



Analyse d'un écoulement monophasique turbulent en présence d'un mélangeur statique de type Kenics

Hosni Massinissa ^{a,*}, Hammoudi Mhamed ^a

^a USTHB, faculté de physique, laboratoire de mécanique des fluides théorique et appliquée, BP 32 EL Alia 16111, Bab Ezzouar, Alger, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 06 July 2020

Accepted 06 October 2020

Mots clés:

Energie,

Perte de charge,

Mélangeur statique,

Kenics,

Temps de mélange

RESUME

L'acquisition de la perte de charge monophasique en utilisant un manomètre à tube à travers un mélangeur statique de type Kenics dans une conduite horizontale a été faite pour un Reynolds appartenant à l'intervalle [8116-18938]. L'approche considérant le mélangeur statique comme un milieu poreux structuré est appliquée sur le Kenics. Les paramètres intrinsèques du Kenics ont été calculés, et l'accord entre les pertes de charges théoriques et expérimentales confirme que l'approche est applicable sur le Kenics. Le taux de l'énergie dissipée et les constantes de temps caractéristiques du mélange ont été estimés en utilisant les pertes de charges recueillies. Des corrélations ont été proposées pour la perte de charge et le taux de l'énergie dissipée. Les constantes de temps caractéristiques ont été étudiées et le processus du mesomixing par dispersion turbulente a été identifié comme le processus gouvernant l'opération de mélangeage le long de tout l'intervalle de Reynolds.

ABSTRACT

The acquisition of a single phase pressure drop using a tube pressure gauge through a Kenics static mixer in a horizontal pipe was made for a Reynolds ranging from 8116 to 18938. The approach considering the SMX static mixer as a porous medium is applied on the Kenics static mixer. The intrinsic parameters of the Kenics have been calculated, and the agreement between the theoretical and experimental pressure drops confirms that the approach is applicable to the Kenics. The rate of the dissipated energy and the characteristic time constants of the mixture were estimated using the collected pressure drop data. Correlations have been proposed for the pressure drop and the dissipated energy. Characteristic time constants have been studied and the process of mesomixing by turbulent dispersion has been identified as the process governing the mixing operation along the entire Reynolds interval.

Keywords:

Energy,

Pressure drop,

Static mixer,

Kenics,

Mixing times

* Corresponding author, E-mail address: massinissahosni@hotmail.com
Tel.: +213 558830501



1. Introduction

Les mélangeurs statiques sont largement utilisés dans l'industrie, et jouent un rôle bien connu dans le mélange des processus, en étant largement utilisés dans l'industrie chimique, pétrochimique, pharmaceutique, papier, traitement des eaux usées, traitement du gaz naturel [1-3]. L'analyse de la bibliographie dans le domaine montre que l'efficacité des mélangeurs statiques n'est plus à démontrer et peu à peu, elle tend à s'étendre vers d'autres domaines y compris dans les énergies renouvelables.

Les mélangeurs statiques peuvent constituer une alternative pour les solutions utilisées actuellement dans les processus de mélanges fluidiques liquides ou gazeux et même solides Krolczyk et al.[4] au cours de laquelle il a été procédé au mélange de charbon avec de la biomasse pour produire des mélanges de carburant pour les centrales thermiques équipées de chaudières. Les auteurs ont conclu que le nombre optimal de mélangeurs statiques était de cinq, afin d'obtenir la meilleure répartition de la concentration de biomasse dans un mélange avec le charbon. Les mélangeurs statiques pourraient être utilisés pour le mélange de carburants constituant le biodiesel, Hydrogène-Diesel, ou l'enrichissement du gaz naturel par de l'hydrogène afin d'augmenter son efficacité combustible et réduire son degré de pollution. L'utilisation des mélangeurs statiques permet d'obtenir des mélanges en temps réels de combinaisons de fluides de natures différentes gaz ou liquides. Ils induisent beaucoup d'avantages, en plus d'une installation facile, d'une amélioration du transfert de chaleur et de masse, de la génération d'une surface interrassiale très élevée, ils n'ont pas de pièces mobiles, peu d'espace, des coûts d'entretien faibles ou nuls et un temps de séjours court [5].

Les mélangeurs statiques sont des dispositifs utilisant l'énergie de l'écoulement pour produire un mélange homogène et fiable [6]. Ils sont souvent utilisés comme homogénéisateur thermique dans l'industrie ou pour réaliser un bon transfert thermique à la paroi. Même au prix d'une puissance de pompage élevée, il peut être intéressant de réduire les gradients de température et les temps de contact dans les procédés mis en œuvre [3]. Ils sont généralement utilisés dans les écoulements laminaires pour créer de la turbulence à des nombres de Reynolds plus faibles, les limites exactes des différents régimes dépendent de la conception des mélangeurs, y compris le paramètre L/D . Par exemple, pour un mélangeur statique de type Kenics, la région intermédiaire commence à $Re \approx 43$ lorsque $L/D=0,8$, mais cette limite est retardée à $Re \approx 55$ lorsque $L/D=1$ [7]. En se basant sur l'analyse statistique des pertes de charge mesurées, Sir and Lecjaks [8] affirmaient que l'écoulement dans le mélangeur statique Kenics peut être considéré laminaire pour $Re \leq 50$ et complètement turbulent pour $Re > 2000$. D'après les travaux de Hirech [9], Hirech

et al.[10] sur le SMX, la transition du régime visqueux vers le régime laminaire survient à partir de $Re_p=200$, alors que le régime turbulent survient pour des écoulements dont Re_p est compris entre 1500 et 3100 (voir aussi [3]).

L'objectif du présent travail est d'étudier l'influence du mélangeur statique Kenics sur un écoulement monophasique dans une conduite horizontale en régime turbulent. En considérant le mélangeur statique comme un milieu poreux structuré, et de voir par la suite son influence sur les différents échelles de temps de mélange caractéristiques.

2. Expérimental

Le dispositif de mesure utilisé dans le présent travail est le manomètre à tube avec une erreur systématique de $\pm 2\%$ de son échelle totale, pour mesurer les pertes de charge à travers le mélangeur statique de type Kenics. L'expérience a été menée dans une conduite horizontale en plexi-glass, d'une longueur totale de 14m (350D) et d'un diamètre interne de 4cm. Un mélangeur statique a été localisé à une distance de 8m (200D) de l'entrée de la conduite principale (voir Fig.1).

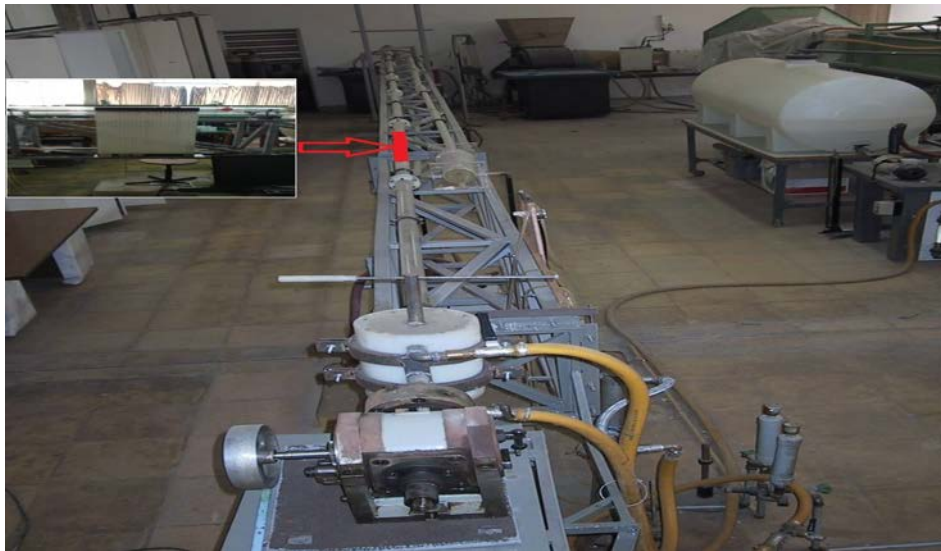


Fig 1. Le dispositif expérimental et le système de mesure de la pression différentielle (Manomètre à tube)

Les caractéristiques du Kenics sont données comme suit: diamètre 40mm, longueur par élément de 60mm et d'une épaisseur de 2mm. Ce dernier a été conçu à l'aide du logiciel de conception

mécanique Solidworks et fabriqué par le service Sculpteo 3D à l'aide d'une imprimante 3D (voir Fig.2).

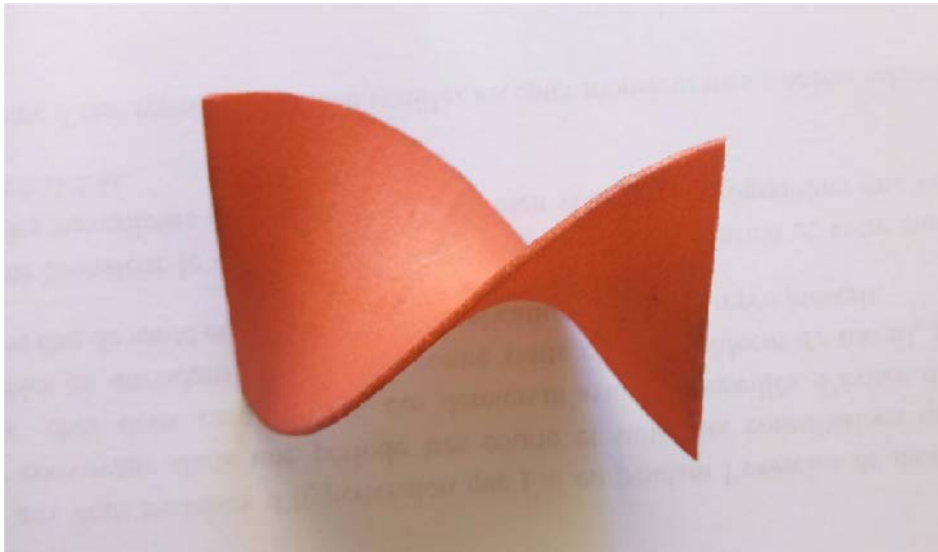


Fig 2. Élément du mélangeur statique Kenics après impression

Le fluide de travail, l'eau (voir Table.1) provenant du réservoir d'eau principal est injectée dans une conduite secondaire à l'aide d'une pompe électrique de type OSBY M2C18.40 avant d'être injectée dans la conduite principale ; son débit est mesurée à l'aide d'un débit mètre liquide à ultrasons de type Panametrics Transport GE PT878, avec une erreur se situant entre $\pm 2\%$ et $\pm 5\%$ de la valeur typique.

Table 1. Caractéristiques du fluide utilisé ($T=21^\circ$)

Fluide	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/m.s)
eau	998	0,000979

2.1 Protocole de mesure

Le système utilisé dans le présent travail pour mesurer les pertes de charge monophasique dans une conduite horizontale contenant un mélangeur statique est comme suit : la section de mesure est localisée à environ 8 m de l'entrée avec 7 ports de prise de pression, sur lesquels des flexibles sont installés. Les pertes de charge sont recueillies à l'aide d'un manomètre à tubes pour des débits liquides ayant de 15 L/min à 35 L/min. Pour chaque débit on a fait trois acquisitions en gardant les mêmes conditions entre chaque acquisition et en prenant un temps d'arrêt de 5min,

dans le but de permettre l'établissement de l'écoulement. Les données sont traitées en utilisant la méthode statistique de Student avec un intervalle de confiance à 95%, et permet d'obtenir une valeur moyenne de la perte de charge, ses limites inférieure et supérieure avec une fiabilité de 95% et cela pour chaque débit ainsi que l'incertitude correspondante.

3. Les chutes de pression induites par le Kenics

Les pertes de charges ont été recueillies à l'aide du dispositif de mesure décrit plus haut. En tenant compte des travaux menés par plusieurs auteurs [1, 3, 5, 9-12] et qui considèrent le mélangeur statique SMX comme un milieu poreux structuré. Nous avons adopté la même approche pour le mélangeur statique Kenics. Dans le cadre de ce travail, le mélangeur statique Kenics sera considéré comme un milieu poreux structuré. De ce fait, la porosité du Kenics est calculée à l'aide de l'équation (1) et les paramètres géométriques intrinsèques du Kenics (τ et dp) sont déterminés en utilisant le modèle capillaire [1] (voir les équations (2, 3, 6 et 7)).

$$\varepsilon = \frac{V_{vide} - V_{ms}}{V_{vide}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_{ms}}{L_{ms}} = \frac{32 * \tau^2 * \mu * u_b}{\varepsilon * dp^2} + \frac{0,3872 * \tau^3 * \rho * u_b^2}{dp * \varepsilon^2} \quad (2)$$

Une autre représentation de l'équation (2) a été proposée [1,3] en incluant les paramètres J et K, dans le but de faciliter la détermination des paramètres structuraux définis comme suit:

$$\frac{\Delta P_{ms}}{L_{ms} * \mu * u_b} = J \frac{\rho * u_b}{\mu} + K \quad (3)$$

Avec:

$$J = \frac{0,3872 * \tau^3}{dp * \varepsilon^2} \quad (4)$$

Et

$$K = \frac{32 * \tau^2}{\varepsilon * dp^2} \quad (5)$$

Ceci, nous permet de déterminer les paramètres géométriques τ et dp définis comme suit:

$$\tau = \left(\frac{32}{K}\right)^{1/4} * \left(\frac{J}{0,3872}\right)^{1/2} * \varepsilon^{3/4} \quad (6)$$

$$dp = \left(\frac{32}{K}\right)^{3/4} * \left(\frac{J}{0,3872}\right)^{1/2} * \varepsilon^{1/4} \quad (7)$$

Afin de déterminer les paramètres intrinsèques du Kenics en utilisant la représentation de Morançais et al. [1], les pertes de charges expérimentales sont injectées dans l'équation (3). Les évolutions de $\frac{\Delta P_{ms}}{L_{ms} * \mu * u_b}$ en fonction de $\frac{\rho * u_b}{\mu}$ pour un Kenics comportant, un élément et six éléments sont représentés dans la Fig.3. L'analyse des résultats, permet de produire le paramètre « J » qui représente la pente de la courbe et le paramètre « K » correspondant à son ordonnée. La première corrélation (voir équation (9)) est pour un mélangeur statique Kenics avec un élément, et la deuxième (voir équation (10)) est pour un mélangeur statique Kenics avec six éléments mélangeurs. Les deux corrélations peuvent être mises sous la forme de l'équation linéaire suivante :

$$Y = J * X + K \quad (8)$$

La première corrélation pour un Kenics avec un élément mélangeur est définie comme suit:

$$\frac{\Delta P_{ms}}{L_{ms} * \mu * u_b} = 4,94984 * \frac{\rho * u_b}{\mu} + 1,53806 * 10^6 \quad (9)$$

où : $K=1,53806*10^6$, $J=4,94984$, $COD(R^2)=0,980$

La deuxième corrélation pour un Kenics avec six éléments est définie comme suit:

$$\frac{\Delta P_{ms}}{L_{ms} * \mu * u_b} = 1,3594 * \frac{\rho * u_b}{\mu} + 1,35607 * 10^6 \quad (10)$$

où : $K=1,35607*10^6$, $J=1,3594$, $COD(R^2)=0,935$

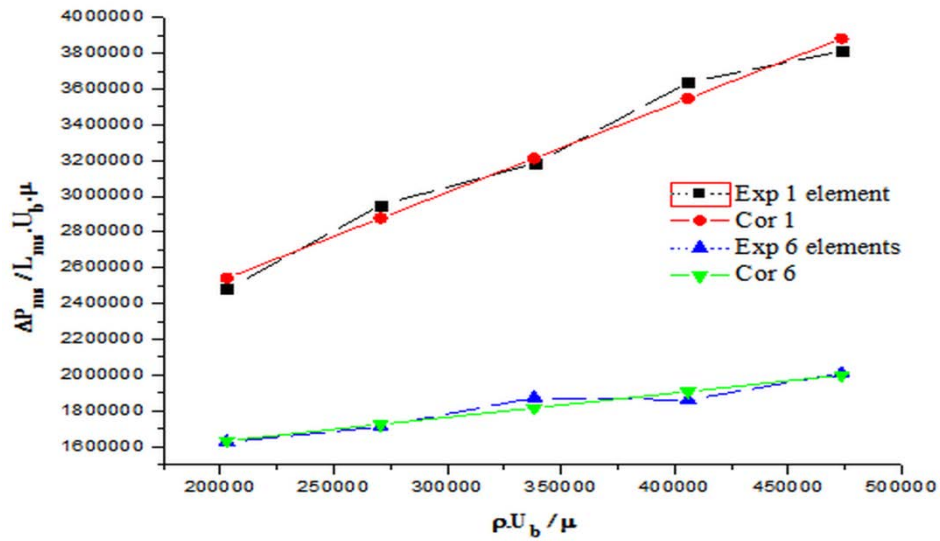


Fig 3. Détermination des paramètres intrinsèques du Kenics avec un et six éléments

Les écarts entre les valeurs expérimentales moyennes et les deux corrélations sont présentés dans la table.2 calculés en utilisant l’expression suivante:

$$Ecart\ relatif\ (\%) = \frac{valeur\ calculée\ (correlation) - valeur\ exp\ moyenne}{valeur\ exp\ moyenne}$$

Table 2. Ecart entre les valeurs expérimentales moyennes et les corrélations

écarts	Limite inférieure (%)	Limite supérieure (%)
1 élément	-2,5%	+2,5%
6 éléments	-3%	+2,5%

À partir des équations (6 et 7), nous pouvons calculer les paramètres géométriques τ et dp du Kenics contenant un seul element melangeur et un Kenics contenant six éléments mélangeurs. Sachant que la porosité est calculée à partir de l’équation (1). La table 3 résume les paramètres géométriques intrinsèques calculés en utilisant la méthode de Morançais et al. [1] et Hammoudi et al. [12].

Table 3. Les paramètres intrinsèques du Kenics

	Présent travail 1 élément	Présent travail 6 éléments
dp (mm)	0,00108	0,00062
τ	0,23000	0,12400
ε	0,93630	0,93630

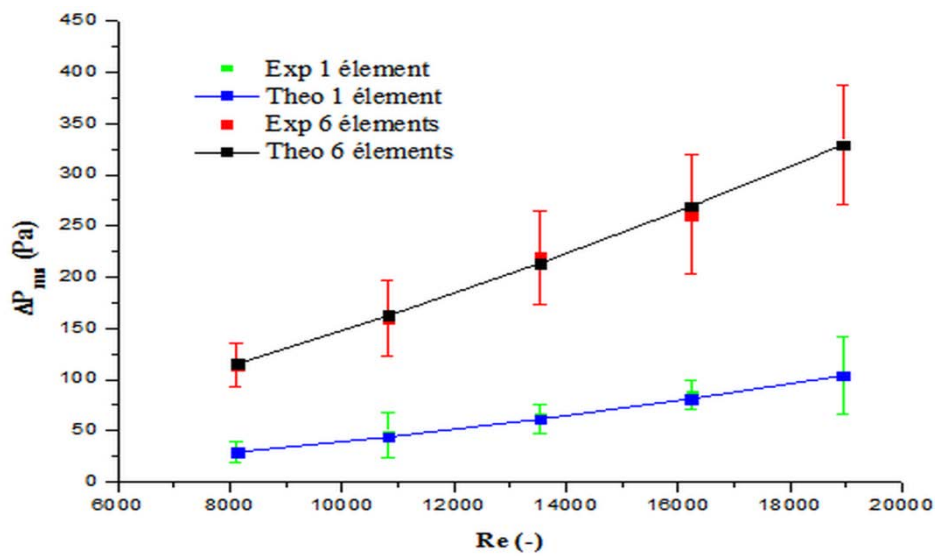


Fig 4. Évolution comparée (Expérimentale- théorique) des pertes de charges à travers un Kenics contenant un et six éléments mélangeurs

En remplaçant les valeurs intrinsèques dans l'équation (2) on obtient les corrélations suivantes :

Pour un Kenics avec un élément :

$$\Delta P_{ms} = 93002 * \mu * u_b + 0,3 * \rho * u_b^2 \tag{11}$$

Pour un Kenics avec six éléments :

$$\Delta P_{ms} = 492150 * \mu * u_b + 0,49 * \rho * u_b^2 \tag{12}$$

La comparaison des corrélations avec les valeurs expérimentales moyennes est présentée dans la Fig.4. Un très bon accord est constaté entre les corrélations et les données expérimentales. Les écarts relatifs sont présentés dans la table 4.

Table 4. Les écarts relatifs expérimental-Corrélations

	Limite inférieure (%)	Limite supérieure (%)
1 élément	-4,5%	+0,2%
6 éléments	-2,5%	+3%

Cette constatation montre que l'approche de Morançais et al.[1] et Hammoudi et al. [12] est applicable sur le mélangeur statique Kenics. Une corrélation pour la perte de charge en fonction du nombre d'éléments mélangeurs ainsi que du nombre de Reynolds est proposée comme suit:

$$\Delta P_{ms} = 3,63 * 10^{-5} * N^{3/4} * Re^{3/2} \quad (13)$$

Les écarts relatifs entre la corrélation généralisée 13 et les valeurs expérimentales sont présentés dans la table 5. Ainsi l'expression proposée tient compte d'une part du nombre de Re de l'écoulement et d'autre part du nombre d'éléments mélangeurs N utilisés, permet de généraliser les deux autres corrélations (11) et (12).

Table 5. Ecarts relatifs entre les valeurs expérimentales moyennes et l'équation (13).

	Limite inférieure (%)	Limite supérieure (%)
1 élément	-17%	0%
6 éléments	-20%	+5%

4. Le taux moyen de l'énergie dissipée par unité de masse

Le taux moyen de l'énergie dissipée par unité de masse constitue un critère essentiel pour le choix du mélangeur statique. Une compréhension des besoins énergétiques des mélangeurs statiques est nécessaire pour établir les exigences de perte de charge et de débit [1]. Le taux d'énergie dissipée, calculé à partir des pertes de charges expérimentales définit par l'équation (14) [3,5] est comparé au taux théorique de l'énergie dissipée [3], définit par l'équation (15).

$$Ed_{exp} = \frac{\Delta P_{ms} * u_b}{L_{ms} * \rho * \varepsilon} \quad (14)$$

$$Ed_{theo} = \frac{2 * f_p^*}{dp} * \left(\frac{\tau}{\varepsilon}\right)^3 * u_b^3 \quad (15)$$

Sachant que le f_p^* est défini comme suit :

$$f_p^* = f_p - 1 \quad (16)$$

Où f_p représente le facteur de la perte de charge proposé par Morançais et al.[1] et donné par la corrélation suivante :

$$f_p = 1,194 + \frac{16}{Re_p} \quad (17)$$

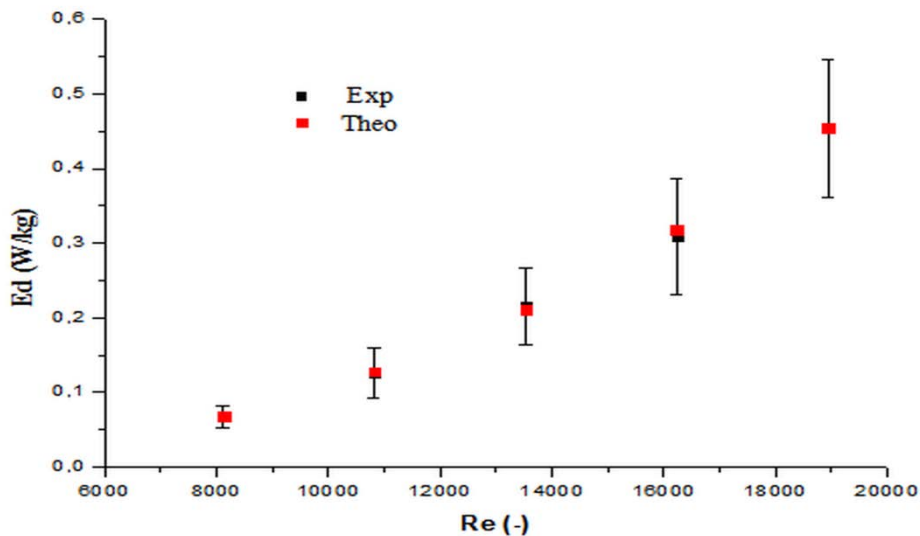


Fig 5. Evolution comparée du taux de l'énergie dissipée (expérimental-théorique) pour un Kenics à 6 éléments

Le taux d'énergie dissipée théorique et expérimental sont proportionnels au nombre de Reynolds et évoluent d'une manière non linéaire (voir Fig.5). L'analyse des résultats montre que l'écart relatif entre les deux courbes est compris entre -2,5% et +3%, pour un intervalle de confiance de 95%.

4.1 Influence du nombre d'éléments sur le taux d'énergie dissipée

Contrairement aux pertes de charges, le taux d'énergie dissipée diminue avec l'augmentation du nombre d'éléments mélangeurs. Ainsi, le taux d'énergie dissipée d'un seul élément est plus important d'un facteur moyen de 1,76 que celui d'un mélangeur comportant six éléments (Fig. 6). Le taux d'énergie dissipée dépend de deux paramètres: la vitesse de l'écoulement (u_b) et la perte de charge par unité d'élément ($\Delta P_{ms}/N$). Pour un débit constant ($u_b = \text{cte}$), on a constaté que la perte de charge par unité d'élément diminue avec l'augmentation du nombre d'éléments (N), ce qui engendre la diminution du taux de l'énergie dissipée avec l'augmentation du nombre d'éléments mélangeurs.

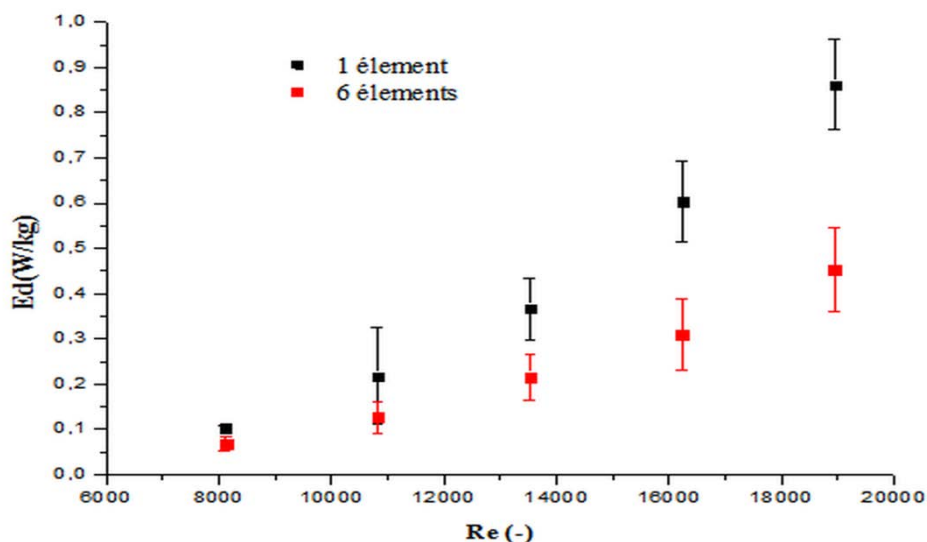


Fig 6. Taux de l'énergie dissipée en fonction du Re et du nombre d'éléments mélangeur

Une corrélation pour le calcul du taux d'énergie dissipée en fonction du nombre de Reynolds et du nombre d'éléments mélangeurs proposée dans le cadre de ce travail comme suit:

$$Ed = 2,1 * 10^{-11} * N^{-0,5} * Re^{5/2} \quad (18)$$

Les écarts relatifs entre le taux d'énergie dissipée calculés en utilisant les données de la perte de charge expérimentale injectées dans l'équation (14) et ceux issus de la corrélation (équation 18) sont présentés dans la table 6.

Table 6. Les écarts relatifs entre la corrélation (18) et l'expérimental

	Limite inférieure (%)	Limite supérieure (%)
1 élément	+14%	+19%
6 éléments	-26%	-9%

5. Mélange monophasique

Le mélange peut être décrit comme le processus auquel un système non uniforme est uniformisé. Le degré de mélange, ou l'uniformité, peut être analysé en évaluant dans quelle mesure l'écoulement est macro ou micro mélangé. Le macromélange signifie qu'il n'y pas de mélange à l'échelle moléculaire, mais que les éléments fluides sont bien mélangés à grande échelle. Le micro mélange est un mélange complet des espèces, même à l'échelle moléculaire [13].

De nombreux processus industriels impliquant des réactions chimiques se produisent dans les écoulements turbulents. Il est très utile d'identifier quelle séquence du processus de mélange peut affecter directement ou indirectement le cours de la réaction chimique, qui peut mener à la conversion ou à la sélectivité de composant chimiques. On peut classer une réaction chimique du point de vue compétition entre plusieurs réactions et mélange en comparant le temps caractéristique du mélange au temps caractéristique de la réaction chimique [3,14]. Hammoudi et al. [15] ont extrait des profils de vitesse et de l'intensité turbulente par vélocimétrie ultrasonore pulsée afin d'estimer quantitativement et qualitativement l'évolution locale et globale du mélange à toutes les échelles à travers l'estimation des temps de mélange multi échelle. Dans le présent travail on a utilisé le taux de l'énergie dissipée calculé à partir des pertes de charges recueillies pour estimer les différents temps de mélange multi échelles.

5.1 Temps caractéristiques du mélange multi échelles

Les mécanismes de mélange peuvent être regroupés en trois catégories principales en fonction de leur échelle de longueur caractéristique. Le mélange à petite échelle près du niveau moléculaire est appelé micromixing ; le macromixing est le mélange à grande échelle et le mélange à une échelle intermédiaire est appelé mésomixing [16].

Les corrélations gouvernant les constantes caractéristiques des temps de mélange ont été définies par différent auteurs [3, 15, 16-21] (voir table 7):

Table 7. Les constantes de temps caractéristiques

Constantes de temps caractéristiques			
Macromixing	Mesomixing	Micromixing	
$\tau_c = \frac{L_{ms}}{u_b}$ [21]	$\tau_d = \frac{Q_V}{u_b * D_t}$ [18]	$\tau_{lineaire} = 2,69 * \sqrt{\frac{\vartheta}{Ed}}$ [20]	
	$D_t = 0,12 * (Ed * d^4)^{1/3}$ [14]	$\tau_{exp} = 7,08 * \sqrt{\frac{\vartheta}{Ed}}$ [20]	
	$\tau_s = 2,04 * \left(\frac{d_p^2}{Ed}\right)^{\frac{1}{3}}$ [19]	$\tau_e = 17,25 * \sqrt{\frac{\vartheta}{Ed}}$ [17]	
		$\tau_g = \tau_e * \left[0,03 + \left(\frac{17050}{s_c}\right)^{-1}\right]$ [16]	

5.2 Constante de temps caractéristique du macromixing

L'évolution du temps de mélange macroscopique caractéristique (macromixing) est définie par la constante de temps caractéristique τ_c montrée dans la Fig.7, où l'augmentation du nombre Reynolds de deux fois engendre une diminution de la constante de temps caractéristique de 57%.

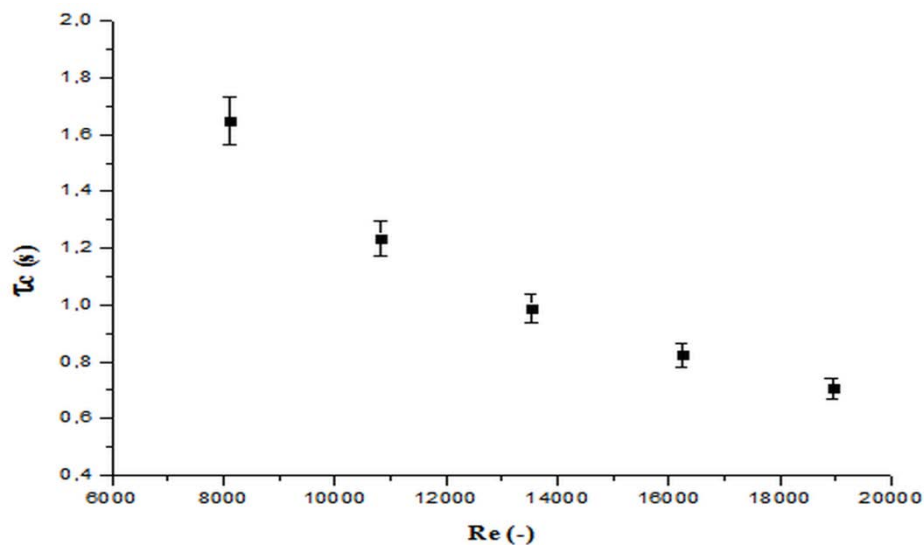


Fig 7. Évolution de la constante de temps caractéristique du macromixing

5.3 Constantes de temps caractéristiques du mésomixing

Le mésomixing est l'échelle intermédiaire caractéristique entre le macromixing et le micromixing. L'évolution de ses constantes de temps caractéristiques est présentée dans les figures. (8 et 9), où l'on constate qu'une augmentation du nombre de Reynolds de deux fois (entre 15 L/min et 35 L/min) engendre une diminution du τ_d et τ_s de 48%, avec $\tau_s = \tau_d/52$.

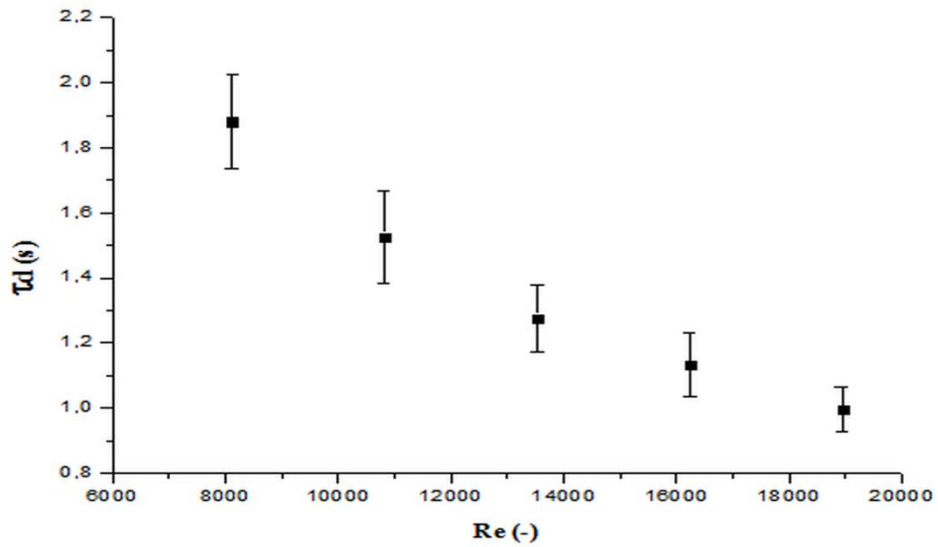


Fig 8. Évolution de la constante de temps caractéristique du mésomixing τ_d

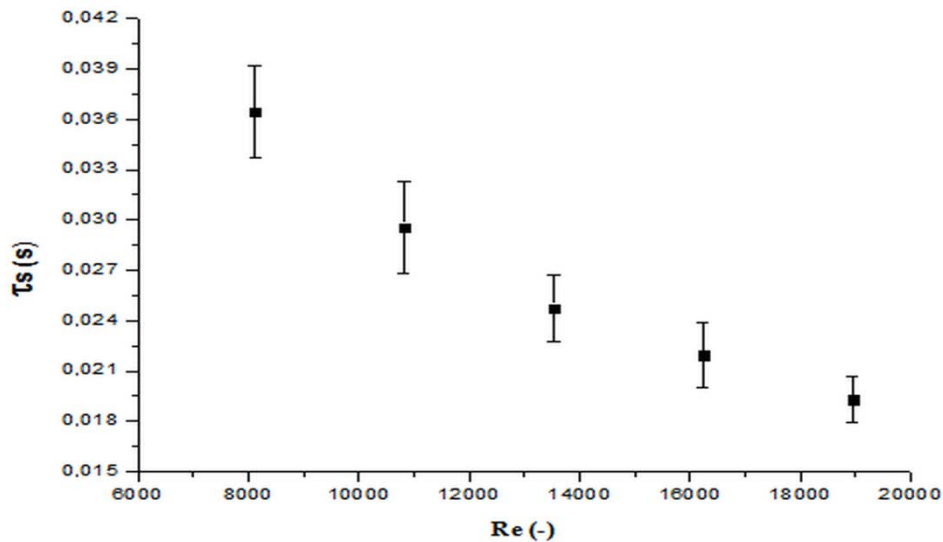


Fig 9. Évolution de la constante de temps caractéristique du mésomixing τ_s

5.4 Constantes de temps caractéristiques du micromixing

Le micromixing représente le mélange à l'échelle moléculaire, qui est représenté par les constantes de temps caractéristiques τ_e , τ_g , $\tau_{lineaire}$ et τ_{exp} . Les figures. (10 et 11) montrent l'évolution de τ_e et τ_g avec le nombre de Reynolds. Les deux constantes de temps caractéristiques ont la même évolution que les autres échelles de temps. L'augmentation du débit liquide de deux fois engendre une diminution du τ_g de 80% et du τ_e de 62 %.

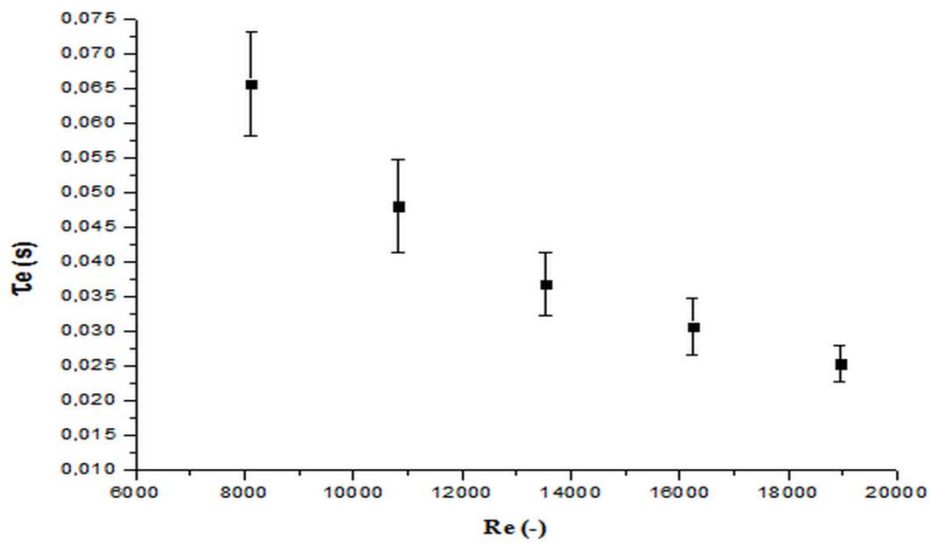


Fig 10. Évolution de la constante de temps caractéristique du micromixing τ_e

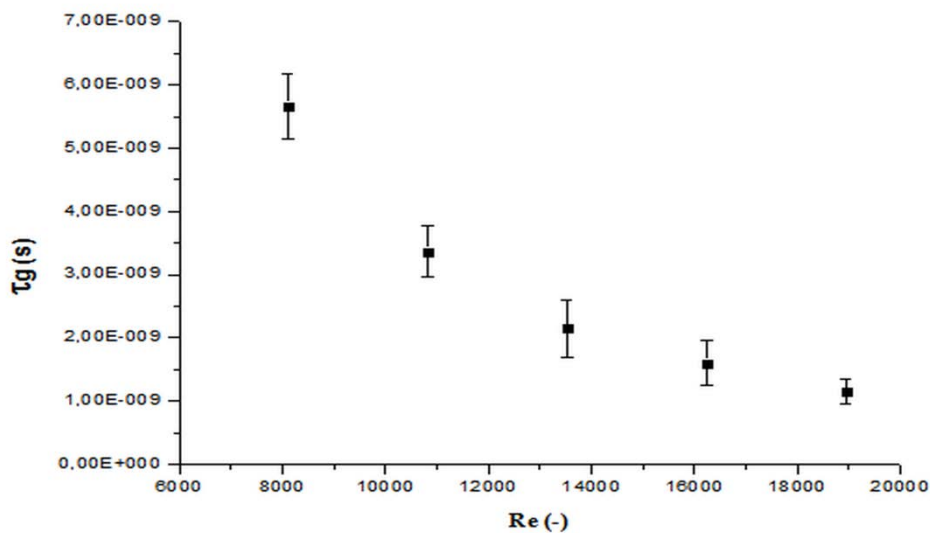


Fig 11. Évolution de la constante de temps caractéristique du micromixing τ_g

En s'appuyant sur le modèle du micromixing estimé par Fournier et al.[22] basé sur celui de l'incorporation linéaire et exponentiel, Fang et al.[20] ont proposé deux corrélations pour le micromixing en présence d'un mélangeur statique de type Kenics, $\tau_{lineaire}$ et τ_{exp} (voir table 7).

L'évolution de ces deux temps caractéristiques de mélange microscopiques $\tau_{lineaire}$ et τ_{exp} est présentée dans les figures. (12 et 13), où on peut constater qu'ils ont la même allure que τ_g et τ_e et qu'ils sont inversement proportionnel aux débits liquides (ou à l'énergie dissipée).

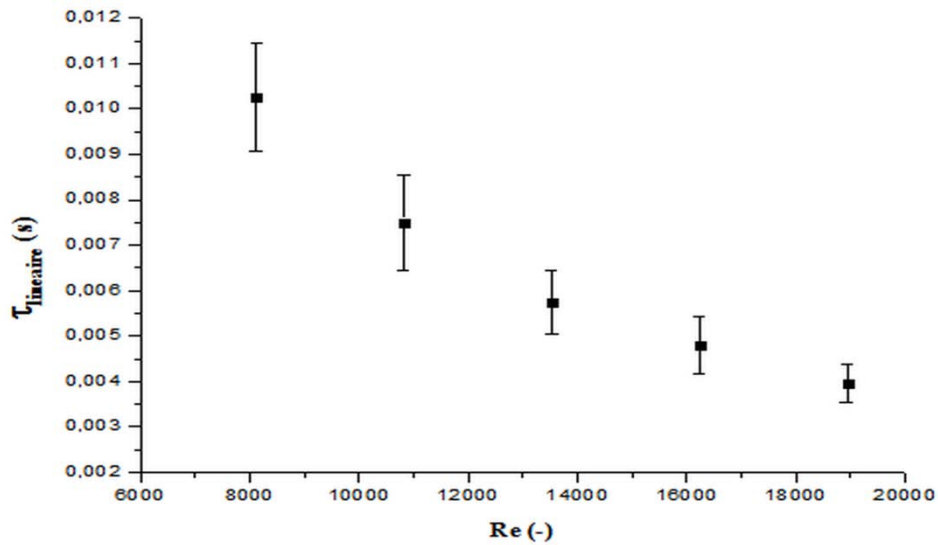


Fig 12. Évolution de la constante de temps caractéristique du micromixing $\tau_{lineaire}$

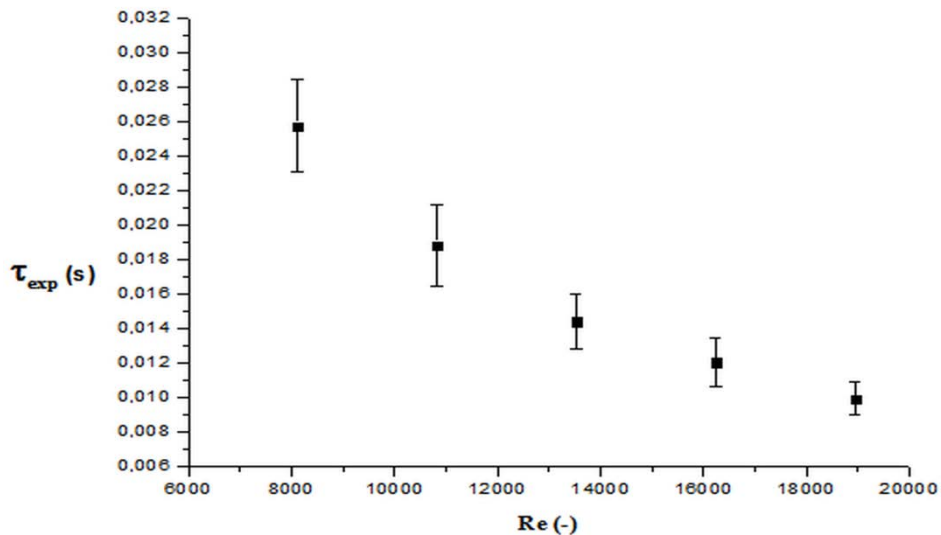


Fig 13. Évolution de la constante de temps caractéristique du micromixing τ_{exp}

6. Comparaison des constantes de temps caractéristiques

La comparaison des différentes constantes de temps caractéristiques nous permet de définir le mécanisme qui gouverne l'opération de mélangeage. Dans le cas où une réaction chimique aura lieu, la constante de temps caractéristique du mécanisme gouvernant l'opération de mélangeage pourrait être comparée à la constante de temps caractéristique de la réaction chimique pour déterminer sa nature (rapide, lente ou instantanée).

6.1 Comparaison du mésomixing avec le micromixing

Afin de comparer le mésomixing par diffusion turbulente (τ_d) et le micromixing par englobissement τ_e , Baldyga and Bourne [18] ont défini le paramètre suivant :

$$M_{DE} = \frac{\tau_d}{\tau_e} = \frac{E * Q_L}{u_L * D_t} \quad (19)$$

Sachant que (E) représente le paramètre d'englobissement qui est défini comme suit [14]:

$$E = 0,058 * \left(\frac{Ed}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

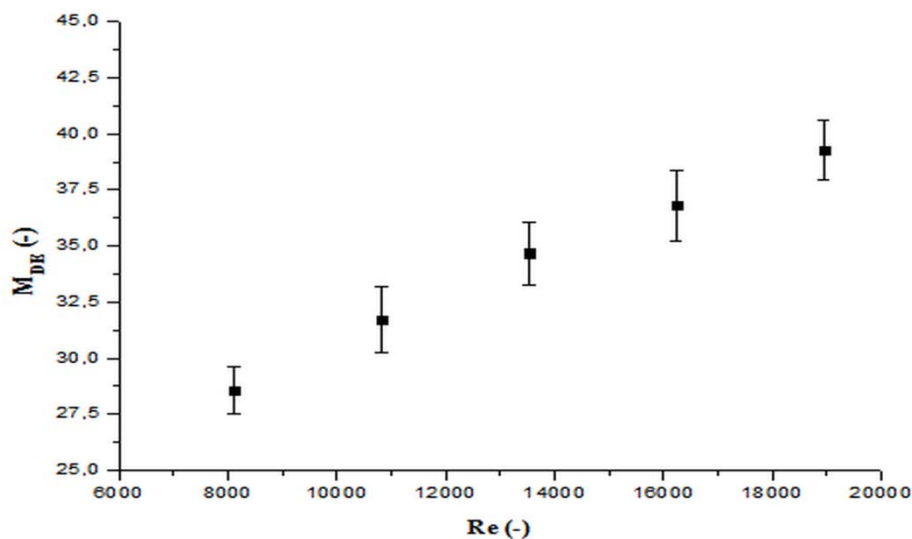


Fig 14. Évolution comparative des constantes de temps caractéristiques M_{DE}

La Fig. 14 révèle que le mésomixing par effet de la diffusion turbulente l’emporte sur le micromixing par effet d’engloutissement. Le rapport entre les deux temps augmente proportionnellement avec le nombre de Reynolds (de l’énergie dissipée), pour atteindre une valeur maximale $M_{DE} = 39$ pour un $Re=18938$ ($Q_L= 35$ L/min).

Afin de comparer le micromixing par engloutissement τ_e et le mesomixing convecto-inertiel τ_s , Baldyga and Rohani [23] ont défini le paramètre suivant:

$$M_{SE} = \frac{\tau_s}{\tau_e} = 0,118 * \left(\frac{Ed}{\vartheta_L}\right)^{1/2} * \left(\frac{dp}{Ed}\right)^{1/3} \quad (21)$$

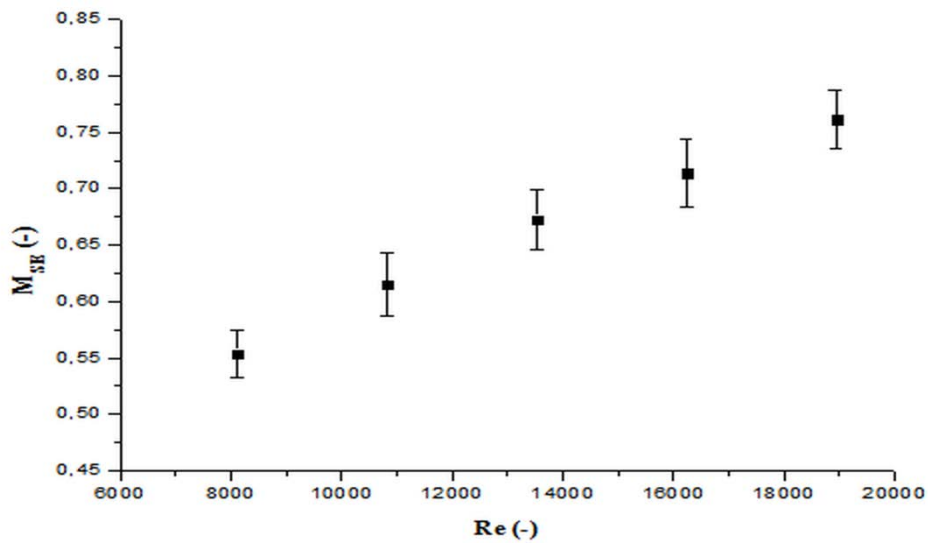


Fig 15. Évolution comparative des constantes de temps caractéristiques M_{SE}

La Fig.15 montre que le micromixing par effet d’engloutissement l’emporte sur le mésomixing par effet de la désintégration convecto-inertielle. Le rapport entre les deux est inférieur à 1 et présentant une augmentation proportionnelle à l’énergie dissipée pouvant atteindre une valeur maximale de $M_{SE} = 0,76$ pour un $Re=18938$.

À partir de l’analyse des résultats présentés dans les figures. (14 et 15), nous pouvons conclure que l’augmentation du taux de l’énergie dissipée engendre une diminution plus rapide de la constante de temps caractéristique du mélange micromixing par engloutissement par rapport aux constantes de temps caractéristiques du mésomixing τ_d et τ_s . De plus, l’opération de mélangeage entre l’échelle méso et micro est contrôlée par le mécanisme de mésomixing par effet de la diffusion turbulente avec $\tau_{d\ max} = 1,88$ s et à un degré moindre par le micromixing par engloutissement τ_e .

6.2 Comparaison des différentes échelles de temps caractéristiques

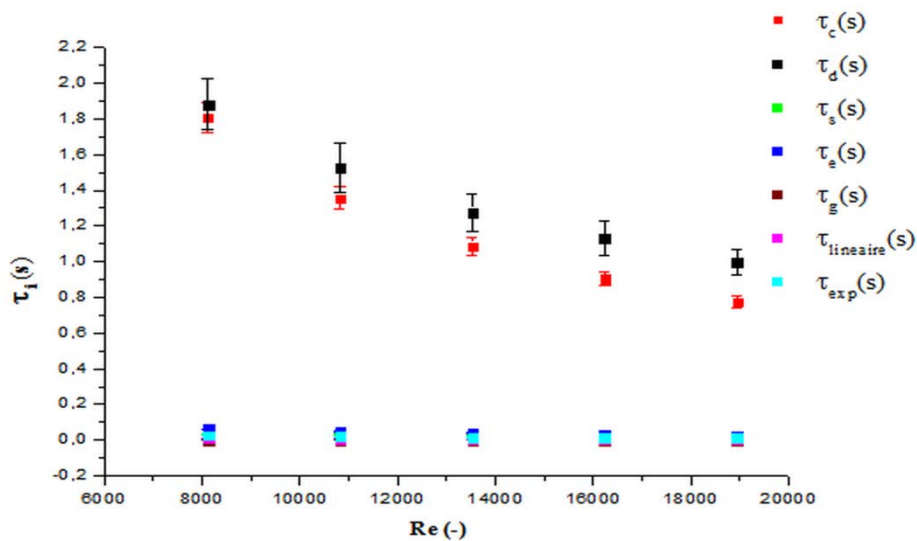


Fig 16. Évolution comparée des temps caractéristiques à différentes échelles de mélange

La Fig.16 révèle que le processus de mélange à l'échelle mésoscopique τ_d régit le mélange pour l'ensemble des valeurs de Reynolds ayant de 8116 à 18938, avec un $\tau_{d\ max} = 1,88s$ pour un Reynolds de 8116 et à un degré moins par le processus de mélange macromixing τ_c avec $\tau_{c\ max} = 1,8s$ pour $Re=8116$.

7. Conclusions

L'étude expérimentale menée dans le cadre de ce travail et portant sur les écoulements monophasique (eau) dans une conduite horizontale contenant un mélangeur statique de type Kenics, nous a permis de collecter une base de données pour les pertes de charges à travers le mélangeur statique Kenics comportant un et plusieurs éléments. Le mélangeur statique a été considéré comme un milieu poreux structuré. Les paramètres intrinsèques (dp et τ) du Kenics ont été calculés à partir des pertes de charges expérimentales en utilisant la représentation de Morançais et al. [1] et Hammoudi et al. [12]. Les pertes de charges ont été étudiées et qui sont directement proportionnelles aux nombres de Reynolds et qui évoluent d'une manière non linéaire. Le très bon accord entre les valeurs de la perte de charge expérimentale et théorique, montre que l'approche de Morançais et al. [1] et Hammoudi et al. [12] est applicable sur le

mélangeur statique Kenics. Une corrélation pour la perte de charge en fonction du nombre d'éléments mélangeur et du nombre de Reynolds a été proposée.

L'énergie dissipée par le système d'agitation pour réaliser les opérations de mélange et de dispersion, représente le paramètre le plus important pour choisir le système d'agitation le plus adéquat. Le taux d'énergie dissipée expérimental est calculé et son évolution est proportionnelle aux nombres de Reynolds et inversement proportionnelle aux nombres d'éléments mélangeurs. La gamme de valeurs est comprise entre [0,067 W/kg-0,86 W/kg]. Une corrélation pour le calcul de ce dernier a été proposée et qui est fonction du nombre d'éléments mélangeur et du nombre de Reynolds.

Les constantes de temps caractéristiques ont été calculées en utilisant les données du taux d'énergie dissipée. Ces constantes de temps caractéristiques nous a permis d'identifier le phénomène qui gouverne l'opération de mélangeage. Le processus de mesomixing par dispersion turbulente τ_d domine le mélange indépendamment du nombre de Reynolds dans l'intervalle [8116-18938] avec $\tau_{d\ max} = 1,88s$. De plus, et à un degré moindre, le processus de macromixing par convection et dispersion turbulente provoquée par de grand tourbillons τ_c avec $\tau_{c\ max} = 1,8\ s$ pour $Re=8116$, intervient dans les processus de mélanges.

8. Remerciement

La partie expérimentale effectuée dans le cadre de ce travail a été réalisée au niveau du Laboratoire de Mécanique des Fluides Théorique et Appliquée (LMFTA).

9. References

- [1] Morançais P, Hirech K, Carnelle G, Legrand J. Friction factor in static mixer and determination of geometric parameters of SMX Sulzer mixers. Chemical Engineering Communications 1999; 171: 77-93.
- [2] Thakur RK, Vial CH, Nigam KDP, Nauman EB, Djelveh G. Static mixers in the process industries-A Review. Trans IchemE 2003; 81: 787-825.
- [3] Hammoudi M. Contribution à l'étude des écoulements de fluides diphasiques à travers un milieu poreux, effets de mélanges. Phd thesis, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Faculté de physique 2008.

- [4] Krolczyk JB, Rezwiakow A, Tukiendorf M. Mixing of biomass and coal in a static mixer as an example of technological solutions involving implementation of renewable energy sources. *Ecological Chemistry and Engineering S* 2014; 21: 685-696.
- [5] Hammoudi M, Si-Ahmed EK, Legrand J. Dispersed two-phase flow analysis by pulsed ultrasonic velocimetry in SMX static mixer. *Chemical Engineering Journal* 2012; 191: 463-474.
- [6] Diez AM, Moreira FC, Marinho BA, Espindola JCA, Paulista LO, Sanroman MA, Pazos M, Boaventura RAR, Vilar VJP. A step forward in heterogeneous photocatalysis: Process intensification by using a static mixer as catalyst support. *Chemical Engineering Journal* 2018; 343: 597-606.
- [7] Jaffer SA, Wood PE. Quantification of laminar mixing in the Kenics static mixer: an experimental study. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 1998; 76: 516-521.
- [8] Sir J, Lecjaks Z. Pressure drop and homogenization efficiency of a motionless mixer. *Chemical Engineering Communications* 1982; 16: 325-334.
- [9] Hirech K, Caractérisation des écoulements monophasiques et dispersés dans les mélangeurs statiques Sulzer SMX. Utilisation des mélangeurs dans les procédés de micro encapsulation. Phd Thesis, Génie des Procédés, CRTT, Univ de Nantes 2000.
- [10] Hirech K, Arhaliass A, Legrand J, Experimental Investigation of flow regimes in an SMX Sulzer static mixer. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2003; 42: 1478-1484.
- [11] Legrand J, Hirech K, Arhaliass A. Effect of a liquid dispersed phase on the wall flow structure in static mixer. *International Journal of Multiphase Flow* 2006; 32: 593-605.
- [12] Hammoudi M, Legrand J, Si-Ahmed EK, Salem A. Flow analysis by pulsed ultrasonic velocimetry technique in Sulzer SMX static mixer. *Chemical Engineering Journal* 2008; 139: 562-574.
- [13] Hjertager LK. Experimental and computational study of mixing and fast chemical reactions in turbulent liquid flows. Phd Thesis, Aalborg University, Faculty of Engineering and Science 2004.
- [14] Baldyga J, Pohorecki R. Turbulent micromixing in chemical reactors. *Chemical Engineering journal* 1995; 58: 183-195.
- [15] Hammoudi M, Belhamel M, Si-Ahmed EK. Caractérisation locale des mélanges de fluides à l'aide d'une méthode non intrusive (la vélocimétrie ultrasonore pulsée). *Revue des Energies Renouvelable* 2008; 4: 557-566.

- [16] Vicum L, Ottiger S, Mazzotti M, Makowski L, Baldyga J. Multi-scale modeling of reactive mixing process in semibatch stirred tank. *Chemical Engineering Science* 2004; 59: 1767-1781.
- [17] Baldyga J, Bourne JR. Simplification of micromixing calculations. I. derivation and amplification of a new model. *Chemical Engineering Journal* 1989; 42: 83-92.
- [18] Baldyga J, Bourne JR. Interactions between mixing on various scales in stirred tank reactor. *Chemical Engineering Science* 1992; 47: 1839-1848.
- [19] Baldyga J, Bourne JR, Hearn SJ. Interaction between chemical reactions and mixing on various scales. *Chemical Engineering Science* 1997; 52: 457-466.
- [20] Fang JZ, Lee DJ. Micromixing efficiency in static mixer. *Chemical Engineering Science* 2001; 56: 3797-3802.
- [21] Ranade VV. *Computational flow modeling for chemical reactor engineering*. 1st ed. Academic Press; 2002.
- [22] Fournier MC, Falk F, Villermaux J. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency-Determination of micromixing time by a simple mixing model. *Chemical Engineering Science* 1996; 51: 5187-5192.
- [23] Baldyga J, Rohani S. Micromixing described in terms of inertial-convective disintegration of large eddies and viscous convective interaction among small eddies. *Chemical Engineering Science* 1987; 42: 2597-2610.

Nomenclature

D_t : Coefficient de la diffusion moléculaire	(m ² /s)
d : Diamètre interne de la conduite	(m)
dp : Diamètre de pore	(m)
Ed : Taux de l'énergie dissipée	(W/kg)
Ed_{exp} : Taux d'énergie dissipée expérimentale	(W/kg)
Ed_{theo} : Taux d'énergie dissipée théorique	(W/kg)
f_p : Facteur de frottement de pore	(-)
L_{ms} : Longueur du mélangeur statique	(m)
N : Nombre d'élément mélangeur	(-)
ΔP_{ms} : Perte de charge en présence du mélangeur statique	(Pa)

Q_V : Débit volumique	(m ³)
$Re = \frac{u*\rho*d}{\mu}$: Nombre de Reynolds	(-)
$Re_P = \frac{u_p*d_P*\rho}{\mu}$: Reynolds de pore	(-)
$S_c = \frac{\mu}{\rho*D_t}$: Nombre de Schmidt	(-)
u : Vitesse moyenne de l'écoulement	(m/s)
$u_p = \frac{\tau*u_b}{\varepsilon}$: Vitesse de pore	(m/s)
$u_b = \frac{4*Q_V}{\pi*d^2}$: Vitesse débitante	(m/s)
V_{ms} : Volume de la section de mélange sans mélangeur	(m ³)
V_{vide} : Volume de la section de mélange avec mélangeur	(m ³)
ε : Porosité	(-)
ϑ : Viscosité cinématique	(m ² /s)
μ : Viscosité dynamique	(kg/m.s)
ρ : Masse volumique	(kg/m ³)
τ : Tortuosité	(-)
τ_c : Constante de temps caractéristique du macromixing par effet convectif	(s)
τ_d : Constante de temps caractéristique du mesomixing par effet de la dispersion turbulente	(s)
τ_e : Constante de temps caractéristique du micromixing par englobissement	(s)
τ_{exp} : Constante de temps caractéristique du micromixing exponentiel	(s)
τ_g : Constante de temps caractéristique du micromixing par effet de la diffusion moléculaire	(s)
τ_{linear} : Constante de temps caractéristique du micromixing lineaire	(s)
τ_s : Constante de temps caractéristique du mésomixing par effet de la Désintégration convecto-inertielle	(s)