Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 557 – 566
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v11i4.105

Caractérisation locale des mélanges de fluides à l'aide d'une Méthode non intrusive (la vélocimétrie ultrasonore pulsée)

Mhamed Hammoudi[1,2*], Maiouf Belhamel[2] et El-Khider Si-Ahmed[1]

[1] Laboratoire de Mécanique des Fluides Théorique et Appliquée, Faculté de Physique,
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiene,
B.P. 32, El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie
[2] Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(reçu le 25 Octobre 2008 – accepté le 25 Décembre 2008)

Résumé - *Les opérations de mélanges ou de dispersion sont largement rencontrées dans de nombreux procédés industriels. En effet, les processus d'homogénéisation et de transformation, physique ou chimique, de la matière ou du transfert d'énergie sont à la base de nombreux secteurs industriels, tels que: l'agroalimentaire, la pétrochimie, l'industrie pharmaceutique, la cosmétique, la papeterie… Néanmoins, le choix des systèmes d'agitations, permettant de réaliser les opérations de mélangeages ou d'extractions, dépend essentiellement de leurs capacités de transferts de masse et d'énergie, leur efficacité, ainsi que de leur consommation énergétique. L'extraction des profils de vitesses et ceux de l'intensité turbulente par vélocimétrie ultrasonore pulsée permet d'estimer quantitativement et qualitativement l'évolution locale et globale du mélange à toutes les échelles (macroscopique, intermédiaire et microscopique) à travers l'estimation des temps de mélange multi échelle ou bien à l'aide de l'indice de ségrégation. Dans ce travail, nous allons présenter les mécanismes inhérents à chaque échelle de mélange en associant ces derniers aux effets hydrodynamiques rencontrés lors d'un écoulement de fluide à travers un mélangeur statique de type SMX. A cet effet, on présentera en premier lieu, les évolutions des profils de vitesses et ceux de l'intensité turbulente obtenus par vélocimétrie ultrasonore pulsée. L'analyse hydrodynamique de l'écoulement permet d'estimer les temps de mélanges multi échelle en fonction du débit et de caractériser la qualité du mélange à travers le SMX en régime turbulent. L'objectif de ce travail est de valider une approche locale et donc plus précise de la détermination des temps de mélanges multi échelles (macro mixing, méso mixing et micro mixing), à l'aide d'une méthode non intrusive; la VUP. Cette approche permettra de mieux apprécier l'impact de la turbulence locale sur les processus de mélanges. Une application future de cette approche pourra être envisagé dans les mélanges gazeux et plus particulièrement ceux contenant l'hydrogène.*

Abstract - *The operations of mixtures or dispersion are largely met in many industrial processes. Indeed, the processes of homogenisation and transformation, physics or chemical, of the matter or the transfer of energy are at the base of many industrial sectors such as: the agro alimentary one, petrochemistry, pharmaceutical industry, it cosmetic, the paper mill… Nevertheless, the choice of the systems of agitations making it possible to carry out the operations of mixing (blending) or extractions depends primarily on their capacities of mass and energy transfer, their effectiveness as well as theirs power consumption. The extraction of the profiles of speeds and those of the turbulent intensity by pulsated ultrasonic velocimetry makes it possible to estimate quantitatively and qualitatively the local and total evolution of the mixing time at all the scales (macroscopic, intermediate and microscopic) through the estimate of times of multi-scale mixture or using the index of segregation. In this work, we will present the intrinsic*

* mhammoudi@cder.dz

mechanisms in each scale of mixture by associating the latter the hydrodynamic effects met during a fluid flow through the SMX static mixer. For this purpose, one will present initially, the evolutions of the velocity profiles and those of the turbulent intensity obtained by pulsated ultrasonic velocimetry. The hydrodynamic analysis of the flow makes it possible to estimate times of multi-scale mixtures according to the flow and to characterize the quality of the mixture through the SMX in turbulent flow. The objective of this work is to validate a local approach and thus more precise of the determination of times of mixing in different scales (macro mixing, meso mixing and micro mixing), using a non intrusive method; the VUP. This approach will make it possible to appreciate the impact of local turbulence on the processes of mixing. A future application of this approach could be considered in the mixtures gas and more particularly those containing hydrogen.

Keywords: Static mixer - SMX - Pulsed ultrasonic velocimetry – Macro mixing – Meso mixing - Micro mixing.

1. INTRODUCTION

Bien que l'action de mélanger remonte à l'origine de la civilisation humaine, le mot 'mélange' n'apparaît dans la langue française qu'au XV^{e} siècle. Il provient du mot 'mêlé' avec lequel toutefois on ne doit le confondre. Ce dernier est associé à un désordre inhérent alors que mélanger signifie combiner, assembler dans des proportions données.

Il faudra patienter jusqu'à la seconde moitié du XIX^{e} siècle pour voir apparaître la notion de 'mélangeur' qui est un outil permettant le mélange de substances. A la même époque, le mot agitateur acquiert une signification supplémentaire et désigne une pièce mobile servant à créer un mouvement mécanique engendrant le mélange.

Un siècle plus tard, apparaît une locution 'mélangeurs statiques', pour désigner des dispositifs de mélange sans pièces mobiles insérés dans des conduites [1].

Un nombre imposant (26) de synonymes s'associent au verbe mélanger. On peut en citer quelques uns afin d'en souligner leur emploi au quotidien: amalgamer, allier, brasser, brouiller, composer, combiner, couper, distribuer, disperser, emmêler, fusionner, incorporer, malaxer ou bien simplement touiller,. Cette liste non exhaustive suffit à montrer toute la diversité des sens accordés à l'action de mélanger et sa prépondérance dans les diverses activités humaines, telles que l'agroalimentaire, la pétrochimie, l'industrie pharmaceutique, la cosmétique, la papeterie ou simplement le quotidien… Il apparaît clairement que les opérations de mélange ne constituent sans aucun doute et de tout temps un des aspects les plus importants du génie des procédés.

Néanmoins, le choix des systèmes d'agitations permettant de réaliser les opérations de mélangeages ou d'extractions dépend essentiellement de leurs capacités de transferts de masse et d'énergie, leur efficacité ainsi que de leur consommation énergétique.

Comprendre les divers effets engendrant le mélange à ses différentes échelles dans l'objectif d'en modéliser le comportement revêt un intérêt non seulement scientifique mais aussi technique permettant d'en optimiser l'utilisation.

L'obtention des mélanges est réalisée en général à l'aide de dispositifs mécanisés (cuves agitées, extrudeuses,.) ou bien non mécanisés (colonnes à garnissage, mélangeurs statiques,.). Récemment, ces derniers ont vu leur utilisation augmenter considérablement, de part leur faible coût de fabrication, leur robustesse et une quasi-

absence d'entretien. A titre indicatif, plus de 8000 articles scientifiques décrivent les mélangeurs statiques et leurs applications. Une trentaine de modèles sont actuellement commercialisés et approximativement 2000 brevets inscrits aux USA [2].

Les mélanges sont obtenus aussi bien en régime laminaire que turbulent et afin de caractériser les mélanges à différentes échelles, il suffit d'obtenir les temps caractéristiques de mélanges multi échelles qui dépendent essentiellement des paramètres hydrodynamiques à savoir, les profils des vitesses, ceux de l'intensité de turbulence, l'énergie cinétique dissipée et le taux de dissipation de cette dernière (V , I , K et ε) [3].

Accéder aux champs de vitesses et celui de la turbulence par Vélocimétrie Ultrasonore Pulsée VUP permet d'obtenir l'évolution locale et globale des temps de mélange multi échelle qui caractérisent le micro mélange, le méso mélange et le macro mélange.

En premier lieu, on étudie les régimes d'écoulements d'un fluide monophasique (l'eau) dans une gamme de Reynolds défini par rapport au SMX 50, entre 1030 et 13270 ($490 < Re_p < 6320$) [4]. L'étude est menée conjointement en amont, à l'intérieur et en aval du SMX 50. L'analyse des profils de vitesses et ceux de l'intensité turbulente, permettra d'estimer les temps de mélanges qui détermineront la qualité du mélange et cela pour les différents débits étudiés.

A cet effet, un montage expérimental réalisé en collaboration avec le CRTT de Saint-Nazaire. Il permet d'insérer un mélangeur statique dans une conduite de diamètre $D = 50\,mm$ et ayant une longueur totale de $20\,D$. La sonde ultrasonore de mesure est positionnée en amont, au sein et en aval du mélangeur statique de type SMX (Fig. 1).

Dans le cadre de ce travail, l'Eddy Dissipation Concept ainsi (EDC) que le Multi-Time Scale [5-7] sont appliquées afin de modéliser l'évolution des temps de mélange résumés dans le tableau suivant:

Tableau 1: Temps caractéristiques des différentes échelles de mélange

Mixing				
Macro mixing	**Meso mixing**		**Micro mixing**	
$\tau_C = \frac{L_R}{U_R}$	$\tau_D = 8.334 \frac{Q_v}{u(\varepsilon L_k^4)^{1/3}}$	$\tau_S = 204 \left(\frac{L_k^2}{\varepsilon}\right)^{1/3}$	$\tau_E = 1725 \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}$	$\tau_G = \tau_E \left(0.030 + \frac{17050}{Sc}\right)^{-1}$
Convection (Champ moyen)	Dispersion turbulente	Désintégration Convective Inertielle	Engloutissement (Engulfment)	Diffusion moléculaire
$\tau_C = \frac{L_R}{U_b}$	$\tau_D = 8.797 \frac{Q_v}{u(u')L_k}$	$\tau_S = 2.153 \left(\frac{L_k}{u'}\right)^{1/3}$	$\tau_E = 18.70 \left(\frac{\nu L_k}{u'^3}\right)^{1/2}$	$\tau_G = \frac{18.70 \left(\frac{\nu L_k}{u'^3}\right)^{1/2}}{\left(0.030 + \frac{17050}{Sc}\right)}$

2. MONTAGE EXPERIMENTAL ET METROLOGIE ASSOCIEE

La méthode expérimentale utilisée est la vélocimétrie ultrasonore pulsée (VUP) qui permet d'obtenir des profils de vitesses de part et d'autre du SMX50 ainsi qu'à l'intérieur de ce dernier (Fig. 1). Le choix de la méthode VUP est dicté par sa grande précision, le nombre de points constituant le profil, ainsi que par la possibilité de son utilisation à l'étude des émulsions.

Le DOP1000 de '*Signal Processing S.A. Switzerland*', [8], reposant sur la méthode VUP, permet d'extraire à l'aide d'un échantillonnage de 512 mesures, la valeur moyenne de la vitesse, l'écart type, la valeur minimale et maximale de celle-ci, et cela en tout point du faisceau ultrasonore. La vitesse est calculée à partir de l'expression suivante:

$$V = \frac{C_{eff} \times f_D}{2\, f \cos(\theta)} \tag{1}$$

L'intensité locale de la turbulence sera estimée de la façon suivante:

$$I(\%) = 100\, \frac{\sqrt{(u - \bar{u})^2}}{U} \tag{2}$$

Où U représente la vitesse débitante moyenne $U_b = \frac{4\,Q}{\pi\, D^2}$ à l'extérieur du mélangeur et au sein de ce dernier elle sera remplacée par la vitesse moyenne de pore $U_p = \frac{\tau\, U_b}{\varepsilon}$.

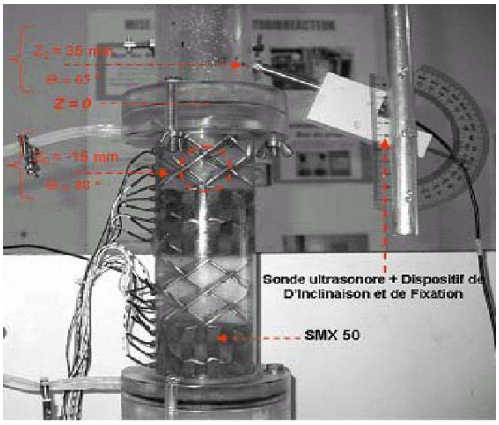

Fig. 1: Position de la sonde ultrasonore

La sonde ultrasonore est placée le long de la conduite, selon différentes positions repérées par les côtes Z_1, en amont du SMX, Z_2 en aval de celui-ci et finalement Z_0 au sein du 4ème élément constituant le mélangeur.

Pour extraire les données au sein du SMX, l'angle θ. utilisé vaut 81°. Ce choix est dicté par le squelette de la matrice constituant le SMX.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Evolution des profils de vitesses et de l'intensité turbulente

L'ensemble des courbes donne l'évolution de la vitesse axiale en fonction de la distance relative à la paroi X / D . Les traits verticaux représentent les erreurs relatives, estimées à l'aide de l'écart type calculé localement et délivré par le DOP 1000.

Les figures sont disposées de la façon suivante:

Les figures 2.a, 2.b, 3.c représentent l'évolution du champ de vitesse respectivement en amont au sein, en aval du SMX, et cela pour un $Re = 4880$ ($Re_p = 2320$).

Les figures 3.a, 3.b, 3.c représentent l'évolution de l'intensité de la turbulence respectivement en amont au sein, en aval du SMX, et cela pour un $Re = 4880$ ($Re_p = 2320$).

La figure 2.a montre un aplatissement du profil de vitesses en amont du SMX, révélant ainsi la nature turbulente de l'écoulement pour la plus part des débits étudiés.

La figure 2.b illustre les évolutions du profil de vitesse au sein du SMX. L'ensemble des profils étudiés mais non présentés dans ce papier présentent des évolutions identiques, dont les valeurs extrêmes (maximum et minimum) ne cessent d'augmenter avec le nombre de Re. Dans cet axe de mesure, on relève la présence de valeurs négatives de la vitesse au voisinage de la paroi proximale. La valeur des pics est proportionnelle au régime d'écoulement alors que leur position est inversement proportionnelle à ce dernier; elle passe de $0.3\,D$ à $0.25\,D$ pour des $Re > 3000$.

Cette dernière constatation met en évidence la présence d'une zone de recirculation qui présente des pics croissants au détriment de son étendue et cela avec l'augmentation du régime d'écoulement. Au voisinage immédiat de la paroi distale, on constate la présence d'un pic de vitesse positif dont l'importance diminue au profit d'une homogénéisation avec l'augmentation de Re.

A la sortie du SMX, un profil de vitesse présentant de pics positifs au voisinage immédiat de la paroi révélant la présence de canaux d'écoulements privilégiées. La valeur du maximum de vitesse est proportionnelle au nombre de Re.

Quant à l'intensité de la turbulence, elle présente les caractéristiques suivantes selon la position de la sonde de mesure.

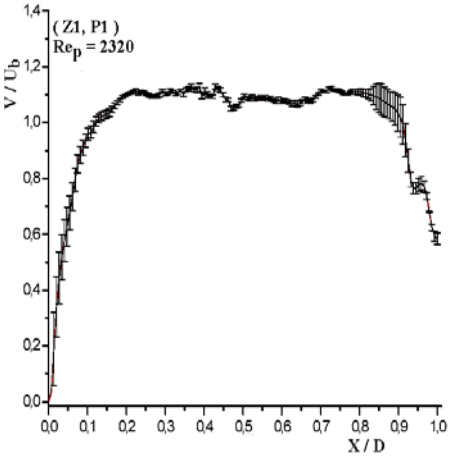

Fig. 2.a: $(Z1, P1)$, $Re_p = 2320$, $Re = 4880$

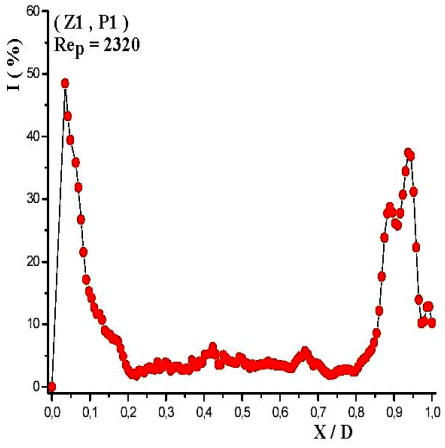

Fig. 3.a: $(Z1, P1)$, $Re_p = 2320$, $Re = 4880$

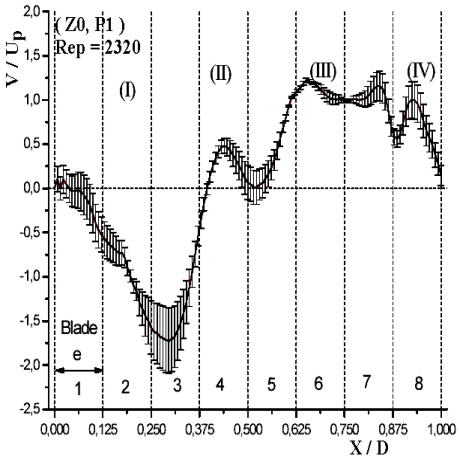

Fig. 2.b: $(Z0, P1)$, $Re_p = 2320$

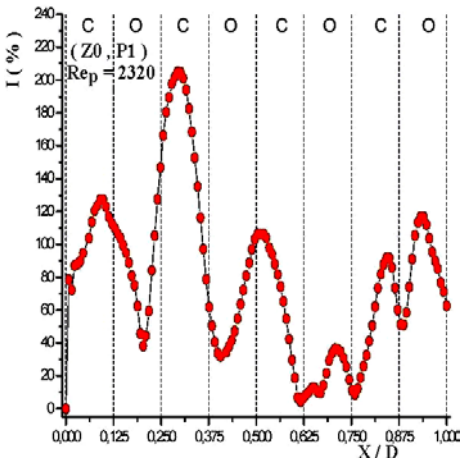

Fig. 3.b: $(Z0, P1)$, $Re_p = 2320$

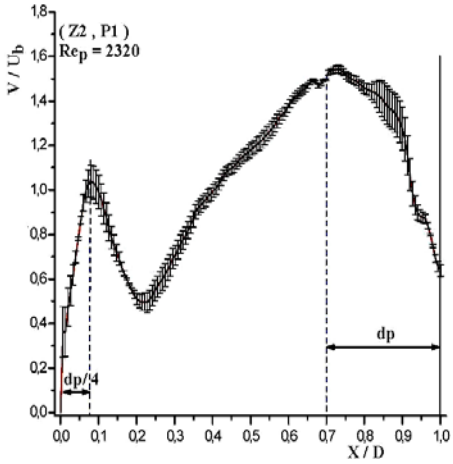

Fig. 2.c: $(Z2, P1)$, $Re_p = 2320$, $Re = 4880$

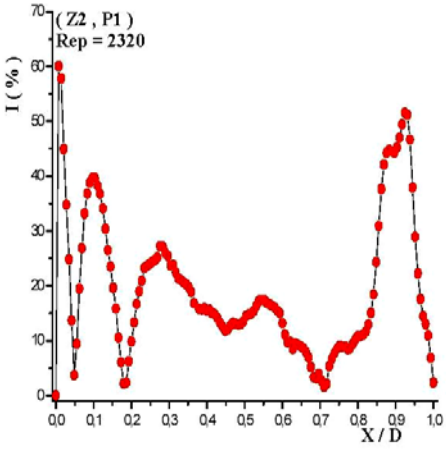

Fig. 3.c: $(Z2, P1)$, $Re_p = 2320$, $Re = 4880$

La figure 3.a montre un profil aplati au centre de la conduite dont la valeur n'excède pas les 5 %, alors qu'en paroi cette valeur augmente considérablement pour atteindre les 50 %. L'augmentation du débit d'écoulement diminue cette valeur pour la ramener à pratiquement 30 %, ce qui est en bonne concordance avec les valeurs obtenus pour des écoulements à l'intérieur de conduites circulaires.

La figure 3.b montre une augmentation considérable de l'intensité de la turbulence et son évolution spatiale est à caractère périodique dont les maximums et minimums correspondent respectivement aux canaux obturés ou bien ouverts à l'écoulement. Les dimensions de ces canaux sont en accord avec la largeur des lames constituant le SMX.

L'intensité maximale de la turbulence proportionnelle au nombre de Re. Elle passe de 180 % à 260 %. A la sortie du mélangeur statique, la figure 3.c illustre le caractère

variable de la turbulence en fonction de sa position radiale. Des pics de moindre importance (< 40 %) aux voisinages des parois sont observés, mais aussi des minimums d'intensité de turbulence révélant la position des canaux d'écoulements privilégiés et les zone d'accélération de fluide.

3.2 Evolution des temps de mélange multi échelles

Dans ce qui suit, on présentera les évolutions comparées des temps de mélanges multi échelles en fonction du débit d'écoulement au sein et en aval du SMX.

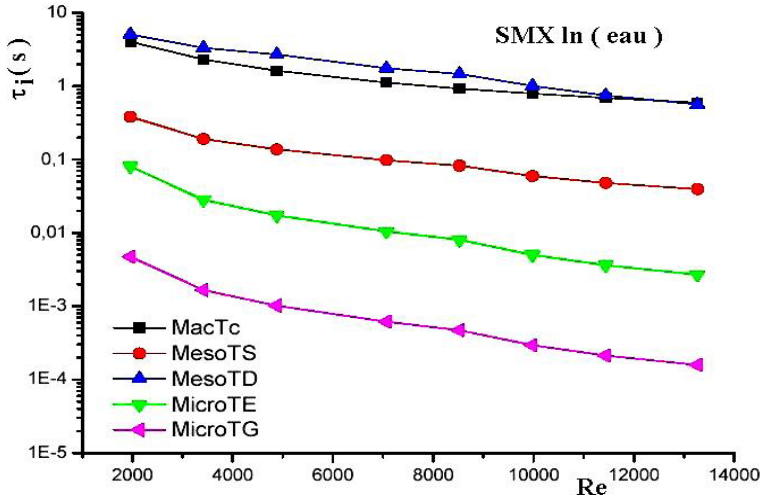

Fig. 4: Evolution comparée des temps caractéristiques à différentes échelles de mélange (macro mixing – Meso mixing – Micro mixing) en fonction du nombre de Reynolds au sein du SMX

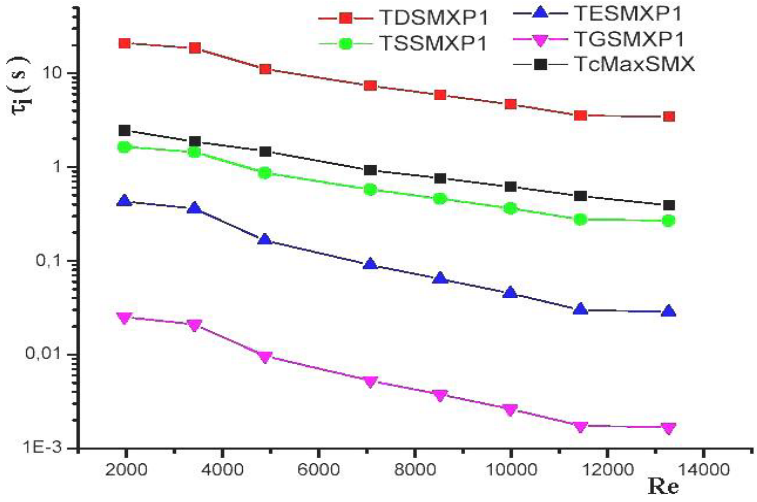

Fig. 5: Evolution comparée des temps caractéristiques à différentes échelles de mélange (Macro mixing – Meso mixing – Micro mixing) en fonction du nombre de Reynolds en aval du SMX à 0.7D en P1

Les figures 4 et 5 révèlent une décroissance en fonction du nombre de Reynolds Re. Les processus de mélanges à l'échelle intermédiaire (τ_D) gouvernent le mélange en aval du SMX et cela pour l'ensemble des débits et les positions circonférentielles étudiés.

Au sein du SMX, le mélange par effet de désintégration inertielle et convective (τ_S) est en moyenne 25 fois plus rapide que le mélange induit par la diffusion turbulente (τ_D). Cette constatation montre que méso mélange par effet de diffusion turbulente gouverne les processus de mélange à l'échelle intermédiaire au sein d'un SMX.

L'analyse des résultats montre que les temps de mélanges à l'échelle intermédiaire (meso mixing) au sein du SMX sont plus faibles que ceux rencontrés en aval du mélangeur statique. Ils sont entre 1 et 4 fois plus faibles pour (τ_D) et entre 3 et 7 fois plus faibles pour (τ_S) pour $Re = 1960 \cdots\cdots 13270$.

L'augmentation du débit induit une diminution du temps du micro mixing (τ_E, τ_G) qui est dépendant de la position circonférentielle. Au sein du SMX, l'évolution en fonction du débit peut être décrite par une fonction de type $a / Re^{3/2}$, conformément aux travaux de [9, 10].

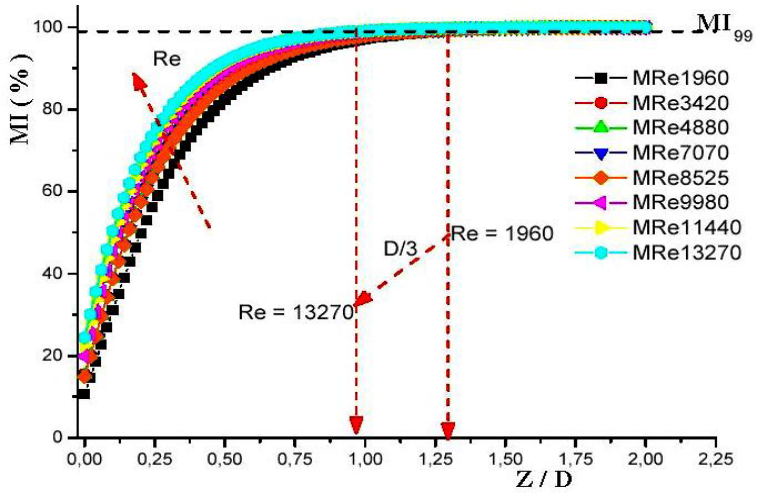

Fig. 6: Variation de l'indice de mélange en fonction du débit d'écoulement

Comme le montre la figure 6, la qualité du mélange est liée à son débit d'écoulement. Le mélange survient plus rapidement en aval du SMX à une distance allant de 1.3 D à 0.98 D pour la gamme de Re comprise entre 1960 et 13270. A titre indicatif le mélange survient entre 10 et 20D pour une conduite libre.

4. CONCLUSION

La méthode expérimentale utilisée, à savoir la vélocimétrie ultrasonore pulsée (VUP) a permis une cartographie de l'écoulement après une validation de celle-ci. Elle a permis d'obtenir le champ de vitesse et celui de l'intensité de turbulence à l'extérieur et

au sein du SMX. Les résultats expérimentaux obtenus peuvent d'une part servir de base de comparaison aux simulations numériques et d'autre part de comprendre et de décrire les écoulements à l'intérieur d'un mélangeur statique, afin d'en optimiser son rendement.

Par ailleurs, l'étude du comportement de l'intensité de turbulence a montré le caractère local des processus de mélange. De plus, la vélocimétrie ultrasonore pulsée peut être utilisée dans l'analyse des écoulements monophasiques et diphasiques. Une extension aux fluides rhéologiques opaques est possible. Les profils de vitesses et d'intensité turbulente permettent d'obtenir les évolutions de l'énergie cinétique dissipée (K) et le taux de dissipation visqueuse ε .

De ce fait, une estimation des temps caractéristiques de mélanges multi échelles a été possible Permettant d'apprécier les évolutions en fonction du débit d'écoulement du macro mixing, Mesomixing et micro mixing.

Une comparaison systématique de τ_G avec les temps caractéristiques des réactions chimiques τ_{R_i} , permettra de statuer sur la position des réactions les plus probables.

Le micromélange et donc les réactions chimiques dépendent intimement du débit d'écoulement ainsi que de la structure du réacteur utilisée à travers la dépendance spatiale des paramètres hydrodynamiques. Le mélange à l'échelle microscopique survient plus rapidement et obéit à une loi de type $a \,/\, Re^{3/2}$.

Remerciements: La partie expérimentale effectuée dans le cadre de cette investigation a été réalisée au Centre de Recherches et de Transfert des Technologies (CRTT) St-Nazaire (France) avec l'aimable collaboration du Pr. J. Legrand, Directeur du Centre et du GEPEA.

NOMENCLATURE

C_{eff}	Célérité du son dans le milieu effectif, (m/s)	e	Largeur de la lame constituant les éléments du SMX, (m)
D	Diamètre de la conduite, (m)	f	Facteur de frottement
D_m	Coefficient de diffusion moléculaire, (m^2/s)	f_e	Fréquence d'émission ultra sonore, (Hz)
D_t	Coefficient de diffusion turbulent, (m^2/s)	f_D	Effet Doppler, (Hz)
I_s	Intensité de ségrégation	K	Perméabilité du milieu poreux, (m^2)
Q	Débit volumique du fluide en écoulement, (m^3/s)	k	Energie turbulente par unité de masse, (m^2/s^2)
L_c	Macro échelle de fluctuation de la concentration, (m)	L_k	Macro échelle Kolmogorov,(m)
L_p	Longueur des canaux poreux, (m)	L_s	Longueur de ségrégation, (m)
P	Pression locale, (Pa)	P_i	Position circonférentielle de la sonde ultrasonore
r	Coordonnée radiale, (m)	V	Composante axiale de la vitesse, (m/s)
X, Y	Coordonnées, x ; y, (m)	Z	Coordonnée axiale, (m)
Re	Nombre de Reynolds en conduite libre, $(U_b D \rho / \mu)$	Re_p	Nombre de Reynolds de pore, $(U_p d_p \rho / \mu)$

Sc	Nombre de Schmidt, $(\mu / \rho D_t)$	U_b	Vitesse débitante, $(4Q / \pi D^2)$
τ_E	Temps de micro mixing par engloutissement (engulfment)	U_p	Vitesse de pore, $(\tau U_b / \varphi)$
τ_C	Temps de circulation (macro mixing), (s)	τ_D	Temps de diffusion turbulente, (s)
τ_{eff}	Temps effectif de mélange, (s)	τ_G	Temps de micro mixing by diffusion, (s)
τ_{Ri}	Temps de réaction i, (s)	τ_S	temps de meso mixing convecto-inertiel, (s)
α	Angle d'attaque externe, (°)	β	Angle à l'intérieur de la paroi, (°)
ε	Taux de dissipation de l'énergie turbulente, (m^2/s^3)	φ	Porosité moyenne
ϕ	Fraction volumique de la phase dispersée	μ	Viscosité dynamique, (Pa.s)
θ	Angle Doppler, (°)	ρ	Masse volumique, (kg/m^3)

REFERENCES

[1] L. Fradette, H.Z. Li, L. Chauplin and P.A. Tanguy, '*3D Finite Element Simulation of Fluid Through a SMX Static Mixer*', Computation Chemical Engineering, Vol. 22, pp. 759 – 761, 1998.

[2] R.K. Thakur, C. Viala, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman and G. Djelveh, '*Static Mixers in the Process Industries, A Review*', Trans. Chem. Eng. Vol. 81, pp. 787 - 826, 2003.

[3] M. Hammoudi, E.K. Si-Ahmed, J. Legrand and A. Makhlouf, '*Evolution of Field Velocity Throughout an SMX Static Mixer: Experimental Investigation by Pulsed Ultrasonic Velocimetry*', Res. Journal of Applied Science, Medwell Journals, Vol. 1, N°1-4, pp. 38 – 44, 2006.

[4] M. Hammoudi, J. Legrand, E.K. Si-Ahmed and A. Salem, '*Flow Analysis by Pulsed Ultrasonic Velocimetry Technique in Sulzer SMX Static Mixer*', Chemical Engineering Journal, Vol. 139, N°3, pp. 562 – 574, 2008.

[5] J. Baldyga and S. Rohani, '*Micromixing Described in Terms of Inertial-Convective Disintegration of Large Eddies and Viscous-Convective Interaction Among Small Eddies*', Chemical Engineering Science, Vol. 42, N°11, pp. 2597 - 2610, 1987.

[6]J. Baldyga and J.R. Bourne, '*Turbulent Mixing and Chemical Reactions*', J. Wiley & Sons, Chichester, England, 1999.

[7] V.V. Ranade, '*Interaction of Macro and Micro mixing in Agitated Reactors*', Advances in Transport Processes, (Eds. R.A. Ashelkar and A.S. Mujumdar), Vol. 9, Elsevier, New-York, 1993.

[8] Signal Processing S.A, '*Technical Information and Application Notes*', http://www.signal-processing.com, 2002.

[9] M.C. Fournier, L. Falk and J. Villermaux, '*A New Parallel Competing Reaction System for Assessing Micromixing Efficiency, Experimental Approach*', Chemical Engineering Science, Vol. 51, N°22, pp. 5053 - 5064, 1996.

[10] J.Z. Fang and D.J. Lee, '*Micro mixing Efficiency in Static Mixer*', Chemical Engineering Science, Vol. 56, N°12, pp. 3797 – 3802, 2001.