for design of bioreactors : Application of Kolmogoroff's theory of isotropic turbulence »  
The Chem Eng Journal, 43, B19-B41, (1990).
- [12] KHALID . A.  
« Etude de l'écoulement généré par une hélice dans un réacteur de forme toroïdale »  
Thèse de doctorat . Université de NANTES, (1993).
- [13] NOURI . L.  
« Etude des performances du réacteur torique. Application à l'hydrolyse Enzymatique des protéines de blé »  
Thèse de doctorat. Université de NANTES , (1994).
- [14] HAMMANI . S.  
« Caractérisation de l'écoulement et du mélange dans un réacteur torique »  
Mémoire de Magister. EMP Bordj- El- Bahri, (1999).

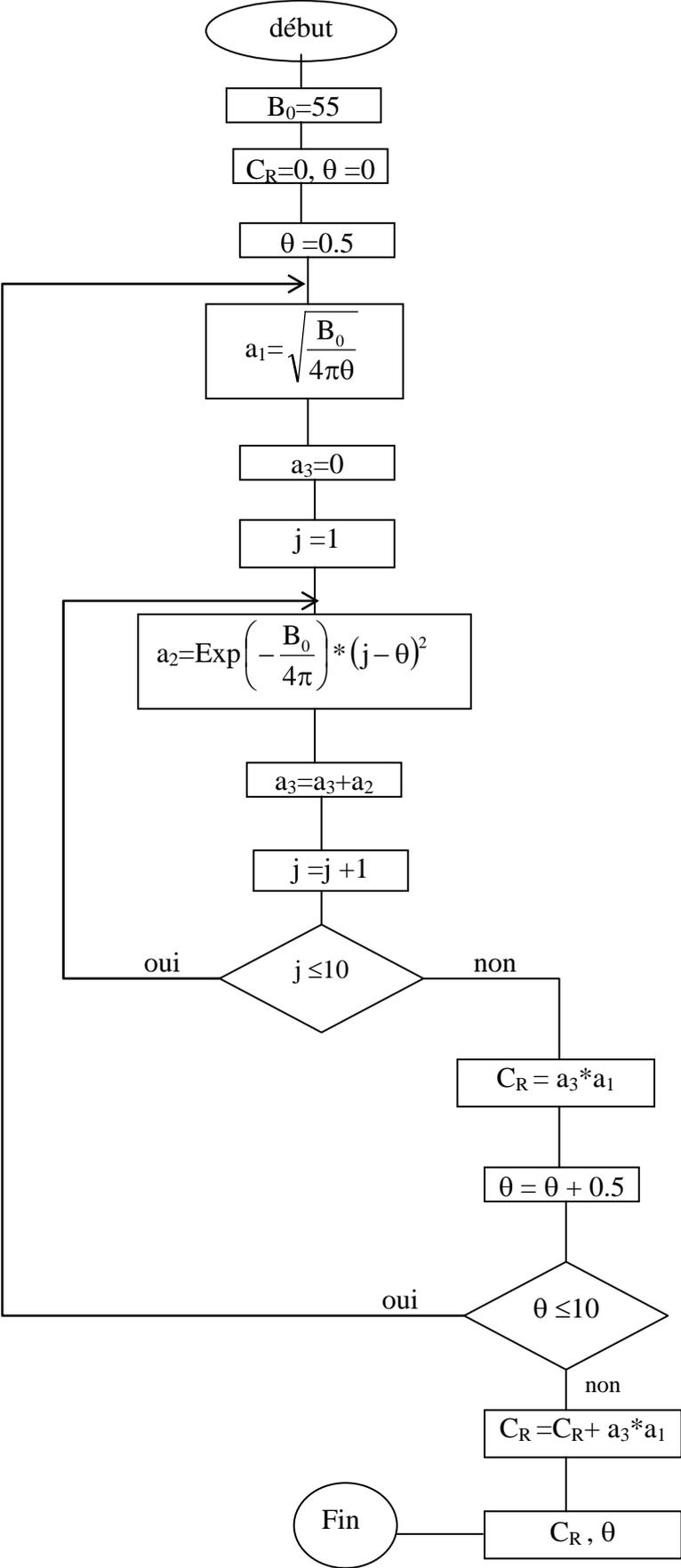
# *Annexes*



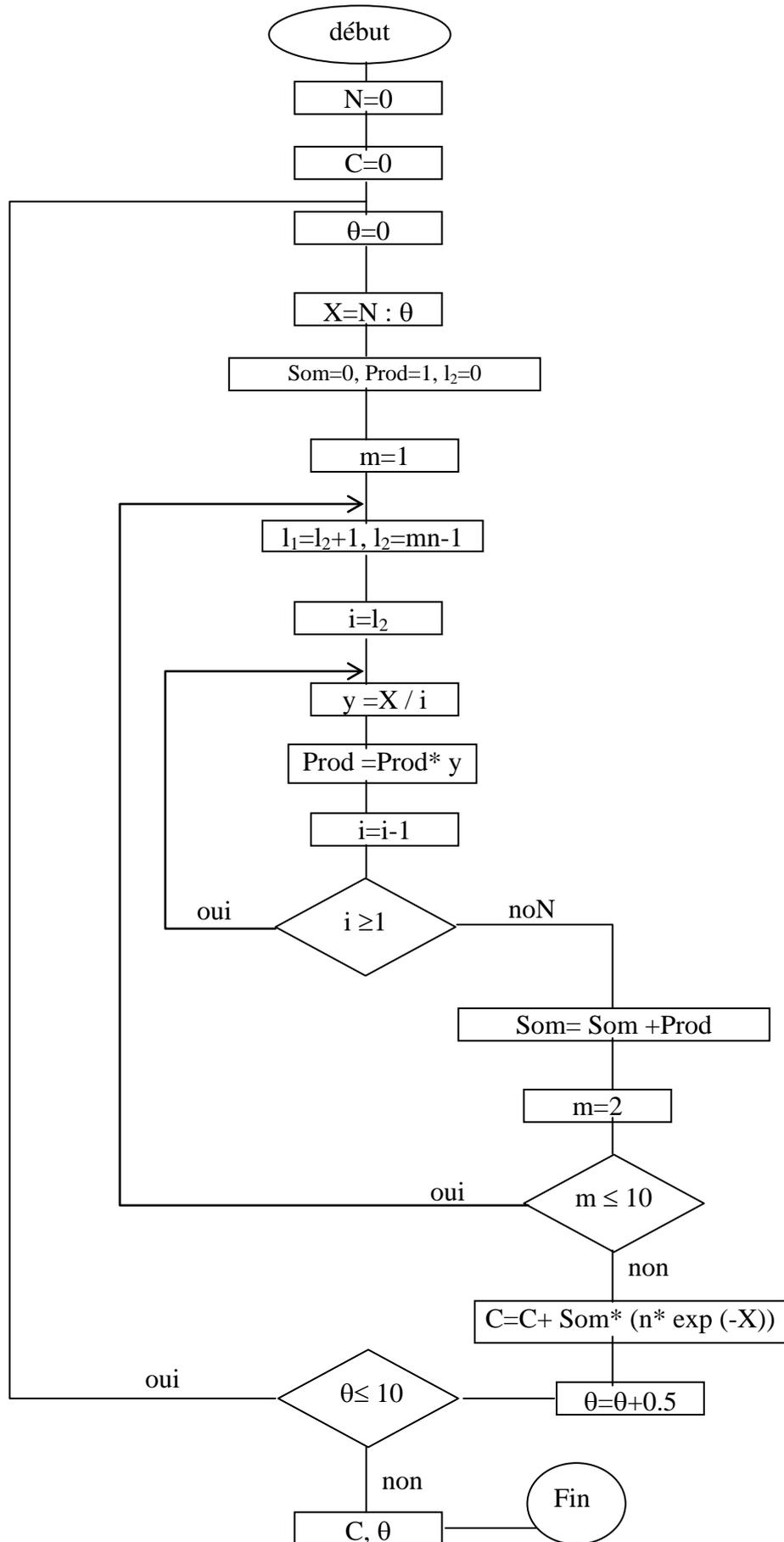




ANNEXE III-2



ANNEXE- III-3



### ANNEXE III-4

L'ensemble des résultats obtenus par application du modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (MPDART) et par le modèle des mélangeurs en cascade avec recirculation totale (MMCRT) ou (MMEC) et ce pour les différents mobiles d'agitation.

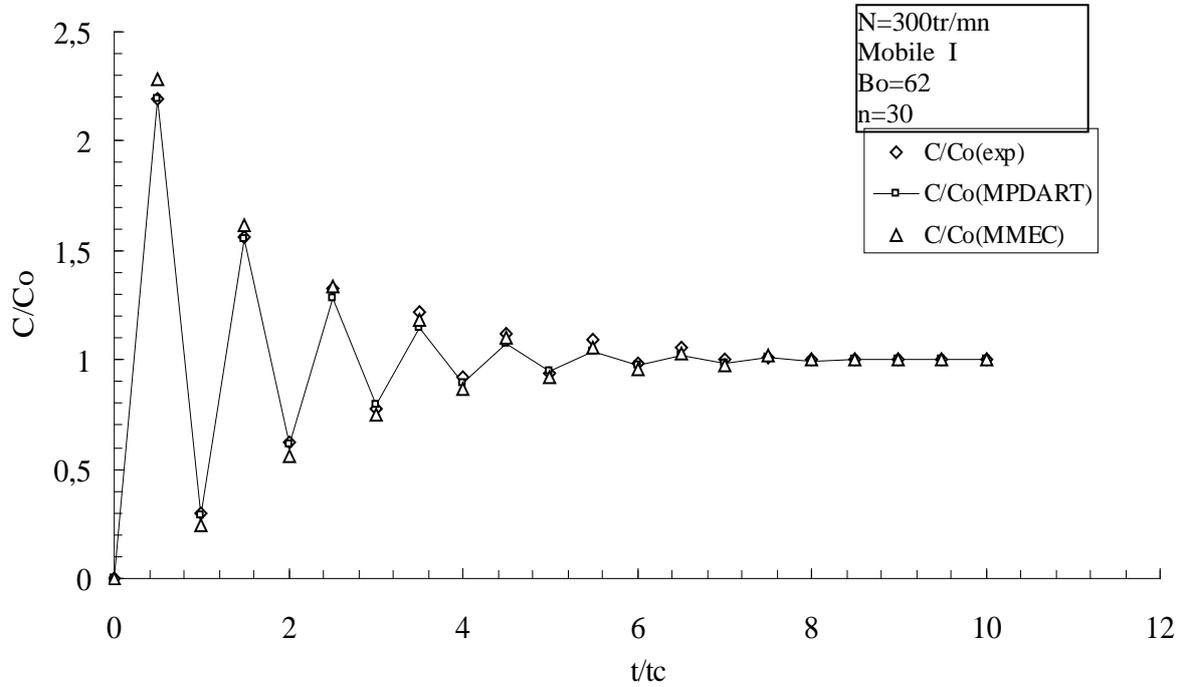
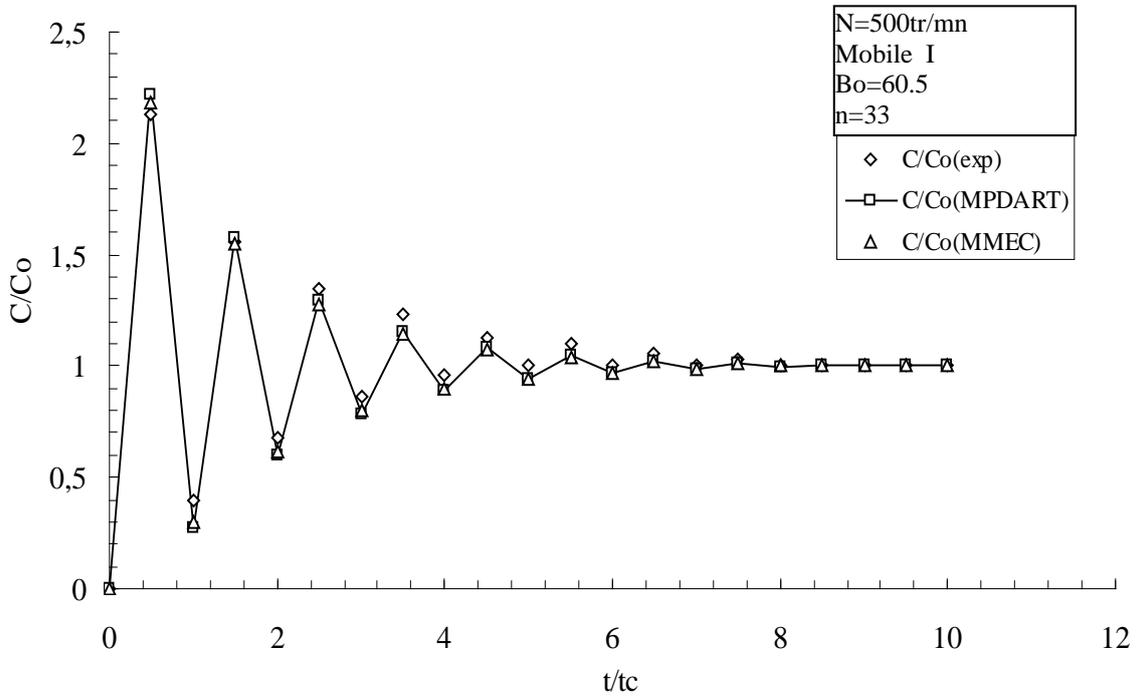
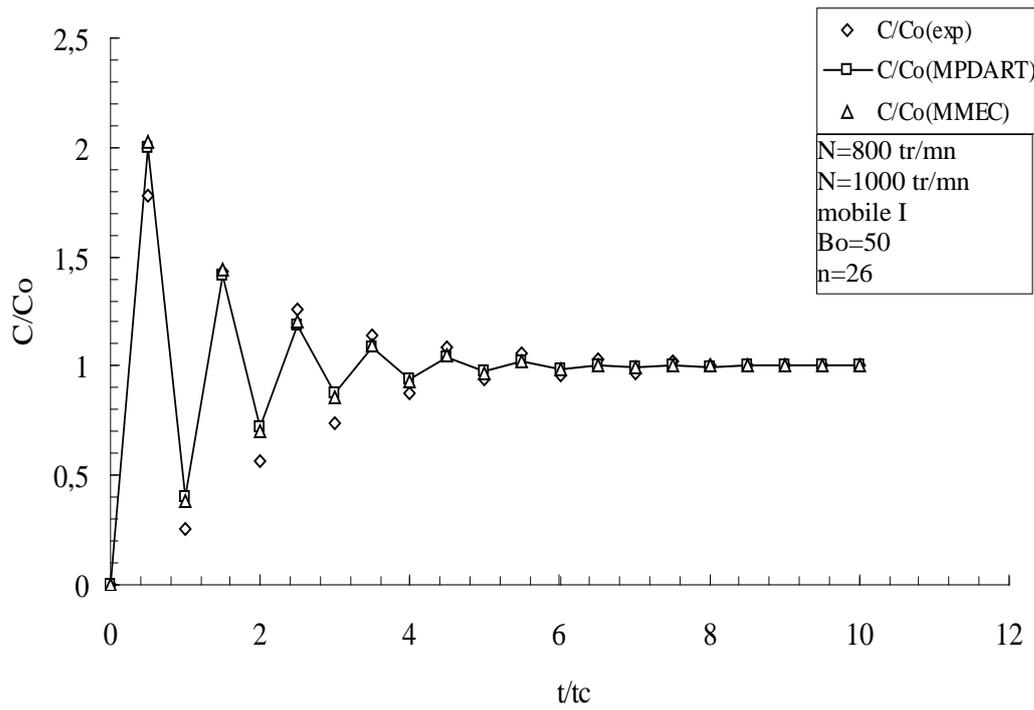


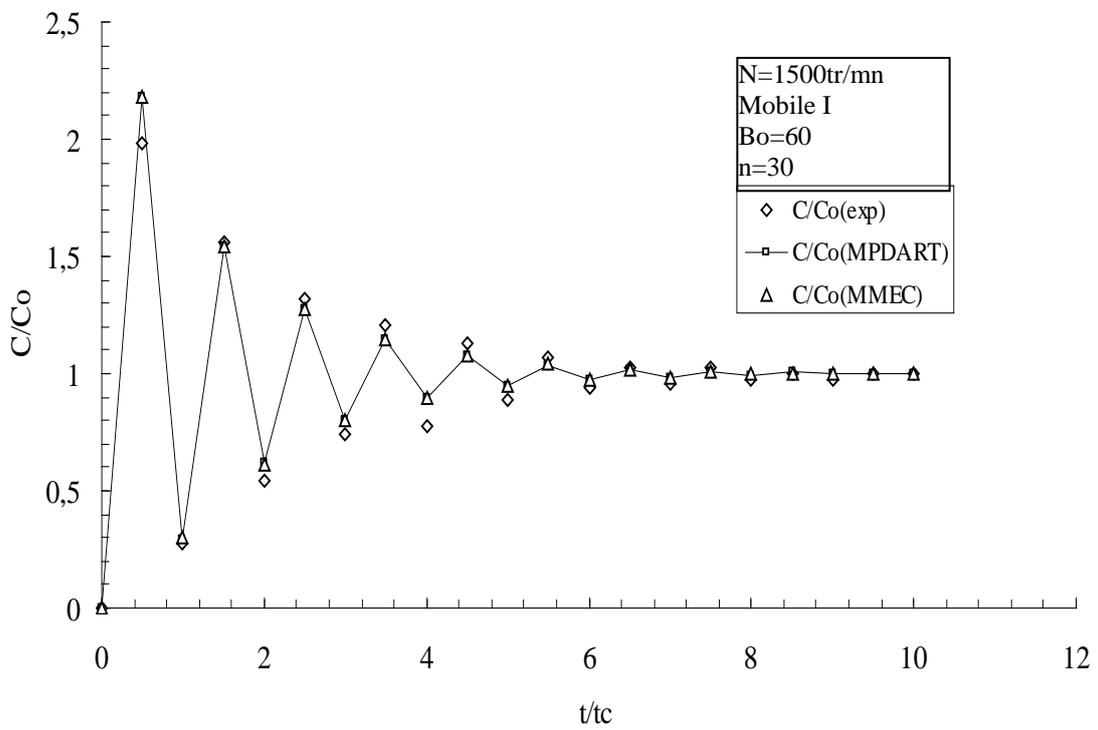
Fig1-a



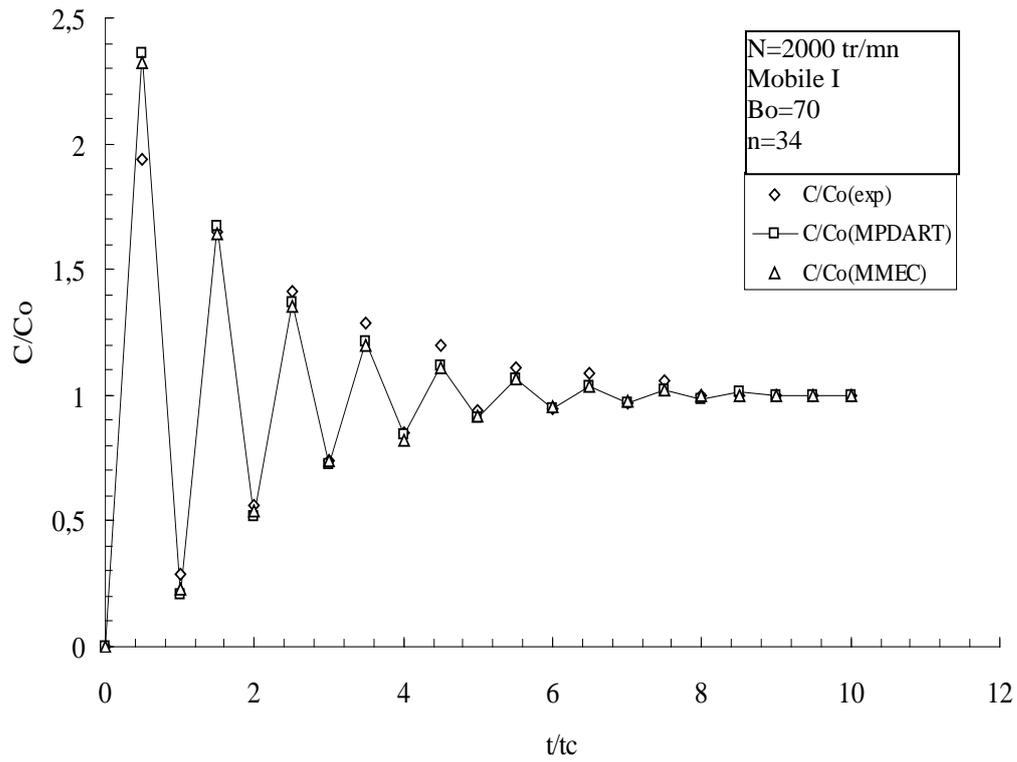
Fig(1-b)



**Fig 1-c**

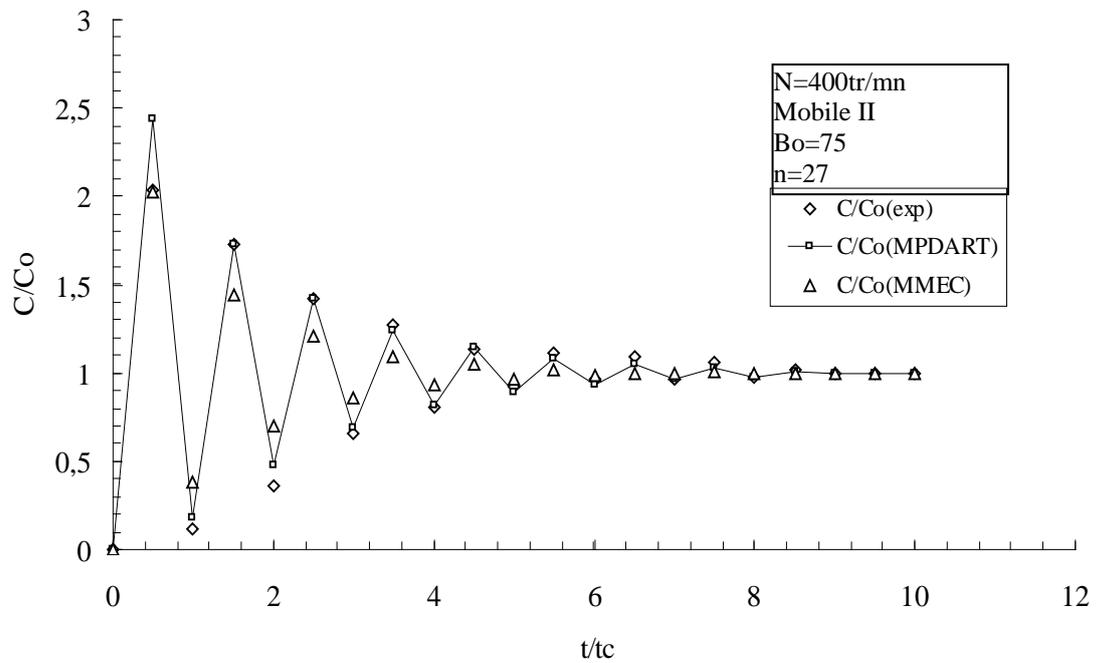


**Fig 1-d**

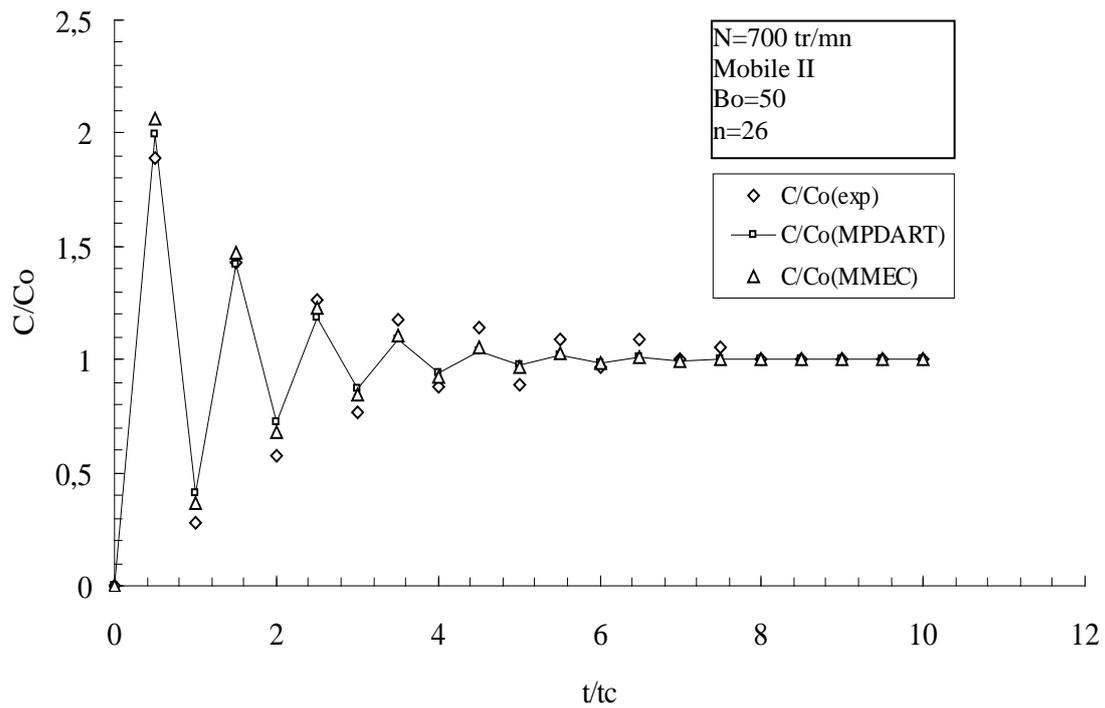


**Fig 1-e**

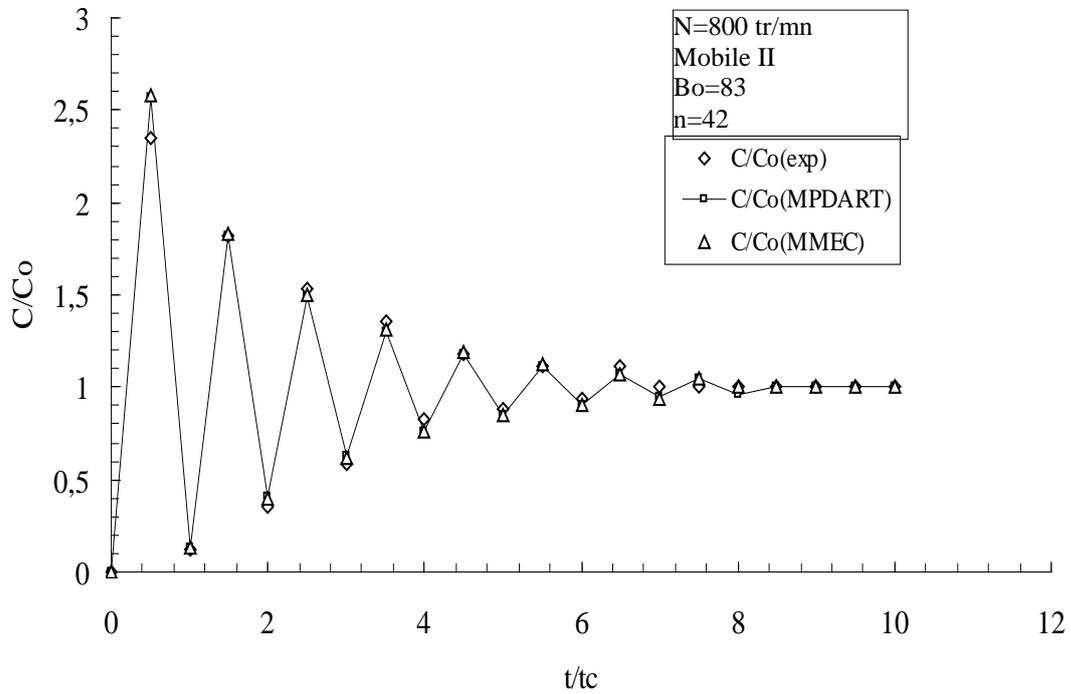
**Fig. 1 : Représentation des valeurs de  $C/Co$  obtenues par les deux modèles**



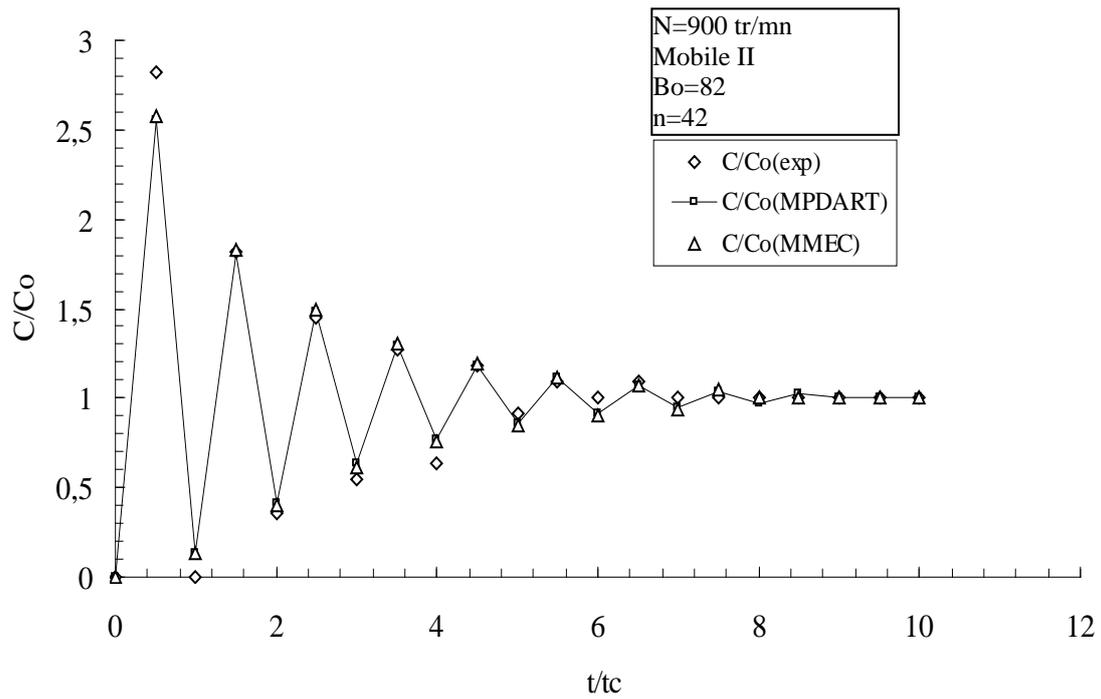
**Fig 2-a**



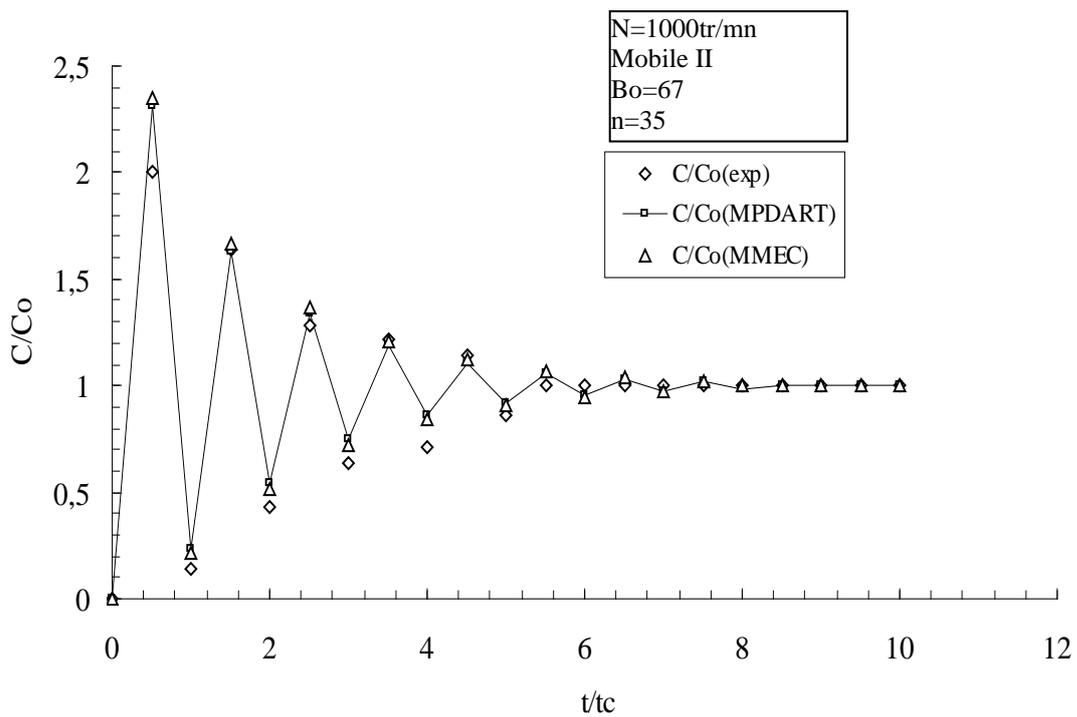
**Fig 2-b**



**Fig 2-c**

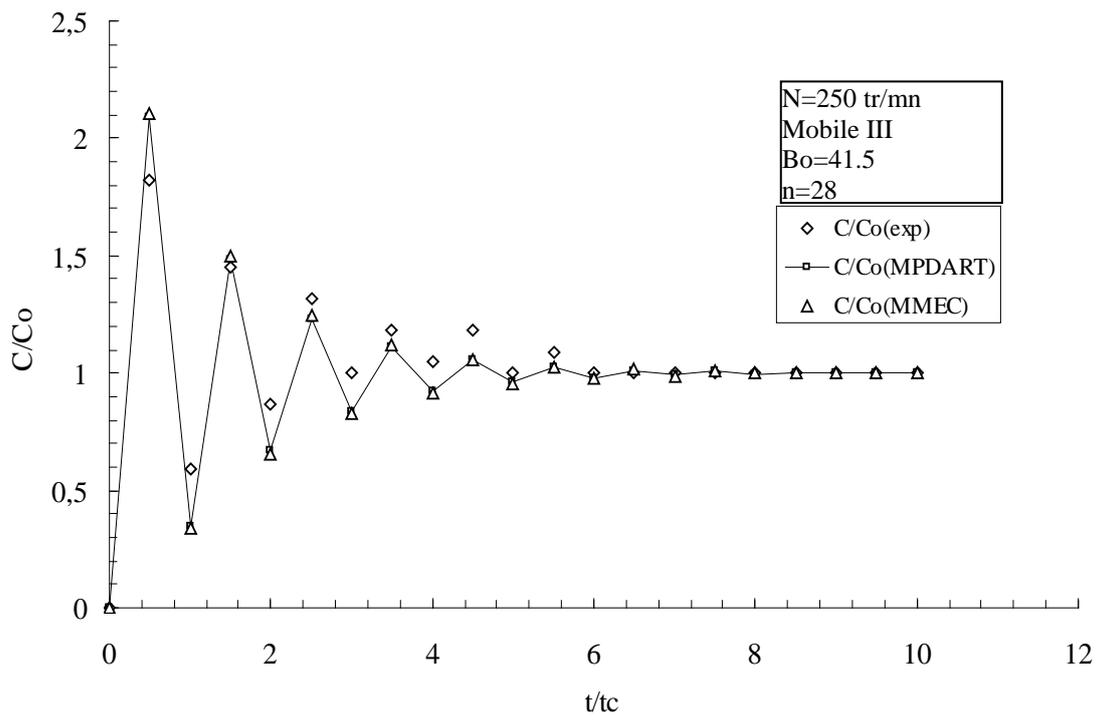


**Fig 2-d**

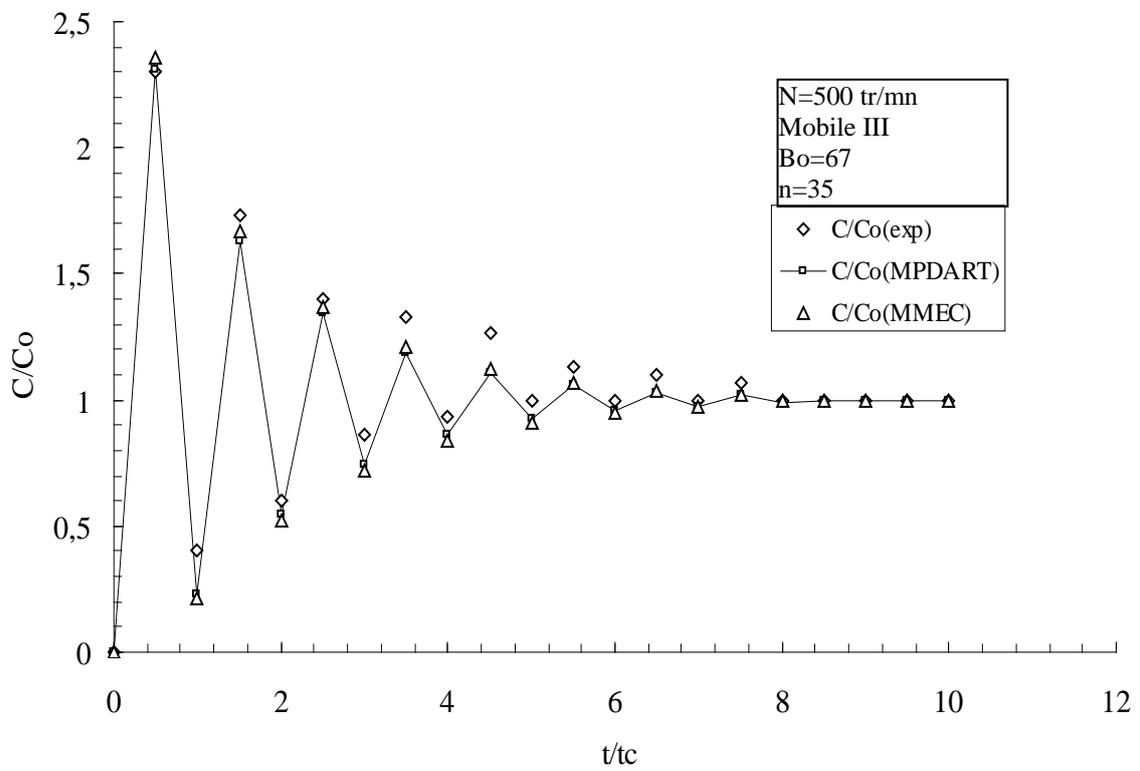


**Fig 2-e**

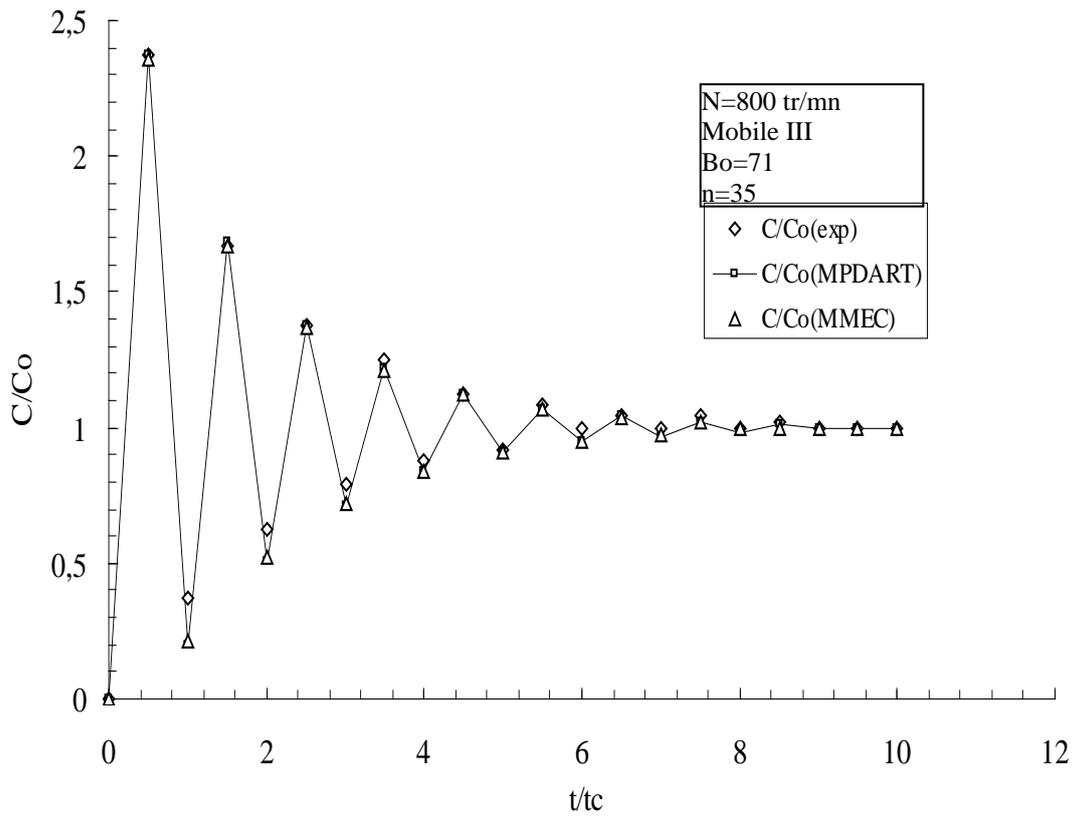
**Fig. 2 : Représentation des valeurs de  $C/Co$  obtenues par les deux modèles**



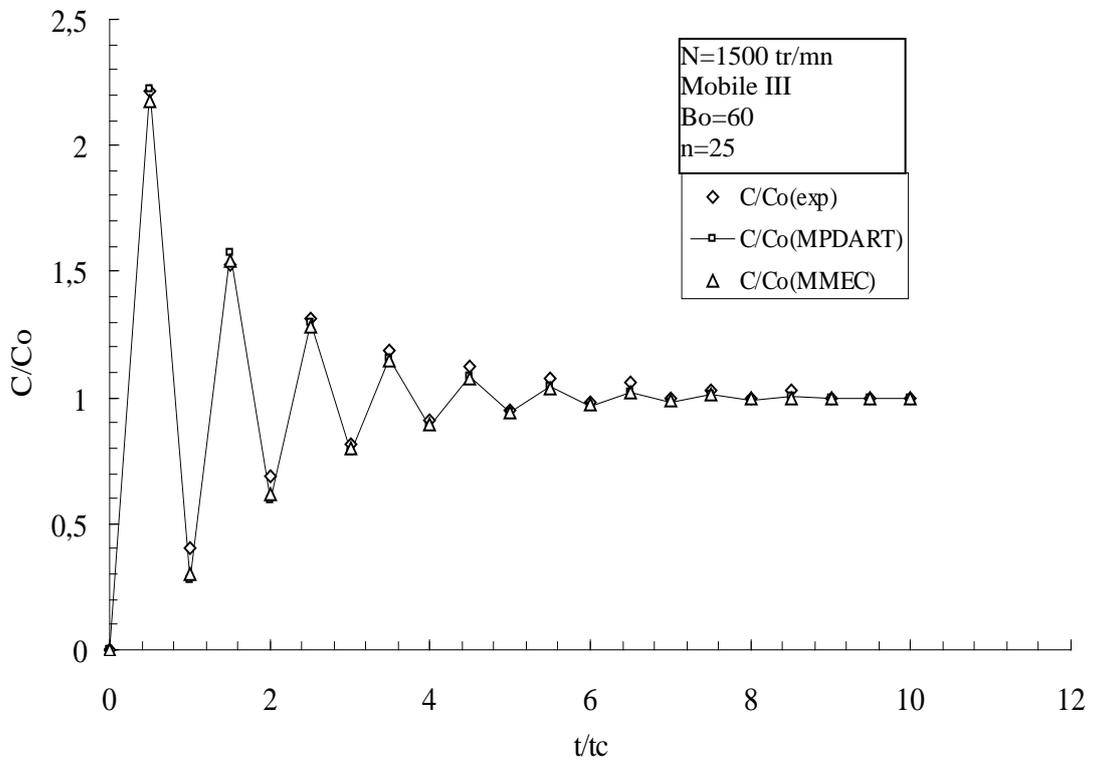
**Fig 3-a**



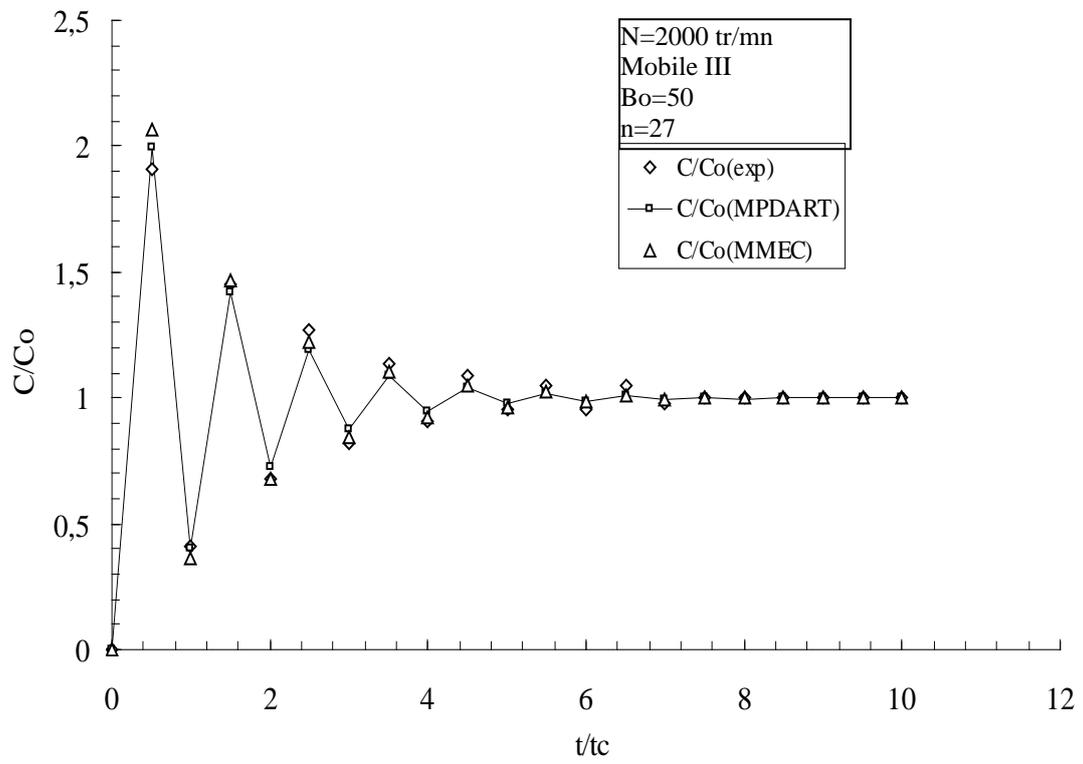
**Fig 3-b**



**Fig 3-c**



**Fig 3-d**



**Fig 3-e**

**Fig. 3 : Représentation des valeurs de  $C/Co$  obtenues par les deux modèles**

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est la caractérisation de l'hydrodynamique et du mélange au sein d'un réacteur à boucle de forme torique fermé par la méthode conductimétrique basée sur la détermination des courbes de la distribution des temps de séjours (DTS).

L'analyse des courbes expérimentales de DTS permet l'évaluation de deux paramètres essentiels : temps de circulation et temps de mélange.

Nous avons montré que la géométrie toroïdale à l'avantage de présenter un mélange radial efficace du à l'écoulement hélicoïdal généré par le mobile d'agitation et accentué au niveau des coudes, par conséquent, ce type de réacteur ne présente pas de volume mort ce qui permet une extrapolation plus aisée de ces performances.

A partir de la caractérisation de l'écoulement, nous avons constaté que la vitesse moyenne de circulation à l'intérieur du réacteur augmente linéairement avec la vitesse d'agitation.

Pour une vitesse de rotation donnée, la vitesse de circulation augmente avec le diamètre et l'angle d'inclinaison des pales du mobile d'agitation.

Pour prédire cette variation une corrélation a été proposée et est basée sur l'utilisation d'un facteur géométrique qui tient compte des caractéristiques géométriques du mobile et du réacteur.

$$U_c = K N \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_t^2} R_t \sin(\phi)$$

D'autre part, lors d'une représentation adimensionnelle nous avons remarqué que le rapport ( $Re_c/Re_m$ ) tend vers une valeur constante au delà de  $Re_m=2.10^4$ , ceci indépendamment du diamètre extérieur et de l'angle d'inclinaison des pales de l'hélice.

Pour la caractérisation du mélange à l'intérieur du réacteur, nous avons recours souvent au temps de mélange. La représentation de ce dernier a permis de constater que celui-ci est inversement proportionnel à la vitesse d'agitation ainsi qu'au diamètre et à l'angle d'inclinaison des pales du mobile.

Les temps de mélange enregistrée par l'hélice marine sont plus faibles par rapport à ceux de la turbine à pale inclinée, de ce fait on recommande l'hélice marine à la turbine à pale inclinée.

La caractérisation du mélange global par le nombre de circulation  $N_\theta$  a montré que  $N_\theta$  tend vers une valeur moyenne constante et égale à 10.

L'écoulement dans le réacteur a été représenté par deux modèles à savoir : Modèle piston avec dispersion axiale et recirculation totale (MPDART) et Modèle des mélangeurs en cascade (MMCRT).

Le modèle (MPDART) permet de déterminer le nombre de BODENSTEIN ( $Bo$ ) à travers les valeurs expérimentales obtenues, nous avons constaté que  $Bo$  est relativement indépendant de la vitesse d'agitation et est égal en moyenne à 60-80, cette valeur de  $Bo$  permet de caractériser l'hydrodynamique à l'intérieur du réacteur par un écoulement proche de l'écoulement piston.

Par ailleurs nous avons observé que le coefficient de dispersion axial ( $D_{ax}$ ) augmente linéairement avec la vitesse de rotation selon la relation suivante :  $D_{ax} = 0.2d_1^2N$ , et d'autre part en comparaison avec un réacteur torique à grand rayon nous avons constaté que les valeurs de  $D_{ax}$  sont plus élevées dans notre réacteur.

Par application du modèle (MMCRT), nous avons représenté le réacteur par une série de 30 à 36 réacteurs agités.

Les modèles choisis sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

L'ensemble de nos résultats sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature.

## RESUME DU MEMOIRE

Le but de ce travail est la caractérisation de l'écoulement dans un réacteur torique par analyse des courbes de distribution des temps de séjours déterminées à l'aide de la méthode conductimétrique. La circulation du fluide à l'intérieur du réacteur est assurée par un mobile d'agitation.

L'étude de l'influence de la vitesse d'agitation sur la vitesse moyenne de circulation a permis de proposer une corrélation reliant ces deux grandeurs, cette dernière intègre un facteur géométrique  $F_g$  qui tient compte des caractéristiques géométriques du mobile d'agitation et du réacteur.

Par ailleurs, nous avons caractérisé le mélange dans le réacteur par le nombre de circulation  $N_\theta$  nécessaire pour atteindre le degré d'homogénéité choisi ( $N_\theta = 10$ ) et par le produit  $N.t_m$  tel que  $t_m$  est l'intervalle de temps entre l'injection du traceur et sa répartition dans tout l'espace réactionnel, les expériences effectuées ont montré que ce produit est relativement indépendant de l'angle d'inclinaison des pales et semble diminuer avec l'augmentation du diamètre des pales.

D'une part nous avons caractérisé l'hydrodynamique dans le réacteur par un écoulement proche de celui de l'écoulement piston et d'autre part, nous avons représenté le réacteur par une série de 30 à 36 réacteurs agités et ceci en se basant sur le modèle des mélangeurs en cascade.

Le coefficient de dispersion axiale  $D_{ax}$  augmente linéairement avec la vitesse d'agitation, sur la base de ce résultat une relation empirique a été proposée.

**Mots clés :** Réacteur torique, distribution des temps de séjours, agitation, mélange, modélisation