

# Etude comparative des méthodes de suivi d'interface pour les écoulements diphasiques

N. DJATI , R. KNIKKER, S. XIN, E. ALBIN

Université de Lyon, CNRS

INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

Université Lyon 1, F-69622, France

[nabil.djati@insa-lyon.fr](mailto:nabil.djati@insa-lyon.fr) ; [ronnie.knikker@insa-lyon.fr](mailto:ronnie.knikker@insa-lyon.fr) ; [shihe.xin@insa-lyon.fr](mailto:shihe.xin@insa-lyon.fr) ;

[eric.albin@univ-lyon1.fr](mailto:eric.albin@univ-lyon1.fr)

## Résumé :

Les écoulements diphasiques sont rencontrés dans la nature sous forme d'écoulements à surface libre et dans de nombreux processus industriels. Ils font intervenir différentes phases (liquide-gaz) et sont souvent caractérisés par des rapports de densité et de viscosité élevés. L'une des principales difficultés rencontrées lors de la simulation numérique de ces écoulements réside dans la bonne représentation de l'interface qui sépare les fluides immiscibles mis en jeu. Elle nécessite d'une part une méthode précise de localisation de l'interface et d'autre part une prise en compte fiable des conditions de saut de pression et de densité à la frontière liquide-vapeur.

Diverses méthodes de suivi d'interface existent dans la littérature ; chacune a ses propres avantages et inconvénients. Dans la présente étude, on s'intéresse aux méthodes eulériennes de type Volume Of Fluid (VOF) et Level-set, ainsi que les couplages VOF-Level set. Level set est une fonction continue de distance signée à l'interface qui obéit à une équation d'advection ; l'étape de réinitialisation/redistanciation sert à préserver la propriété de fonction de distance qui a tendance à s'altérer après advection. La discrétisation spatiale des équations d'advection et de réinitialisation est réalisée à l'aide des schémas numériques de type ENO et WENO.

La méthode Volume of fluid est définie par une fonction discrète de fraction ayant des valeurs comprises entre zéro et l'unité ; elle obéit aussi à une équation d'advection. Le passage de ces fractions à l'interface nécessite un algorithme de reconstruction qui permet d'approximer l'interface par des segments de droites ayant pour équation  $n_x x + n_y y = d$  où  $n_x$  et  $n_y$  sont les composantes de la normale et  $d$  la distance à l'interface.

Les inconvénients limitant les capacités de ces deux méthodes seules sont connus : Level-set permet une meilleure localisation de l'interface et seule VOF permet de conserver rigoureusement la masse. Les couplages permettent de combiner les avantages de chacune dans une seule méthode dite : couplée. La différence principale entre ces couplages réside dans la manière suivant laquelle ces deux méthodes interagissent entre elles. Quelques caractéristiques sont résumées sur la table 1.

Plusieurs cas tests connus avec des champs de vitesse imposés ont permis d'évaluer les performances de ces méthodes de suivi d'interface, comme par exemple le cercle de Zalesak [6], le serpent [7], le serpent inversé dans le temps [8] et le double-vortex dans une boîte [9]. D'autres cas tests nécessitant la résolution des équations de Navier-stokes ne seront pas présentés dans ce travail.

TABLE 1: Méthodes comparées

Méthode	VOF	Level set	Remarques
VOF [1]	Résolue	-	-
Level set [2]	-	Résolue	-
CLSVOF [3]	Résolue	Résolue	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normale déterminée à partir de Level set</li> <li>○ Reinitialisation basée sur Level set &amp; VOF</li> </ul>
VOSET [4]	Résolue	Déduite	○ Level set déterminée à partir de VOF
MCLS [5]	Résolue	Résolue	○ VOF déterminée à partir de Level set puis advectée pour forcer la conservation de masse

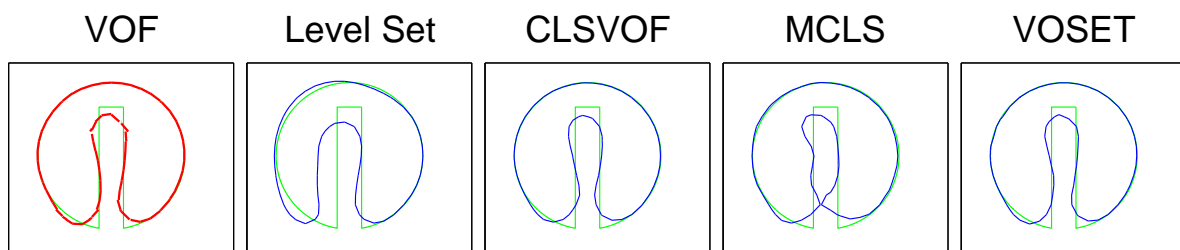


FIGURE 1: Cercle de Zalesak après une rotation, maillage  $50^2$ ,  $CFL=0.5$   
 Vert : solution exacte ; Bleu/rouge : interface après une rotation

Dans ce travail, on présente une étude comparative des cinq méthodes citées dans la table 1 dont Level set, VOF et trois différents couplages. Cette étude a permis de dégager les points forts et faibles de chacune de ces méthodes. La comparaison a été effectuée pour le cas test du cercle de Zalesak (voir Fig. 1), dans lequel la rotation d'un objet solide présentant des singularités est réalisée pour tester la diffusion numérique des méthodes.

Les cas test du serpent, du serpent inversé dans le temps et du double-vortex sont également réalisés pour évaluer l'habileté des méthodes à représenter des déformations des interfaces et filaments. L'interface présente un maximum de déformation à  $t = T/2$  (voir Fig. 2) et revient à sa position initiale à  $t = T$  (voir Fig. 3), où  $T$  est la période et  $t$  le temps. Le cas test du serpent inversé dans le temps et du double-vortex sont également réalisés mais ne sont pas présentés dans ce résumé.

La comparaison entre ces méthodes de suivi d'interface est basée sur deux critères : la conservation de masse (erreur relative  $E_M$ ) et la localisation de l'interface (erreur norme L1 notée  $E_1$ ). Les résultats montrent que pour VOF et les méthodes couplées, la masse totale est conservée quelque soit le maillage et le pas de temps adoptés, ce qui est conforme aux suppositions. Cependant, l'erreur de la localisation est beaucoup plus petite pour des pas de temps plus longs que pour des pas de temps courts. En revanche, la conservation de la masse et la localisation de l'interface dans le cas de Level set dépend non seulement du maillage et du pas de temps, mais aussi de la fréquence de réinitialisation. La fréquence de réinitialisation et le pas de temps peuvent être ajustés afin d'avoir toujours la meilleure conservation de masse et la meilleure prédiction de la position de l'interface.

Pour le cercle de Zalesak suffisamment raffiné, level set prédit la position de l'interface mieux que les méthodes couplées et VOF (Voir Fig. 4). Pour le serpent, Level set rend le filament plus épais, alors

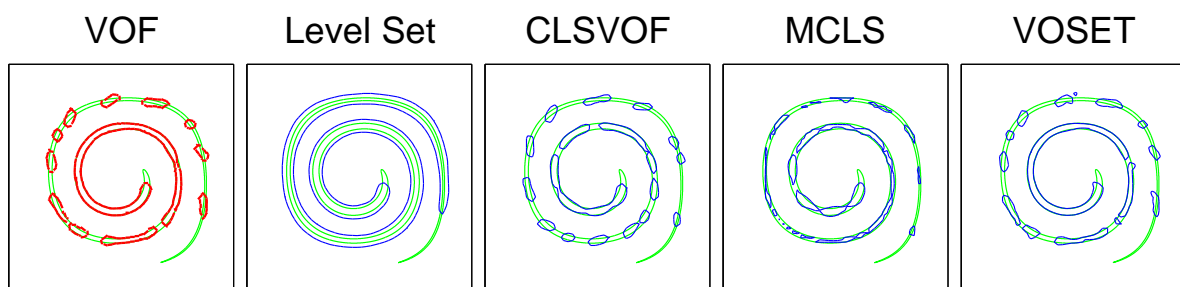


FIGURE 2: Serpentin à  $t=T/2=3$ , maillage  $50^2$ , CFL=0.5  
Vert : solution exacte ; Bleu/rouge : interface prédite par les méthodes de suivi

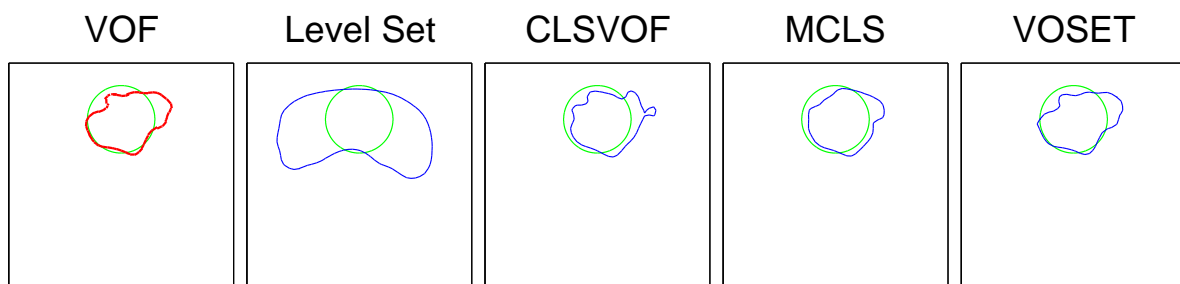


FIGURE 3: Serpentin à  $t=T=6$ , maillage  $50^2$ , CFL=0.5  
Vert : solution exacte ; Bleu/rouge : interface prédite par les méthodes de suivi

que VOF et les méthodes couplées donnent une interface fragmentée. On remarque également que les méthodes couplées permettent de localiser l'interface mieux que les méthodes simples pour le cas test du serpentin (voir Fig. 5).

Nous avons remarqué que les méthodes couplées ont combiné les avantages de level set et de VOF, dans le sens où la masse totale est conservée et les propriétés de l'interface sont déterminées avec précision. Les simulations effectuées montrent que les méthodes couplées donnent des résultats similaires pour ces deux cas tests ; ce qui permet de rajouter d'autres critères de comparaison qui sont :

1. Précision de la courbure de l'interface
2. Aisance de mise en oeuvre des méthodes
3. Facilité d'extension en 2D axisymétrique et 3D

Les deux derniers points seront également abordés.

**Mots clefs : Écoulement diphasique ; Interface ; Level set ; Volume of fluid ; CLSVOF ; MCLS ; VOSET**

## Références

- [1] R. Scardovelli & S. Zaleski, Interface reconstruction with least-square fit and split Eulerian-Lagrangian advection, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 41(3), 251-274. 2003

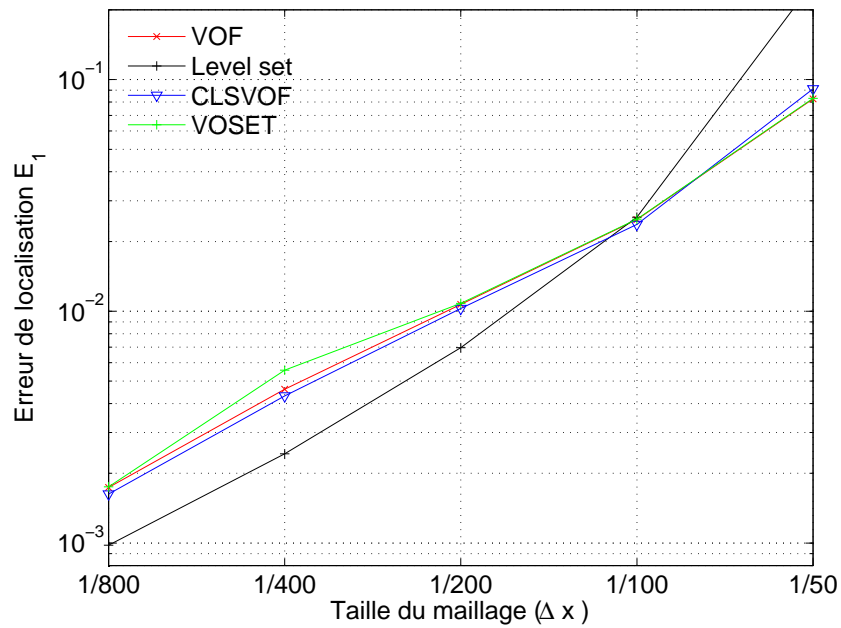


FIGURE 4: Cercle de Zalesak après une rotation, CFL=0.5  
 Erreur de localisation en fonction de la taille du maillage

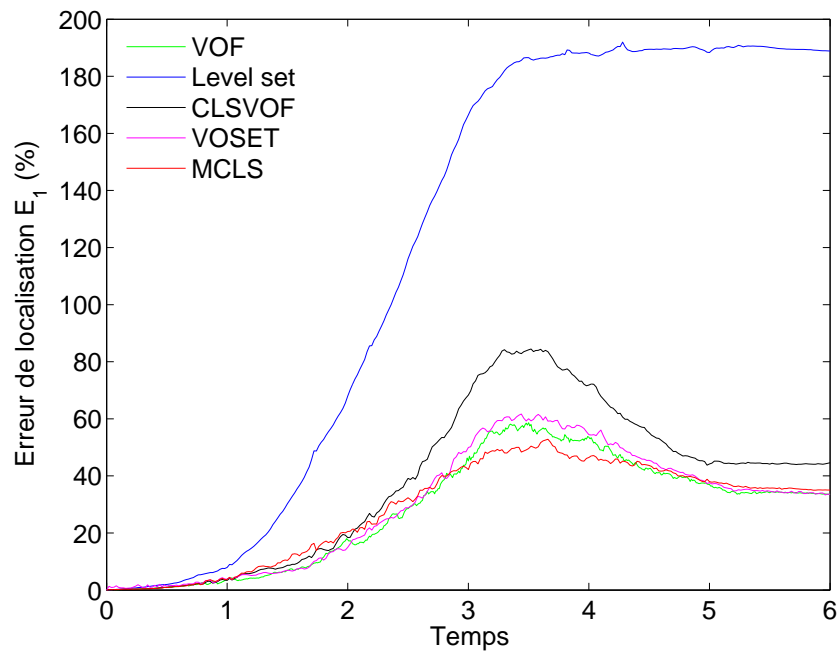


FIGURE 5: Serpentin, maillage  $50^2$ , CFL=0.5  
 Erreur de localisation en fonction du temps

- [2] M. Sussman & E. Fatemi, An efficient interface-preserving level set redistancing algorithm and its application to interfacial incompressible fluid flow, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(4), 1165-1191. 1999
- [3] M. Sussman & E. G. Puckett, A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows, *Journal of Computational Physics*, 162(2), 301-337. 2000
- [4] D. L. Sun , & W. Q. Tao, A coupled volume-of-fluid and level set (VOSET) method for computing incompressible two-phase flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(4), 645-655. 2010
- [5] S. P. Van der Pijl, A. Segal, C. Vuik, & P. Wesseling, A mass conserving level Set method for modelling of multiphase flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47(4), 339-361. 2005
- [6] S. T. Zalesak, Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids, *Journal of Computational Physics*, 31(3), 335-362. 1979
- [7] J. B. Bell, P. Colella, and H. M. Glaz, A second-order projection method of the incompressible Navier–Stokes equations, *Journal of Computational Physics* 85, 257. 1989
- [8] R. J. LeVeque, High-resolution conservative algorithms for advection in incompressible flow, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 33(2), 627-665. 1996
- [9] P.K. Smolarkiewicz, The multi-dimensional crowley advection scheme, *Monthly Weather Review*, 110(12), 1968-1983. 1982