

*L'advection chaotique :
Nouveau procédé de mélange*

Cheikh DJOUDI

Université de DJELFA

Résumé

Le problème de mélange (thermique et massique) connue actuellement une révolution dans les techniques et les procédés afin d'améliorer la qualité du mélange. A cet effet, nous avons deux techniques : la turbulence et l'advection chaotique.

Dans cet article, nous avons étudié les développements, caractérisations et les différents types de quelques mélangeurs chaotiques.

Mots-clés : advection, mélange, turbulence, chaotique, fluide, régime.

INTRODUCTION

Les écoulements turbulents sont très efficaces en termes de mélange. Cependant, ils ont plusieurs inconvénients qui nous motivent de penser à une autre alternative. Citons à titre d'exemple, l'énergie dissipée au sein du fluide par l'agitation turbulente. D'autre part dans certains procédés, on est amené à mélanger ou à chauffer des fluides très visqueux et peu conducteurs de la chaleur. Ces fluides sont souvent des produits contenant de longues chaînes moléculaires susceptibles d'être brisées par les contraintes de cisaillement subies dans les écoulements turbulents. On peut être amené aussi à mélanger des fluides dans des microsystemes où il est très difficile, voire impossible d'atteindre le régime turbulent, vu les tailles des microcanaux dépense énergétique pour conserver l'écoulement turbulent. En plus il y a le risque d'altérer les fluides très visqueux qui sont souvent formés de longues chaînes (polymères) d'une façon irréversible.

Toutes ces inconvénients motivent les chercheurs à trouver une autre technique à savoir l'advection chaotique pour améliorer la qualité du mélange.

I DEFINITION ADVECTION CHAOTIQUE

L'advection chaotique est un régime d'écoulement où les trajectoires des particules sont complètement erratiques dans un régime laminaire.

Le mélange par advection chaotique de fluides permet d'augmenter la diffusion entre les fluides ; en effet, la surface de l'interface entre les fluides s'étirant et se pliant est considérablement augmentée, autorisant un transfert de masse et de transfert thermique efficace entre les fluides.

II DEVELOPPEMENT DE L'ADVECTION CHAOTIQUE

C'est *Aref* qui a mis en évidence cet écoulement où il montre que l'advection chaotique a pour effet l'augmentation de la dispersion des particules. D'un autre côté les travaux de *Leong et Ottino* ont montré que l'advection chaotique augmente le gradient du champ scalaire par étirement et repliement. Le mot « advection chaotique » est apparu pour la première fois officiellement dans un article publié par *Aref* en 1984. Depuis cette année la théorie de l'advection chaotique a connu un essor et un développement considérable.

Aref a montré l'effet de l'advection chaotique sur la dispersion de particules fluides. *Cartwright et al.* A rassemblé les données jetant la base d'une théorie complète de l'advection chaotique, où il a exposé les résultats théoriques et expérimentaux et les simulations numériques qui sont faites dans les écoulements bidimensionnels stationnaires, tridimensionnels stationnaires, et tridimensionnels instationnaires. *Yamamoto et al.* a calculé numériquement les trajectoires de particules fluides dans un conduit hélicoïdal en utilisant le champ de vitesse déjà trouvé dans ses études précédentes.

Chevray et al. Ont fait une étude numérique et expérimentale d'un écoulement entre deux cylindres coaxiaux où ils ont mis en évidence l'amélioration du mélange par l'advection chaotique. *Solomon et al.* ont élaboré une méthode expérimentale pour l'exploitation de mélange chaotique des substances immiscibles (le cas de l'eau et de l'huile) où le formalisme hamiltonien n'est pas valable, ici l'écoulement est forcé par une technique magnétohydrodynamique.

Plusieurs études ont été faites pour contribuer à la compréhension des phénomènes de mélange, parmi ces études citons le travail de *Toussaint et al.* qui a pour la première fois fait une résolution numérique de l'équation **diffusion-convection** d'un scalaire passif à un grand nombre de Peclet par la méthode spectrale pour un écoulement tridimensionnel stationnaire dans un domaine fermé. L'avantage de choisir un grand nombre de Peclet est de favoriser le mécanisme de diffusion par l'advection chaotique afin qu'elle réagisse avant la diffusion moléculaire.

III LES OUTILS DE CARACTERISATION DE L'ADVECTION CHAOTIQUE

L'advection chaotique a pour effet d'augmenter la dispersion de particules fluides et aussi augmenter le gradient de champ scalaire par étirement et repliement.

III-1 TRANSFORMATION DU FER A CHEVAL

La transformation du fer à cheval est une transformation du boulanger dans laquelle le morceau n'est plus empilé mais replié figure (1).

Dans un écoulement chaotique, un carré initial est étiré dans une direction, ce qui provoque sa contraction dans la direction perpendiculaire, puis il est replié sur sa position initiale d'origine.

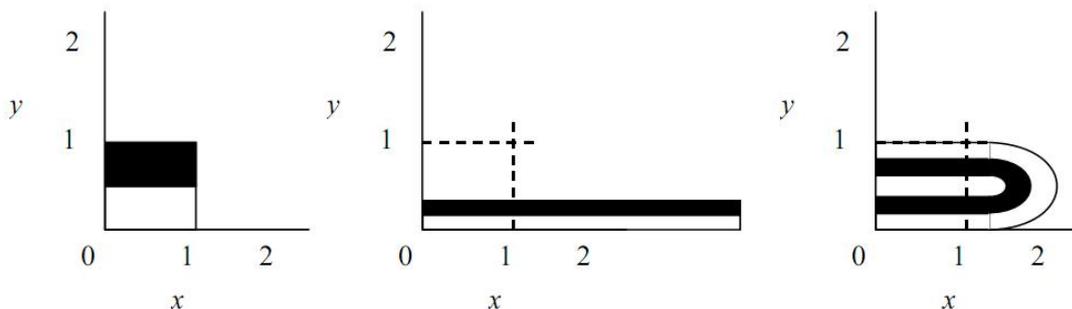


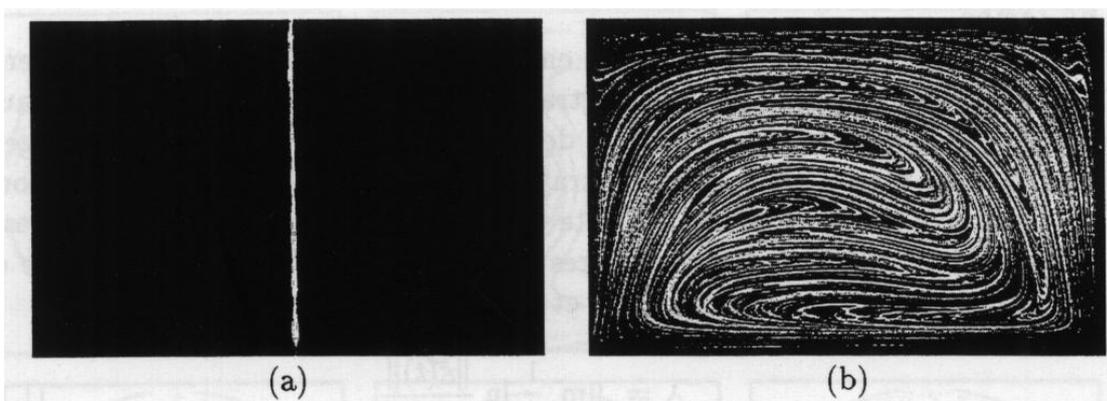
figure (1): Représentation schématique de la transformation du fer a cheval

III-2 L' EXPOSANT DE LYAPUNOV

L'exposant de Lyapunov consiste à étudier l'évolution dans de temps du vecteur $\overline{\varepsilon(t)}$ qui représente la distance infinitésimale qui sépare deux points proches, la norme de vecteur $\overline{\varepsilon(t)}$ augmente au cours de temps si l'écoulement est bidimensionnel instationnaire ou $\overline{\varepsilon(z)}$ si l'écoulement est tridimensionnel stationnaire. Cette croissance est proportionnelle au temps(z) dans une zone régulière alors qu'elle est exponentielle dans une région chaotique à cause de la sensibilité aux conditions initiales

(les parois inférieures et supérieures sont bougés alternativement et périodiquement au cours du temps) figure (2).

L'application de cette technique dans notre cas paraît difficile car il faut avoir un nombre des coudes infinis en plus il faut calculer cet exposant (cette divergence) pour un grand nombre de particules ce qui est impossible expérimentalement.



(a) conditions initiales d'injection du traceur passif

(b) étirement –repliement au bout de quatre périodes de mouvement des parois.

Figure (2): Mélange dans l'écoulement de Stokes dans une cavité rectangulaire.

III-3 LA SECTION DE POINCARÉ

La première théorie qui sert à quantifier les zones chaotiques est la section de Poincaré associée à différentes trajectoires de l'écoulement Figure (3). La section de Poincaré autorise souvent un diagnostic rapide et précis sur la nature des trajectoires. On peut obtenir la section de Poincaré numériquement et expérimentalement pour différents types d'écoulement en injectant un certain nombre des particules à un instant t dans le système et en superposant les différentes répartitions des particules à différents instants dans un système bidimensionnel périodique ou à différentes positions de l'espace dans un système tridimensionnel stationnaire (l'abscisse z se substituant au temps t).

Les sections de Poincaré sont très utiles pour distinguer les régions d'écoulement régulier de celles d'écoulement chaotique. Les régions chaotiques apparaissent sous la forme d'une multitude de points dispersés aléatoirement sur la section alors que les régions régulières sont marquées par la présence des courbes fermées bien matérialisées qui définissent des invariants pour l'écoulement.

La section de Poincaré permet de révéler la structure très détaillée de l'écoulement dans les régions régulières. Par contre, elle ne donne pas de l'indication sur le taux de mélange à l'intérieure des zones chaotiques. La section de Poincaré apporte une réponse qualitative en termes d'efficacité de mélange mais elle ne permet pas de le quantifier.

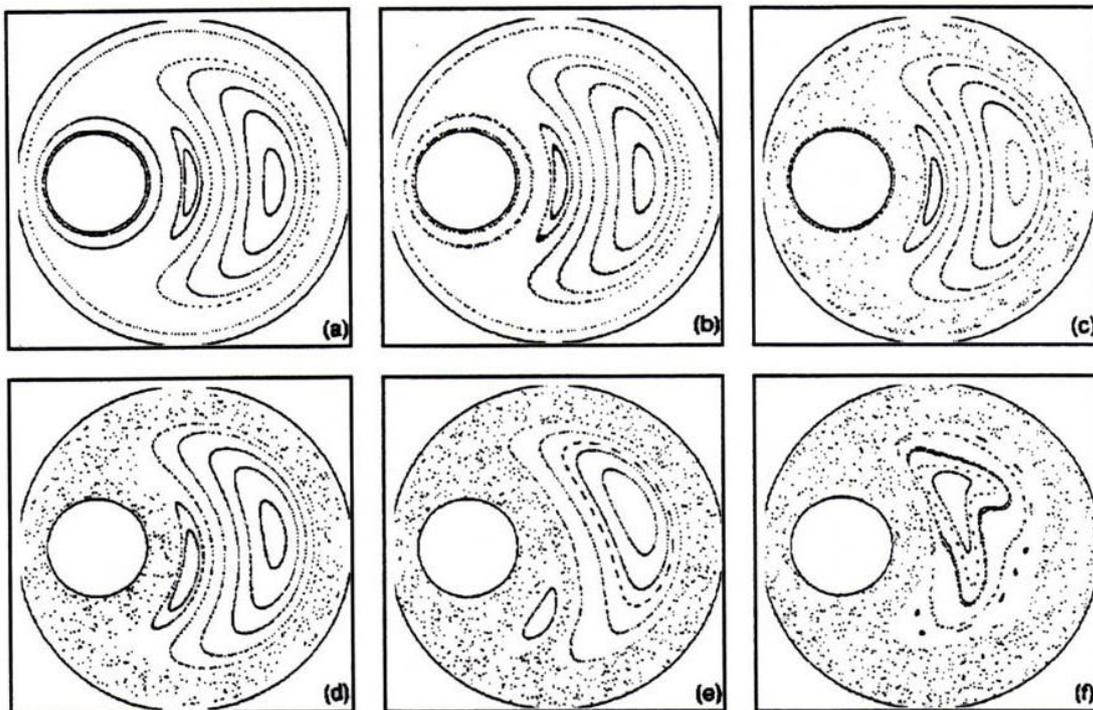


Figure (3) Sections de Poincaré associées à l'écoulement de Stokes entre deux cylindres excentrés pour différentes périodes de rotation des cylindres.

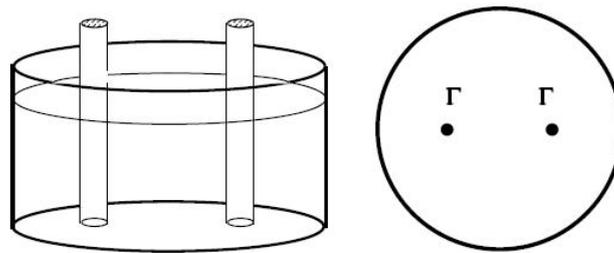
IV TYPE DE QUELQUES MELANGEURS CHAOTIQUE

Diverses configurations géométriques plus ou moins complexes ont ensuite été suggérées. On peut d'emblée les classer selon deux catégories :

- Les configurations fermées où l'écoulement du fluide est confiné dans un volume. Elles s'adaptent donc aux procédés de traitements des fluides « en batch ».
- Les configurations ouvertes où le fluide entre dans le système, y séjourne puis est évacué de façon successive. Ces géométries sont donc adaptables aux procédés de traitement de fluides en continu.

IV-1 VORTEX CLIGNOTANTS D'AREF

Un mélangeur constitué de l'espace annulaire entre deux cylindres excentrés figure (4) a également été proposé par *Aref et Balachandar* (1984). Le principal avantage des configurations fermées est lié au fait que le mélange y est assuré par un mécanisme externe. Il est donc plus aisé d'imposer un protocole de mélange voulu.



*Figure (4): Mélangeur à vortex clignotants
(Aref, 1984)*

IV-2 LE MELANGEUR PARTITIONNE DE KHAKHAR ET AL.

Il est constitué d'un tube droit dans lequel des plaques ont été insérées parallèlement à l'axe du tube figure (5). Les plaques sont animées d'un mouvement de rotation et assurent ainsi l'agitation du fluide. Il y a donc interaction entre le fluide et le mécanisme d'agitation. Cette interaction a pour conséquence d'augmenter considérablement les frottements surtout avec des fluides très visqueux.

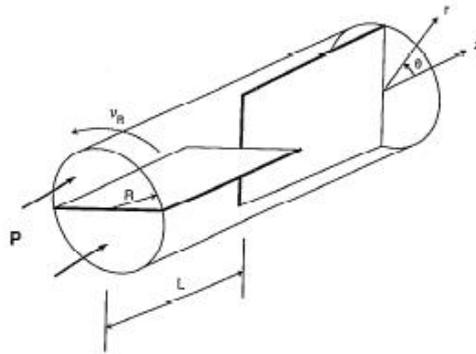


Figure (5): Schéma du mélangeur partitionné
(Khakhar et al., 1987)

IV-3 PROTOTYPE DE TYPE DEAN ALTERNE DE PEERHOSSAINI ET AL.

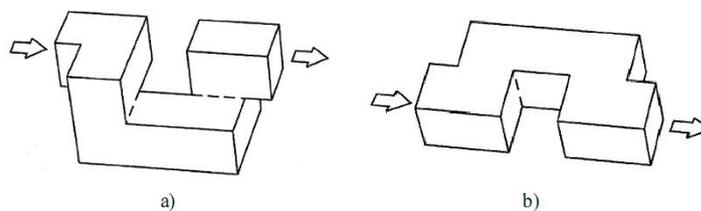
Un prototype d'échangeur-mélangeur figure (6) sur la base de l'écoulement de Dean alterné a été construit et ses propriétés de mélange et d'échange ont été testées.



Figure (6): Prototype de mélangeur chaotique de type Dean alterné
(Peerhossaini et al., 1993)

IV-4 MELANGEUR CHAOTIQUE SERPENTINS DE BEEBE ET AL.

Beebe et al. (2001) présentent également des micromélangeurs constitués de canaux en serpentins figure (7) et en créneaux dont la complexité géométrique dans l'espace permet de réaliser des mélanges plus efficaces que des mélangeurs en ligne.



a) microcanaux en serpentins 3D

b) microcanaux en créneaux

Figure (7): Un segment des micromélangeurs
[Beebe et al.,2001]

CONCLUSION GENERALE

Le mélange chaotique a investi la planète ! Nous le trouvons, en effet, aussi bien dans l'atmosphère, sur terre pour ce qui est de toutes les applications du génie des procédés chimiques et biologiques, a la surface des océans et jusqu'au fond de la terre.

Les applications industrielles du mélange par advection chaotique sont nombreuses dans le domaine des réacteurs (ou microréacteurs) chimiques, dans ceux de la micro fluidique mono ou multiphasique, de la mise en forme et l'assemblage de polymères, des travaux concernant la dynamique des populations de plancton dans l'océan, Le couplage mélange—réaction, de réactions (chimiques, biologiques et/ou physiques).

BIBLIOGRAPHIE

Aref, H. (1984). *Stirring by chaotic advection*. J. Fluid Mech., 143, 1–21.

Leong, C. & Ottino, J. (1989). *Experiments on mixing due to chaotic advection in cavity*. J. Fluid Mechanics, 209, 463–499.

R. Chevray et al. (1986) *Experimental study of Lagrangian turbulence in Stokes flow*. Proc. R. Soc. Lond. A, 408:165–74.

Lasbet, Y. & Castelain, C. (2005). *Caractérisation expérimentale du mélange d'un champ scalaire dans un écoulements spatialement chaotique*. In Proceedings of 17th Congrès Français de Mécanique, Troyes.

V. Toussaint et al. (2000). *Spectral decay of a passive scalar in chaotic mixing*. Phys. Fluids., 12(11) :2834–2844

Rachid khelfaoui (2007). *MICROMELANGEURS : Etude expérimentale et numérique de solutions techniques adaptées aux microsystèmes*.p41-43