

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Génie énergétique

**Par**: M. AYAD Abdessamad  
M. BASSAID Ahmed

### **Sujet**

**SIMULATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS A SURFACE  
LIBRE AVEC LA PRESENCE D'UN SUBSTRAT  
(EFFET THERMIQUE)**

Soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2017, devant le jury composé de :

Président	<b>M. A. AZZI</b>	UABTlemcen
Encadreur	<b>Mme H. SAIB</b>	UABTlemcen
Co-Encadreur	<b>M. A.N. KORTI</b>	UABTlemcen
Examineur 1	<b>M. R. SAIM</b>	UABTlemcen
Examineur 2	<b>M. C. SELADJI</b>	UABTlemcen

**Année universitaire 2016-2017**

## ملخص

في هذا العمل تم إجراء دراسة رقمية ثلاثية الأبعاد لتدفق سطح حر داخل خزان يقع فوق طبقة سفلية صلبة، الصياغة الرياضية لهذا النوع من التدفق على أساس معادلات حفظ الكتلة، كمية الحركة ومعادلة الطاقة. ويتم الحصول على النتائج العددية من خلال دمج برنامجين من برامج الحسابات الموجودة في المبرمج الحسابي ANSYS15.0: البرنامج الأول هو FLUENT الذي يقوم بالمحاكاة الديناميكية والحرارية للتدفق ثنائي الطور (ماء/هواء) في الخزان باستعمال طريقة VOF، أما البرنامج الثاني فيدعى TRANSIENT THERMAL الذي يقوم بالمحاكاة الحرارية على مستوى الطبقة السفلية الصلبة. حيث يتم الحصول على هذه النتائج في شكل تغيرات في نسبة الحجم، السرعة وتغيرات درجة الحرارة بوجود الطبقة الصلبة وبدونها

**كلمات دلالية:** محاكاة رقمية، تدفق سطح حر، طريقة VOF، نظام اقتران عددي

## Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique tridimensionnelle d'un écoulement a surface libre dans une cavité qui situé au-dessus d'un substrat (solide). La formulation mathématique de ce type d'écoulement basé sur les équations de la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'équation d'énergie. Les résultats numériques sont obtenus par un système de couplage entre deux codes des calculs existants dans ANSYS 15.0. Le premier code c'est FLUENT pour la simulation dynamique et thermique de l'écoulement diphasique eau/air dans le réservoir en utilisant la méthode VOF. Et le deuxième code c'est TRANSIENT THERMAL pour la simulation thermique au niveau du substrat. Ces résultats obtenus sont sous forme d'évolution de la fraction volumique, l'évolution des températures et des vitesses entre deux configuration sans et avec substrat.

**Mots clés :** simulation numérique, écoulement a surface libre, méthode vof, système de couplage.

## Abstract

In This Work, a three-dimensional numerical study of a free-surface flow was carried out in a cavity located above a substrate (solid). The mathematical formulation of this type of flow based on the mass conservation equations, the momentum and the energy equation. The numerical results are obtained by a system of coupling between two codes of the calculations existing in ANSYS 15.0. The first code is FLUENT for the dynamic and thermal simulation of the water / air diphasic flow in the cavity using the VOF method. And the second code is TRANSIENT THERMAL for thermal simulation at the substrate. These results are obtained in the form of evolution of the volume fraction, the evolution of the temperatures and the velocities between two configurations without and with substrate.

**Keys words:** numerical simulation, free surface flow, VOF method, system coupling.

### Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique tridimensionnelle d'un écoulement à surface libre dans une cavité qui est situé au-dessus d'un substrat (solide). La formulation mathématique de ce type d'écoulement basé sur les équations de la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'équation d'énergie. Les résultats numériques sont obtenus par un système de couplage entre deux codes des calculs existants dans ANSYS 15.0. Le premier code c'est FLUENT pour la simulation dynamique et thermique de l'écoulement diphasique eau/air dans le réservoir en utilisant la méthode VOF, et le deuxième code c'est TRANSIENT THERMAL pour la simulation thermique au niveau du substrat. Ces résultats obtenus sont sous forme d'évolution de la fraction volumique, l'évolution des températures et des vitesses entre deux configuration sans et avec substrat.

### Mots clés

Simulation numérique, écoulement a surface libre, méthode vof, système de couplage.

**Abstract**

In This Work, a three-dimensional numerical study of a free-surface flow was carried out in a cavity located above a substrate (solid). The mathematical formulation of this type of flow based on the mass conservation equations, the momentum and the energy equation. The numerical results are obtained by a system of coupling between two codes of the calculations existing in ANSYS 15.0. The first code is FLUENT for the dynamic and thermal simulation of the water / air diphasic flow in the cavity using the VOF method. And the second code is TRANSIENT THERMAL for thermal simulation at the substrate. These results are obtained in the form of evolution of the volume fraction, the evolution of the temperatures and the velocities between two configurations without and with substrate.

**Keywords**

Numerical simulation, free surface flow, VOF method, system coupling.

## ملخص

في هذا العمل تم إجراء دراسة رقمية ثلاثية الأبعاد لتدفق سطح حر داخل خزان يقع فوق طبقة سفلية صلبة، الصياغة الرياضية لهذا النوع من التدفق على أساس معادلات حفظ الكتلة، كمية الحركة ومعادلة الطاقة. ويتم الحصول على النتائج العددية من خلال دمج برنامجين من برامج الحسابات الموجودة في المبرمج الحسابي ANSYS15.0: البرنامج الأول هو FLUENT الذي يقوم بالمحاكاة الديناميكية والحرارية للتدفق ثنائي الطور (ماء/هواء) في الخزان باستعمال طريقة VOF، أما البرنامج الثاني فيدعى TRANSIENT THERMAL الذي يقوم بالمحاكاة الحرارية على مستوى الطبقة السفلية الصلبة. حيث يتم الحصول على هذه النتائج في شكل تغيرات في نسبة الحجم، السرعة وتغيرات درجة الحرارة بوجود الطبقة الصلبة وبدونها

## كلمات دلالية

محاكاة رقمية، تدفق سطح حر، طريقة VOF، نظام اقتران عددي

# REMERCIEMENTS



**Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.**

**Nous remercions vivement et chaleureusement notre encadreur Madame SAIB Hind et notre Co-encadreur Monsieur KORTI Nabil Abdillah, pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire. Nous les remercions particulièrement pour la confiance qui nous ont accordée, pour leur rigueur scientifique, pour leur patience et pour leurs conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à**

**L'accomplissement de ce travail.**

**Nous tenons à exprimer nos remerciements à Monsieur AZZI Ahmed qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de nos profondes gratitude.**

**Nous exprimons nos vifs remerciements à Messieurs SAIM Rachid et SELAADJI Chakib pour avoir accepté de faire partie du jury, montrant ainsi l'intérêt qu'ils portent au sujet de ce travail.**

**Enfin, nous adressons nos reconnaissances à toute personne ayant intervenue de près ou de loin à la réalisation de ce travail.**

**AYAD - BASSAID**



---

*Je dédie ce travail a mes chers parents ;  
Ma mère Keltouma et mon père Mohammed  
Et ma belle-mère Fatima Dieu à son âme  
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs  
encouragements.*

*A mon frère Charafeddine et mes sœurs : Soumia, Aouicha et son  
époux et ses enfants*

*Je dédie également ce projet à toute la famille*

*A mes amies et mes camarades.*

*A tout la promo G-E 2017*

*A tous les membres de scout groupe ELAMANA*

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du  
moyen, du secondaire au de l'enseignement supérieur.*

*En fin, je voudrai dédier ce mémoire à toutes personnes ayant  
participé de loin au de prés à la réalisation de ce travail.*

---

*AYAD Abdessamad*

# DÉDICACE



---

*Je dédie ce travail à mes chers parents ;*

*Ma mère Noria et mon père Mustapha*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

*A mes frères et ma sœur*

*Je dédie également ce projet à toute la famille BASSAID*

*et la famille METAICHE*

*A mes amies et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du  
secondaire au de l'enseignement supérieur.*

*En fin, je voudrai dédier ce mémoire à toutes personnes ayant participé de  
loin au de près à la réalisation de ce travail.*

---

**BASSAID Ahmed**

# Nomenclature

Nomenclature

Symboles Latins :

Symboles	Notation	Unités
$c_p$	chaleur spécifique	J. Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$f_\ell$	fraction liquide	
$L_s$	chaleur latente de fusion	J. Kg <sup>-1</sup>
T	Température	K
t	variable du temps	s
$u$	vitesse suivant $x$	m.s <sup>-1</sup>
$v$	vitesse suivant $y$	m.s <sup>-1</sup>
$w$	vitesse suivant $z$	m.s <sup>-1</sup>
$p$	Pression	Pa
$x, y, z$	coordonnées cartésiennes	
$C$	Constante de darcy	
$C_k$	Fraction volumique du k <sup>ième</sup>	

Symboles Grecs :

Symboles	Notation	Unités
$\rho$	masse volumique	Kg.m <sup>-3</sup>
$\mu$	viscosité dynamique	Kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\lambda$	conductivité thermique	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$h$	Coefficient d'échange	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$\Delta t$	Pas de temps	S
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique	K <sup>-1</sup>

Indice :

1 : Air

2 : Eau

s : Solide

$\ell$  : Liquide

ref : référence

# Liste des figures

Listes des figures

<b>Fig.1.1</b> schéma et dimensions du model étudiée	<b>3</b>
<b>Fig.1.2</b> Forme de maillage du model étudiée	<b>4</b>
<b>Fig.1.3</b> Résultats numériques et expérimentales	<b>4</b>
<b>Fig 1.4</b> Profil de surface libre d'un effondrement d'une colonne d'eau dans Une cuve aux instants $t = 0.2$ s, $t = 0.4$ s, $t = 0.6$ s et $t = 0.8$ s	<b>5</b>
<b>Fig.1.5</b> Effondrement d'une colonne d'eau en présence d'un obstacle	<b>6</b>
<b>Fig.1.6</b> Géométrie du problème étudié et les axes de coordonnées	<b>7</b>
<b>Fig.1.7.</b> Évolution du domaine de l'eau lors de la rupture du barrage dans un réservoir rectangulaire	<b>7</b>
<b>Fig. 1.8</b> Schéma et dimensions du model étudiée	<b>8</b>
<b>Fig.1.9</b> (a) impact de première vague ;(b) Le déversement d'eau commence	<b>9</b>
<b>Fig.1.10</b> Schématisation de la géométrie d'une rupture de barrage sur un lit plat sans frottement	<b>9</b>
<b>Fig.1.11</b> Le modèle étudié pour une rupture de barrage sur un seuil inférieur triangulaire	<b>10</b>
<b>Fig.1.12</b> Configuration expérimentale et conditions initiales rupture de barrage sur $90^\circ$ pliez	<b>10</b>
<b>Fig.1.13</b> Configuration du maillage non structurée à côté de l'obstacle	<b>12</b>
<b>Fig.1.14</b> Zone de recirculation pour un écoulement a surface libre passant à travers un Obstacle semi circulaire	<b>13</b>
<b>Fig.1.15</b> Fig.1.15. Evolution de la surface libre sur un déversoir à large crête	<b>14</b>

<b>Fig.1.16</b> Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques du niveau d'eau	<b>14</b>
<b>Fig.1.17</b> Comparaison entre le modèle laminaire et le modèle turbulent	<b>15</b>
<b>Fig.1.18</b> Rupture de barrage 2D sur fond mouillé. $t=0.24s$ (a), $t=0.4s$ (b)	<b>17</b>
<b>Fig.1.19</b> Rupture de barrage 3D sur fond mouillé avec obstacle. Représentation de la surface libre au temps $t=0.7s$ .	<b>17</b>
<b>Fig.2.1</b> Dimensions [m] du modèle physique étudié	<b>19</b>
<b>Fig.2.2</b> Conditions aux limites	<b>23</b>
<b>Fig.2.3</b> Schéma de couplage dans ANSYS 15.0	<b>25</b>
<b>Fig.2.4</b> création de la géométrie dans DESIGN MODELER	<b>25</b>
<b>Fig.2.5</b> Création du maillage dans MESHING (partie fluide)	<b>26</b>
<b>Fig.2.6</b> Création du maillage dans TRANSIENT THERMAL (partie solide)	<b>26</b>
<b>Fig.2.7</b> Définition du modèle du solveur	<b>27</b>
<b>Fig.2.8</b> Définition de la méthode multi-phase VOF	<b>28</b>
<b>Fig.2.9</b> Facteurs de Sous-Relaxation	<b>28</b>
<b>Fig.3.1</b> Méthode de MAC	<b>31</b>
<b>Fig.3.2</b> Méthode de VOF	<b>32</b>
<b>Fig.3.3</b> Différentes formes de l'interface pour le calcul vof	<b>36</b>
<b>Fig.4.1</b> Géométrie et dimensions (m) du modèle de validation	<b>39</b>
<b>Fig.4.2</b> L'évolution dynamique de la colonne d'eau	<b>40</b>

<b>Fig.4.3</b> Test de maillage à $t = 1,5$ s	<b>41</b>
<b>Fig.4.4</b> Test de maillage à $t = 2$ s	<b>42</b>
<b>Fig.4.5</b> Evolution tridimensionnel de la surface libre de l'eau en fonction du temps (a)sans substrat et (b) avec substrat	<b>43</b>
<b>Fig.4.6</b> Evolution temporelle des contours de la vitesse (suivant $x$ ) au niveau de la surface libre (a) sans substrat et (b) avec substrat	<b>47</b>
<b>Fig.4.7</b> Evolution temporelle des contours de la vitesse (suivant $y$ ) au niveau De la surface libre (a) sans substrat et (b) avec substrat	<b>49</b>
<b>Fig.4.8</b> Evolution tridimensionnelle de la température en fonction du temps (a) sans substrat et (b) avec substrat	<b>51</b>

# Liste des tableaux

Tableau 2.1 : propriétés thermo-physiques de l'air, l'eau et l'acier structuré **20**

# Table de matières

**Table des matières**

**Résumé**

**Abstract**

**ملخص**

**Nomenclature**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**

**Introduction générale 1**

**Chapitre 1 : Recherche bibliographiques**

**1.1. Introduction 3**

**1.2. Etude bibliographique 3**

**Chapitre 2 : Position du Problème**

**2.1. Introduction 19**

**2.2. Problème étudié 19**

**2.3. Modélisations mathématiques 20**

**2.3.1. Modèle dynamique 20**

**a. Equation de continuité 20**

**b. Equation de quantité de mouvement 21**

**2.3.2. Modèle VOF 21**

2.3.3.	Modèle thermique	22
2.4.	Conditions initiales et aux limites	23
2.4.1.	Conditions initiales	23
2.4.2.	Les conditions aux limites	23
2.5.	Simulation numérique	24
2.5.1.	Création de la géométrie	25
2.5.2.	Choix du maillage	26
2.5.3.	Calcul numérique	27

### Chapitre 3 : Modélisation numérique de la surface libre

3.1.	Introduction	29
3.2.	Ecoulements multiphasiques à surface libre	29
3.3.	Méthodes de suivi d'interface	29
3.3.1.	Méthodes à maillage mobile	29
3.3.2.	Méthodes à maillage fixe	30
3.3.2.1.	La Méthode de MAC (Marker-And-Cell)	30
3.3.2.2.	Method VOF (Volume of Fluid)	31
a.	Principe de la méthode VOF	32
b.	Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF	33
c.	Equation de la fraction volumique	34
d.	Interpolation près de l'interface	35
3.4.	Conclusion	36

### Chapitre 4 : Résultats et Discussions

4.1.	Validation du modèle VOF	39
4.2.	Test de maillage	41
4.3.	Résultats et interprétations	43

<b>4.3.1.</b>	<b>Evolution de la fraction volume</b>	<b>43</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Evolution de la vitesse</b>	<b>47</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>Evolution de la température</b>	<b>51</b>

<b>Conclusion générale</b>
----------------------------

<b>Conclusion générale</b>	<b>55</b>
----------------------------	-----------

# Introduction générale

### Introduction générale

Les écoulements à surface libre se rencontrent dans des nombreuses applications environnementales (rivières, océan, tsunami, etc.) et industrielles (remplissage, moulage, injection, etc.). La modélisation de ce type d'écoulement nécessite un découpage du domaine global de calcul en deux sous domaines non miscibles séparés par une interface bien définie qui présente la surface libre. Au cours des dernières décennies, une attention croissante a été posée au développement des méthodes de calcul des écoulements à surface libre, impliqués dans divers domaines de l'ingénierie.

Des nombreuses méthodes pour le traitement de la surface libre sont décrites dans la littérature, ces méthodes d'approximation d'interface mobile sont classifiées essentiellement en deux catégories : méthode à maillage mobile est méthode à maillage fixe, cette dernière contient deux techniques de calculs, la méthode de MAC et la méthode Volume de Fluide (VOF) qui représente l'une des plus populaires méthodes pour étudier ces problèmes multiphasique. Il s'agit d'un procédé de capture d'interface dans lequel l'emplacement de l'interface est capturé en surveillant la fraction volumique de chaque cellule de calcul dans la grille par rapport à l'une des phases fluides.

Le présent travail porte sur l'étude de la simulation numérique de la rupture tridimensionnelle d'une colonne d'eau contenu dans une cavité remplie d'air. Un contact thermique avec un substrat (solide) en acier est prévu à la frontière inférieure, pour montrer l'effet thermique de la paroi sur le comportement dynamique et thermique de l'interface air-eau. La simulation numérique est assurée à l'aide du code commercial ANSYS 15.0. Un couplage numérique est envisagé entre le code FLUENT et le code Transient Thermal (thermique transitoire) existants dans ANSYS. Fluent assure le calcul thermo-convectif avec surface libre

dans le domaine air-eau, alors que Transient Thermal assure le calcul thermique dans le domaine du substrat.

Nous présentons l'ensemble de notre travail comme suite :

- ✓ Une introduction générale présente le but du travail en montrant l'intérêt de l'étude numérique d'un écoulement à surface libre.
- ✓ Le premier chapitre est rayonné par une recherche bibliographique présentant les travaux numériques effectués dans le domaine des écoulements à surface libre pour diverses configurations et pour différentes méthodes pour la simulation numériques
- ✓ Modélisations numériques de la surface libre ; à savoir les différentes méthodes employées pour déterminer l'allure de la surface libre ainsi que la méthode utilisée dans notre simulation, constituent le contenu du deuxième chapitre.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à la position du problème, formulation mathématique et les conditions initiale et aux limites
- ✓ On rassemble dans le chapitre quatre les différents résultats obtenus et leurs interprétations
- ✓ Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus,

Recherches

bibliographiques

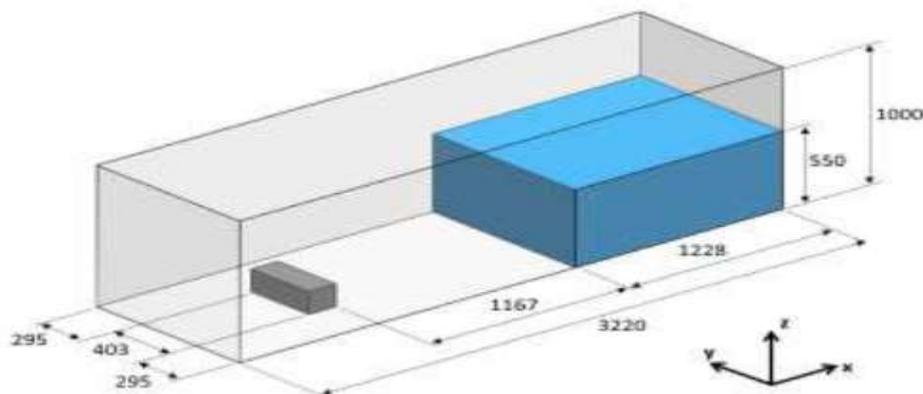
## 1.1. Introduction

La simulation numérique des écoulements à surface libre est un vaste sujet, avec des applications dans divers domaines de l'ingénierie tels que l'aérospatiale, l'automobile, le nucléaire, etc. La méthode Volume de fluide (VOF) représente une technique appropriée pour simuler ce genre d'écoulement en suivant l'interface air-liquide dans le domaine de calcul. Une méthode facile à appliquer mais nécessite un maillage très fin pour constituer avec succès la surface du liquide, entraînant des coûts de calcul très élevés.

## 1.2. Etude bibliographique

Le problème de la rupture du barrage représente une référence pour la vérification des modèles numériques impliquant des écoulements à surface libre. C'est un modèle qui a été analysé et largement étudié expérimentalement et numériquement. Parmi les travaux publiés dans ce domaine :

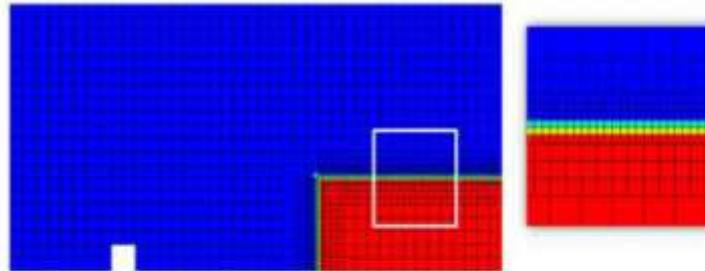
**Tommaso. F et al** [1] ont étudié la simulation tridimensionnelle de la rupture d'un barrage, en utilisant la méthode VOF (Fig.1.1).



**Fig.1.1** schéma et dimensions du model étudié.

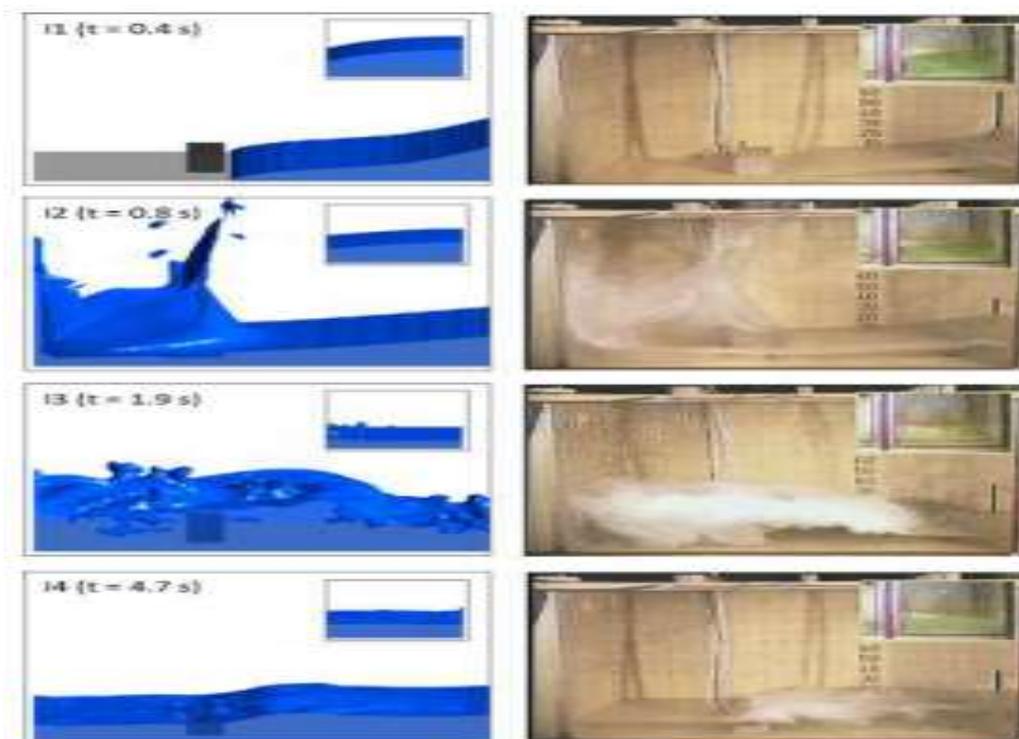
L'objectif de cette étude est de définir un modèle numérique capable de reproduire les principales caractéristiques de la rupture des barrages en minimisant les efforts de calcul fournis qui ont été réalisées à l'aide d'une approche de maillage

adaptatif. Une stratégie d'adaptation a été définie comme un moyen de réduire considérablement l'effort numérique. L'idée principale est de raffiner le maillage uniquement et localement à l'interface air-liquide, en minimisant la diffusion numérique et en maintenant une taille de maille grossière ailleurs (Fig.1.2).



**Fig.1.2** Forme de maillage du modèle étudié.

La précision de la méthode a été évaluée en comparant les résultats de simulation avec les données expérimentales (Fig.1.3). Un bon accord a été obtenu entre les résultats numériques et expérimentaux, en particulier pour la modélisation du comportement de l'écoulement dans le réservoir.



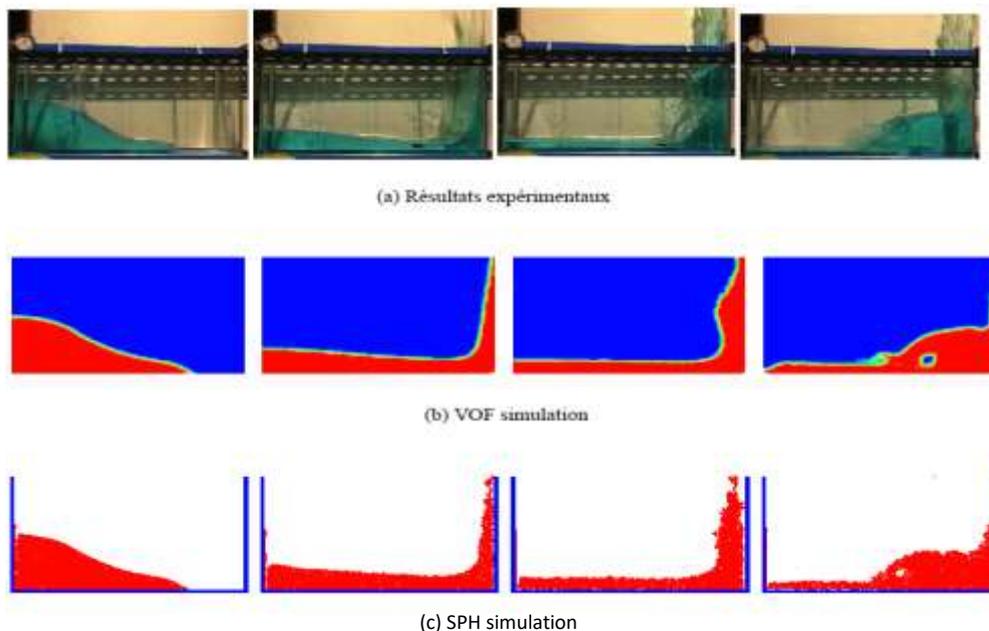
**Fig.1.3** Résultats numériques et expérimentales.

**DORING. M et al** [2] Présentent une comparaison entre deux codes de calcul destinés à la simulation d'écoulements à surface libre complexes. Ces deux codes utilisent des approches différentes pour modéliser l'écoulement ainsi que la surface libre.

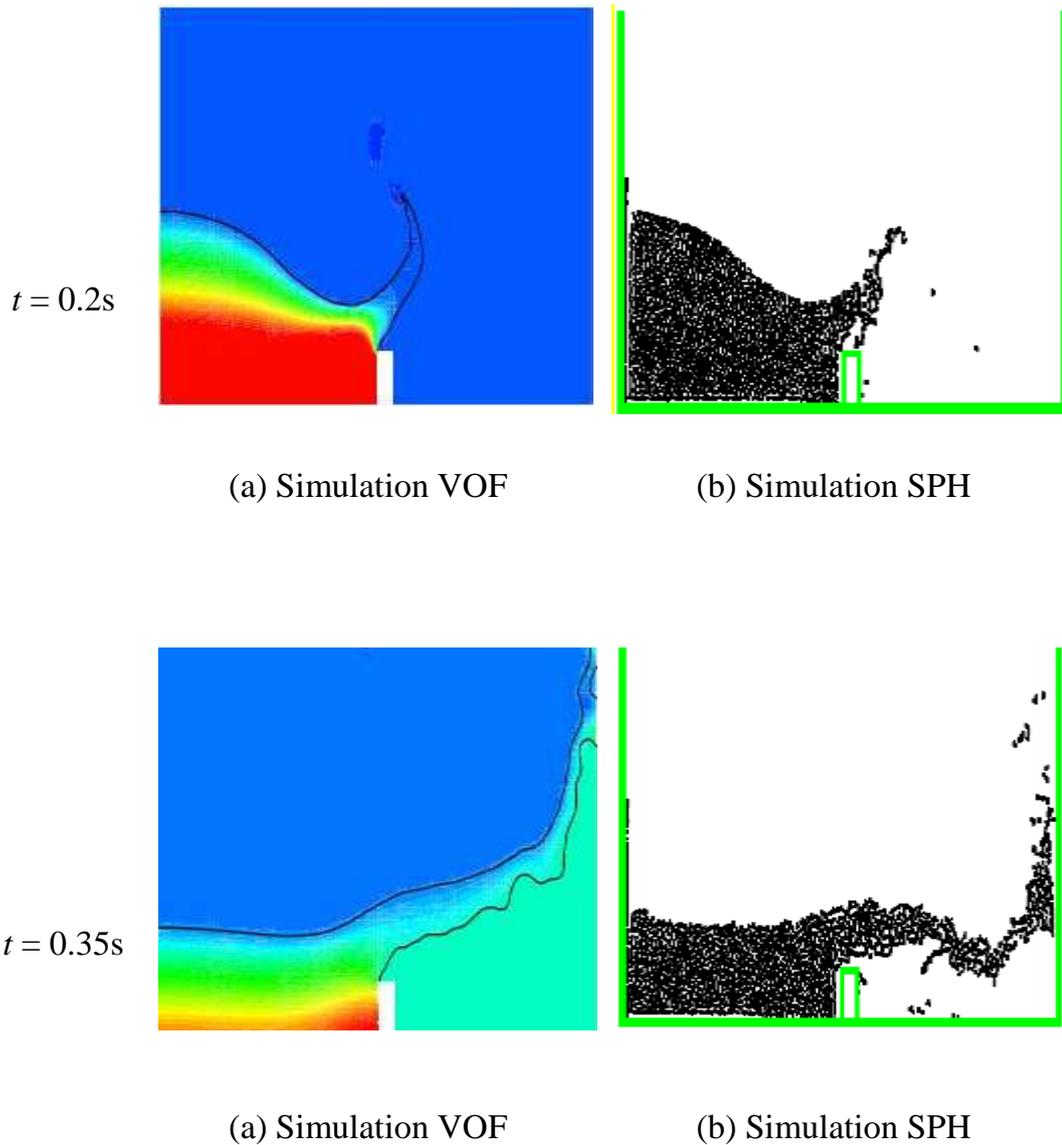
- Le premier est fondé sur l'approche lagrangienne appelée Smoothed Particule Hydrodynamics (SPH), elle a pour principe d'assimiler le fluide à un grand nombre de particule en interaction. Son intérêt d'être indépendante de tout maillage, et donc d'autoriser plus délibéré quant aux types d'application à simuler.
- Le second utilise une approche eulérienne ou la surface libre est prédite par une méthode de capture d'interface(VOF).

Les deux codes présentés ont été utilisés et comparés sur différentes configurations d'écoulements :

- a) Simulation d'une cuve entraînée en mouvement horizontal oscillant.
- b) Effondrement d'une colonne d'eau dans une cuve (Fig 1.4).
- c) Effondrement d'une colonne d'eau en présence d'un obstacle (Fig 1.5).



**Fig 1.4** Profil de surface libre de la rupture de la colonne d'eau dans une cuve aux instants  $t = 0.2$  s,  $t = 0.4$  s,  $t = 0.6$  s et  $t = 0.8$  s

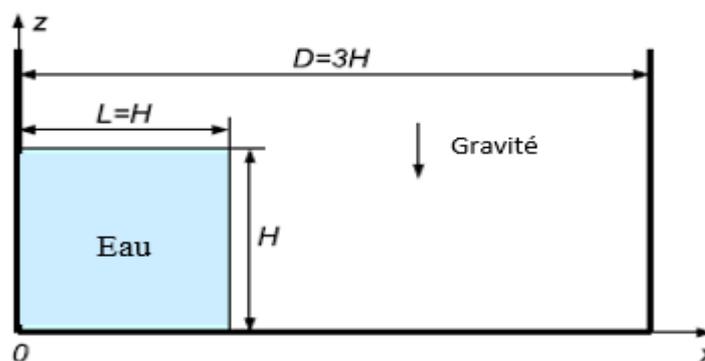


**Fig.1.5** Rupture d'une colonne d'eau en présence d'un obstacle

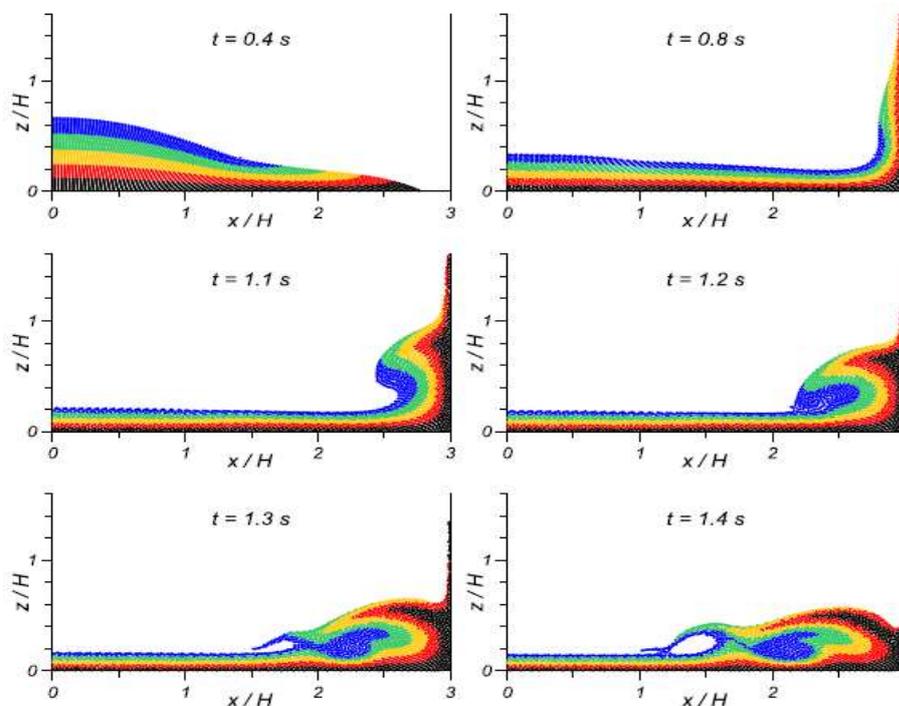
Les résultats numériques semblent un bon accord avec les résultats expérimentaux, mais sous certaines conditions pour le solveur SPH, ou il a été mis en évidence l'importance de la modélisation multi fluide pour les simulations présentant des bulles d'air. Par conséquent, il apparaît intéressant d'étendre les possibilités du code SPH afin de résoudre des écoulements multiphasiques, pour

profiter de la suppression des contraintes dû au maillage et minimisation du temps de calcul.

**Ryszard. S** [3] a aussi utilisé la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) pour simuler le problème bidimensionnel de la rupture d'une colonne d'eau dans un réservoir rectangulaire (Fig. 1.6). L'auteur a corrigé le modèle standard de telle sorte que les conditions dites de reproduction linéaire pour les approximations du noyau et leurs gradients soient satisfaites.



**Fig. 1.6** Géométrie du problème étudié et les axes de coordonnées

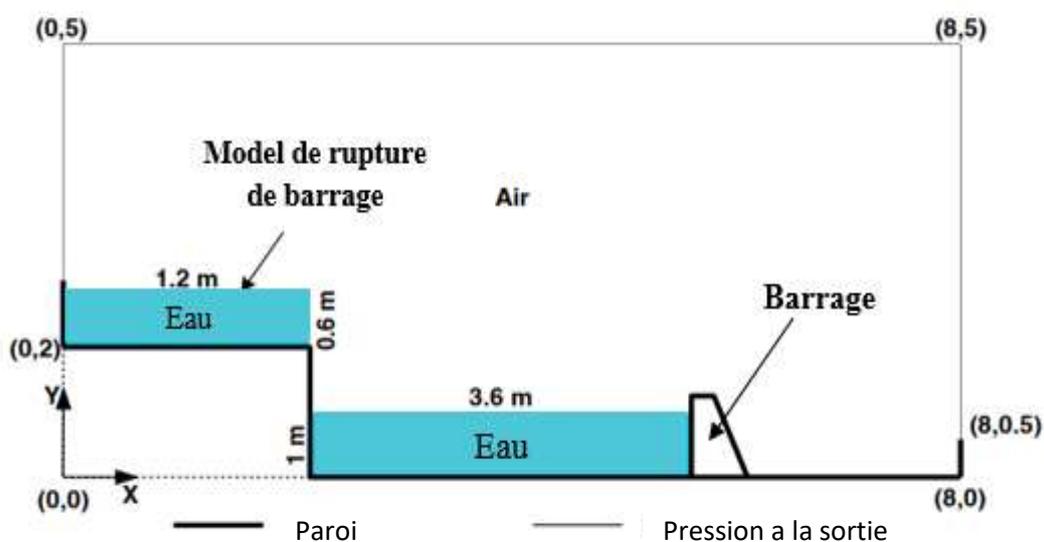


**Fig.1.7** Évolution du domaine de l'eau lors de la rupture du barrage dans un réservoir rectangulaire

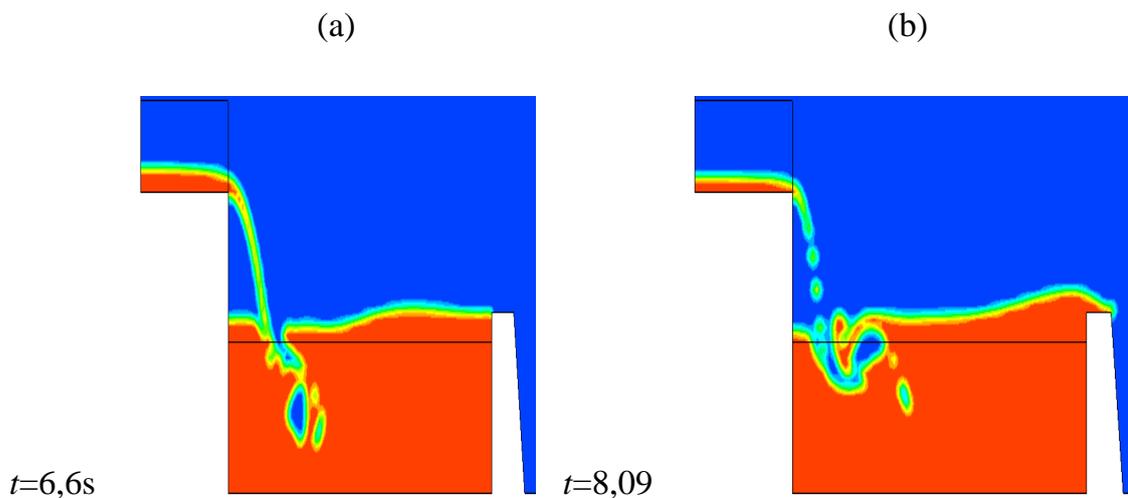
Les résultats de la simulation (Fig.1.7) ont montré que les modifications apportés à la méthode ont donné une meilleure prédiction de la position du front de la vague dans le temps. Cependant, une amélioration Considérable de la précision est atteinte avec un coût de calcul réduit. Les résultats de l'évolution temporelle de la surface libre de l'eau et les contours du champ de vitesse dans l'eau ont montré que la méthode est numériquement efficace et stable. Alors L'approche SPH proposée, en raison de son coût de calcul nettement inférieur et de la simplicité de la mise en œuvre numérique, peut être considérée comme un concurrent sérieux pour les méthodes plus anciennes et mieux établies.

**Panicker. G et al** [4] ont présenté une simulation numérique d'une rupture d'un barrage résultant de la formation des vagues et de débordement d'un barrage en amont (Fig. 1.8). Le comportement du front de la vague impactant, y compris le mouvement de va-et-vient après une collision ont été modélisé par la méthode VOF. Le code FLUENT a été utilisé pour effectuer les calculs numériques (L'élévation de la surface libre, la vitesse d'écoulement, etc.).

L'étude paramétrique de l'impact des vagues unidimensionnelles sur le barrage en aval a été trouvée en bon accord avec les prédictions théoriques qui nécessitent d'envisager de plus grandes complexités problématiques à l'avenir.



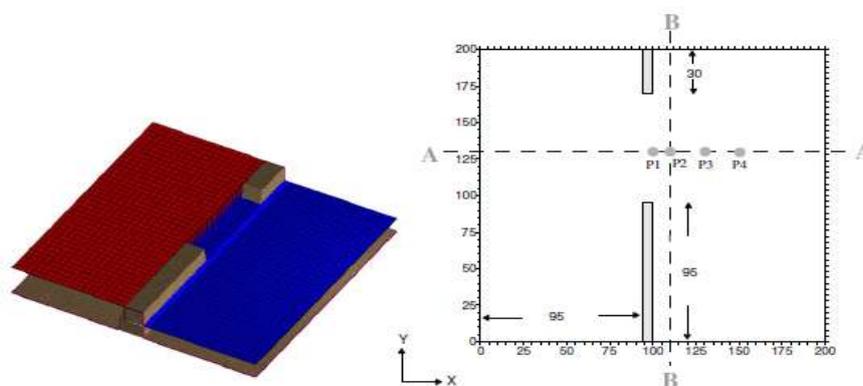
**Fig.1.8** Schéma et dimensions du model étudiée.



**Fig.1.9** (a) impact de première vague ;(b) Le déversement d'eau commence

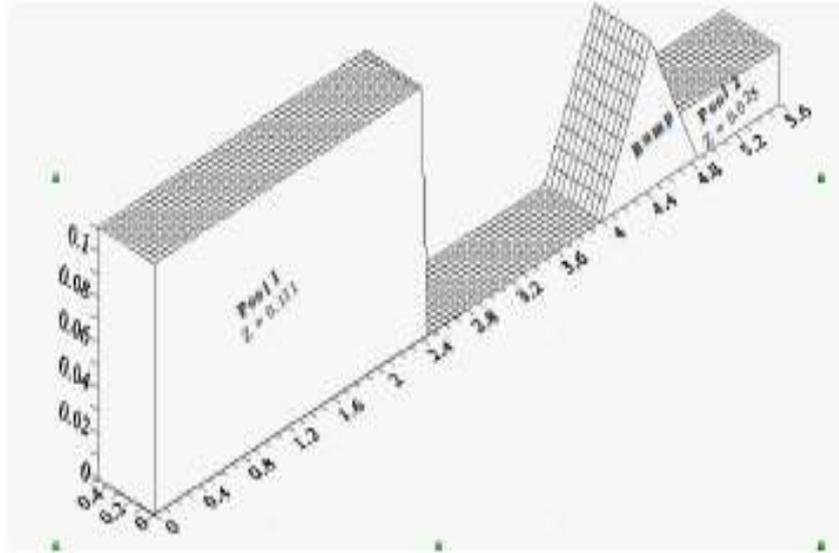
**Biscarini. S et al** [5] ont présenté des simulations numériques des écoulements à surface libres induits par une rupture de barrage comparant l'approche de l'eau peu profonde aux simulations entièrement tridimensionnelles. Elles sont basées sur la solution de l'ensemble complet des équations de Navier-Stokes de Reynolds-Averaged (RANS) couplées à la méthode Volume de Fluide (VOF). L'évaluation et la comparaison des méthodes sont effectuées sur :

- une rupture de barrage sur un lit plat sans frottement :



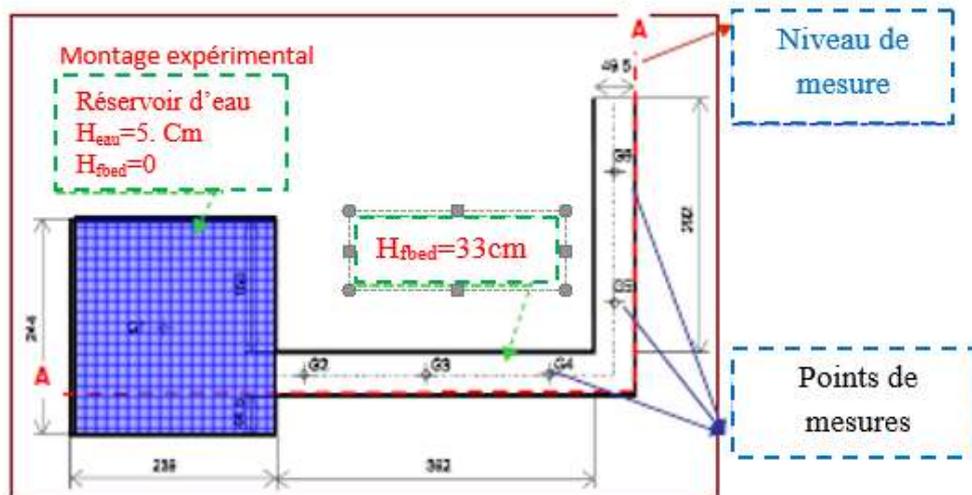
**Fig.1.10** Schématisation de la géométrie d'une rupture de barrage sur un lit plat sans frottement

- Une rupture de barrage sur un seuil inférieur triangulaire :



**Fig.1.11** Le modèle étudié pour une rupture de barrage sur un seuil inférieur triangulaire

- Un flux de rupture de barrage plie sur 90°



**Fig.1.12** Configuration expérimentale et conditions initiales rupture de barrage sur 90° plie.

Les données expérimentale et numérique de la littérature sont comparées aux résultats actuels. Les résultats démontrent que l'approche de l'eau peu profonde, même si elle permet de reproduire suffisamment les principaux aspects des flux de fluide, perd des phénomènes tridimensionnels, en raison de l'idéologie incorrecte de l'eau peu profonde qui néglige Les aspects tridimensionnels liés à la force de gravité.

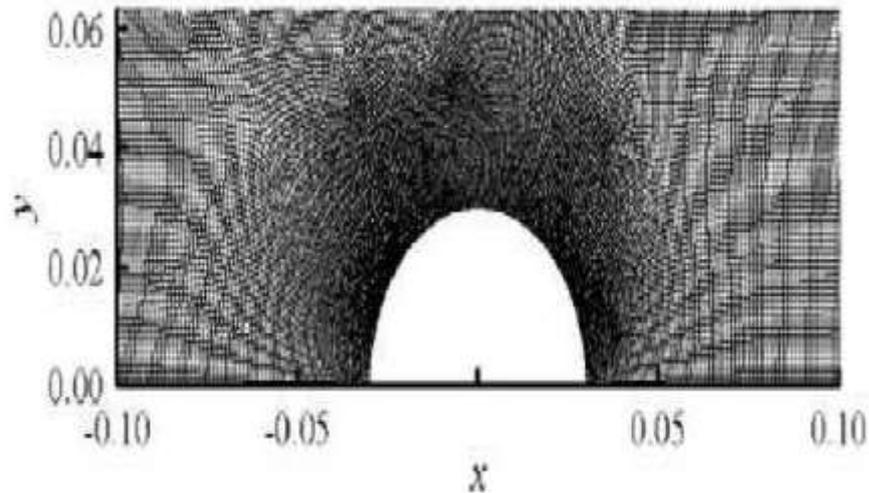
**Lu Lin [6] proposent** un modèle numérique hybride bidimensionnel, FEM-LES-VOF, pour les écoulements turbulents à surface libres, qui présente une combinaison entre trois méthodes principale : méthode des éléments fini de Taylor-Galerkin (FEM), la simulation turbulente à grande échelle (LES) et la méthode Volume de Fluide (VOF).

Les auteurs appliquent ce modèle pour étudier un écoulement à surface libre au-dessus d'un obstacle semi-circulaire. Les résultats de simulation sont comparés aux résultats expérimentaux et prouvent que le modèle proposé fonctionne bien et capable de produire des prévisions fiables pour des écoulements turbulent à surface libre sous obstacles.

Les procédures principales du modèle numérique de FEM-LES-VOF peuvent être récapitulées comme suit :

1. Produisant des maillages dans une grande zone qui comportent totalement les limites possibles de la surface libre. Les mailles structurées et non structurées sont compatibles avec le modèle actuel de FEM-LES-VOF.
2. Imposer des valeurs initiales appropriées et des conditions aux limites nécessaires pour chaque pas de temps y compris la vitesse, la pression et la distribution du volume de fluide.
3. Résolution des équations régissantes pour l'écoulement de fluide.
4. Procédé la construction et le transport d'écoulement, obtenant une nouvelle fraction du volume de fluide dans les mailles et conduisant la reconstruction d'interface.
5. Avec l'information de la reconstruction d'interface et du domaine numérique obtenu, passant au prochain calcul par la répétition de l'étape (2) et (4) jusqu'à

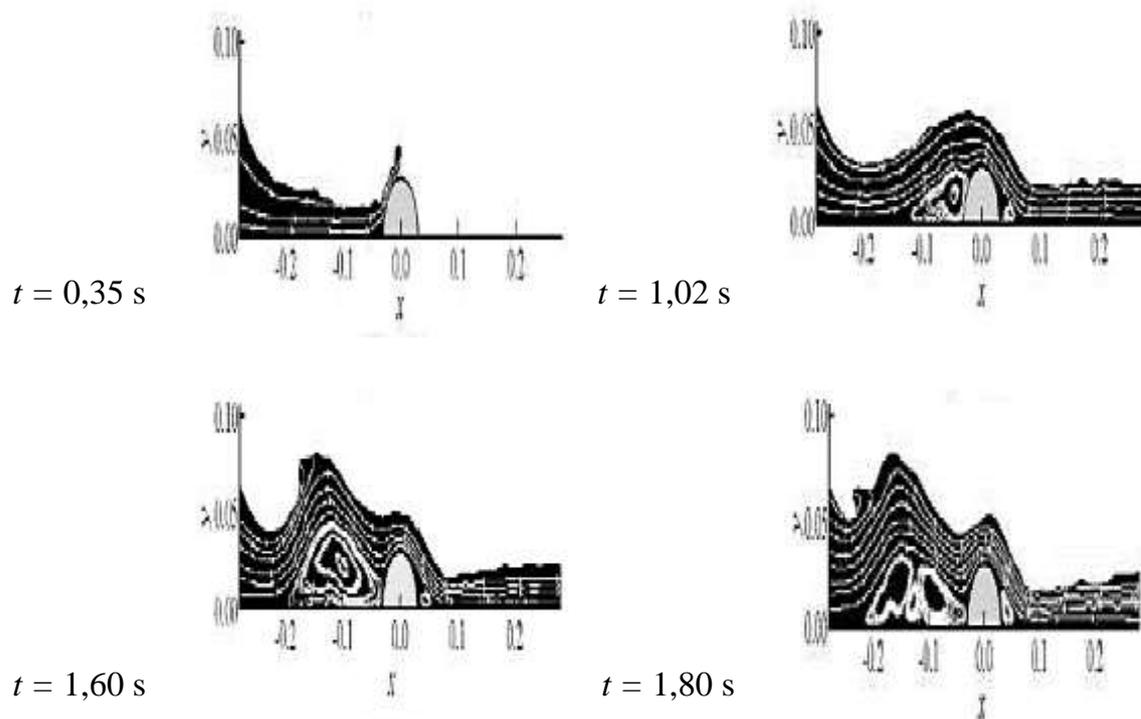
la solution converge à une solution disponible expérimentalement. Etant donné la configuration irrégulière du maillage autour de l'obstacle, des grilles quadrilatérales non structurées sont adoptées dans cette simulation, le maillage à côté de l'obstacle semi-circulaire est montré dans (Fig.1.13). Le nombre des nœuds dans le domaine numérique est 54080 et 54825 respectivement.



**Fig.1.13** Configuration du maillage non structurée à côté de l'obstacle semi-circulaire.

Cette étude numérique prouve que la turbulence joue un rôle important dans l'évolution de la surface libre quand la vague se propage vers l'amont lorsque l'écoulement de fluide passe à travers l'obstacle submergé.

Aussi les résultats correspondent à l'évolution de la surface libre passant à travers l'obstacle semi circulaire après chaque pas de temps montre clairement les zones de recirculation qui prend lieu juste avant l'obstacle sous la forme des rouleaux contrarotatif (Fig.1.14).



**Fig.1.14** Zone de recirculation pour un écoulement a surface libre  
Passant à travers un obstacle semi circulaire.

**Hossein. A et al** [7] ont menées des expériences sur un déversoir rectangulaire à large crête avec un coin arrondi au sein d'un laboratoire et le comparé avec une simulation numérique en utilisant le modèle de surface libre de fluide (VOF) et trois modèles de turbulence du RNG  $k-\varepsilon$ ,  $k-\varepsilon$  standard et LES (Large Eddy Simulation), afin de déterminer le profil de surface libre du déversoir à crête large et trouver (Fig.1.15) le profil de niveau d'eau (Fig.1.16). Le maillage structuré avec Une forte concentration près des régions solides a été utilisée dans la procédure numérique.

Les résultats de calcul ont montré un bon accord avec les données expérimentales obtenues au laboratoire. En outre, les résultats indiquent que le modèle RNG  $k-\varepsilon$  présente l'erreur la plus faible.

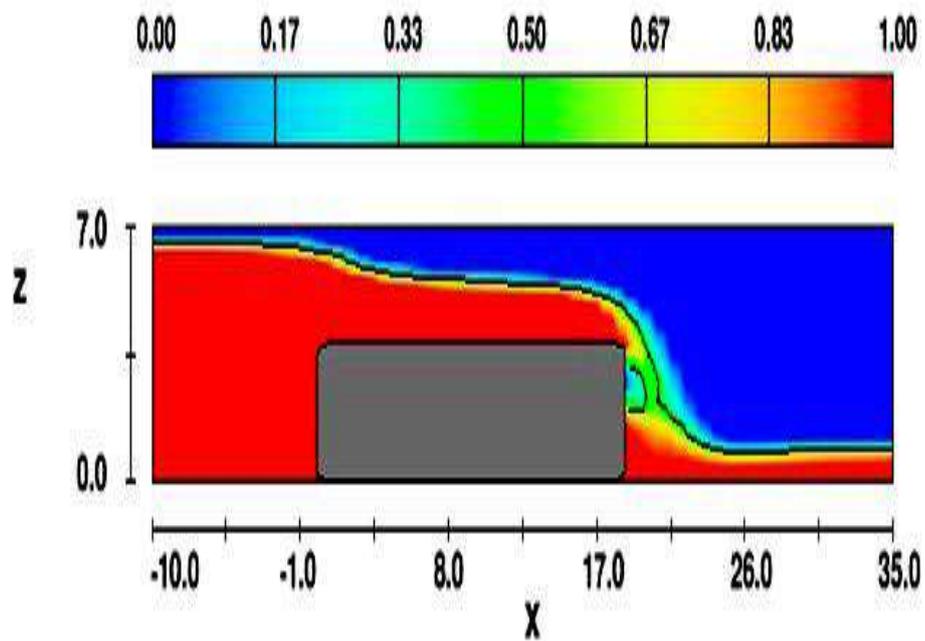


Fig.1.15 Evolution de la surface libre sur un déversoir à large crête

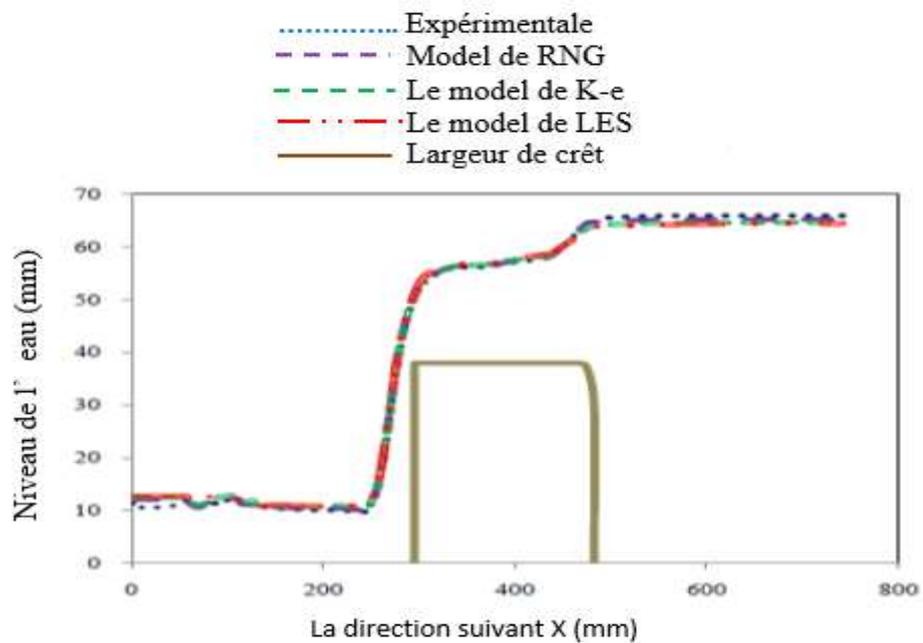
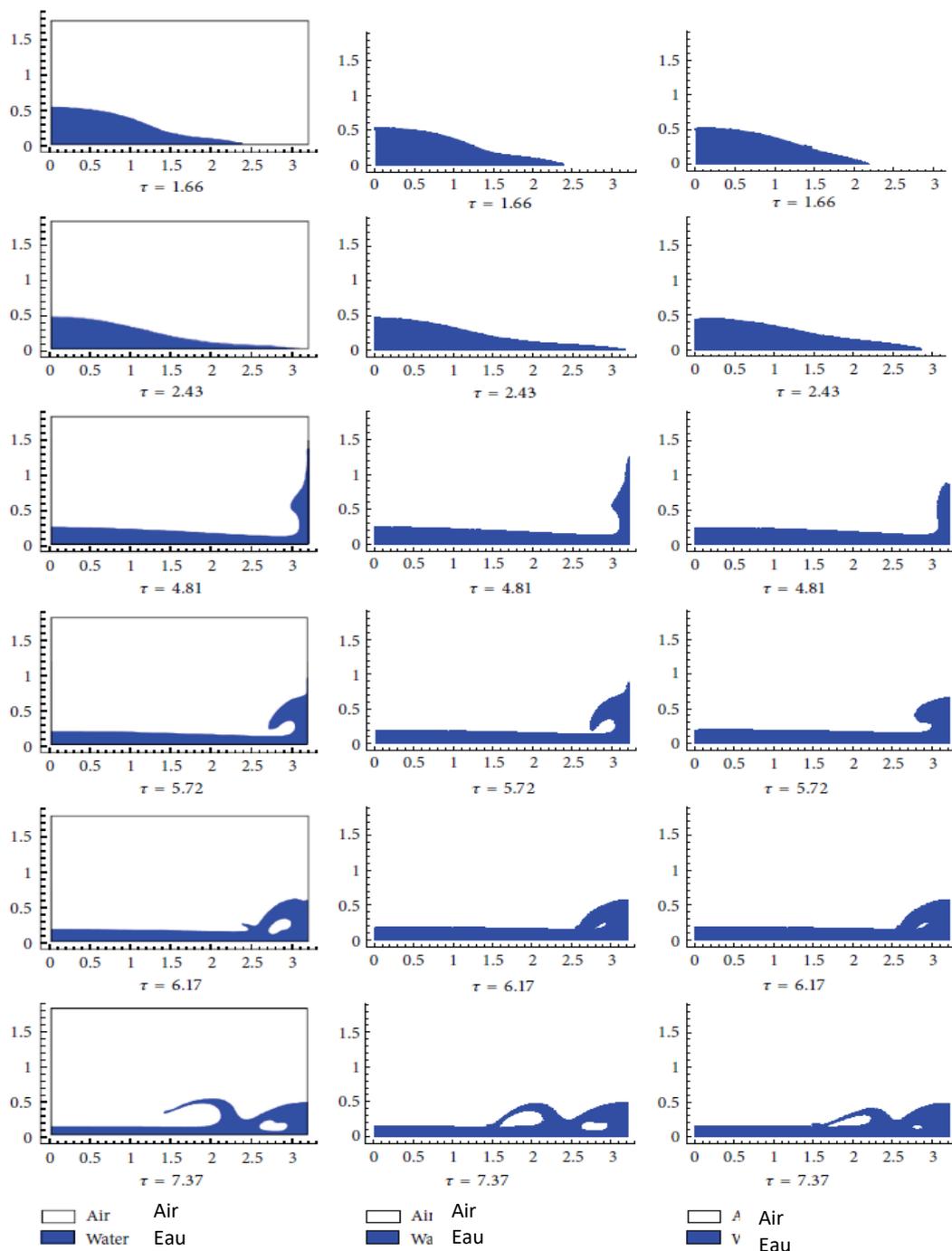


Fig.1.16. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques de l'élévation d'eau

**Hu. J et al** [8] ont développé un modèle numérique basé sur l'équation de Navier-Stokes pour simuler l'évolution de l'interface des écoulements de débordement. Le domaine de fluide bidimensionnel est discrétisé par des éléments rectangulaires structurés selon la méthode de volume fini (FVM). L'interface air-liquide est capturée par un schéma de capture d'interface compressive pour des mailles arbitraires (CICSAM) basé sur l'idée de volume de fluide (VOF). Le modèle d'écoulement laminaire et le modèle d'écoulement turbulent ont été comparés. Des expériences antérieures et d'autres solutions numériques sont utilisées pour vérifier les résultats actuels sur le débordement d'un seul corps liquide. Ensuite, la simulation est étendue à la rupture de deux corps liquides en collision. La force d'impact de l'écoulement débordé sur un obstacle a également été analysée. La comparaison prouve que la simulation actuelle a capturé les principales caractéristiques de l'évolution de l'interface. Bien qu'il existe une différence entre les résultats par modèle laminaire et le modèle turbulent, mais les deux peuvent donner des résultats raisonnables du problème. Les résultats actuels montrent un accord entre les simulations et les expériences précédentes (fig.1.17)

**BENMOUSSA. F** [9] a fait une étude numérique tridimensionnelle d'un écoulement à surface libre turbulent dans un canal rectiligne de section rectangulaire dont le fond présente un obstacle parallélépipédique s'appuyant sur l'une des parois. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations de transport non linéaire (de forme convection-diffusion) régissant les équations de quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente, de dissipation et en dépistant la fraction de volume de chacun des fluides dans tout le domaine. Les résultats numériques sont obtenus par deux modèles, le modèle multiphasique (VOF) (Volume Of Fluid) et le modèle (K- $\epsilon$ ) pour la turbulence, L'étude des effets hydrodynamiques de l'obstruction sur l'écoulement consiste à analyser ces processus en termes de zones d'influences (en amont et en aval) afin d'examiner la structure tridimensionnelle de l'écoulement autour d'un obstacle.

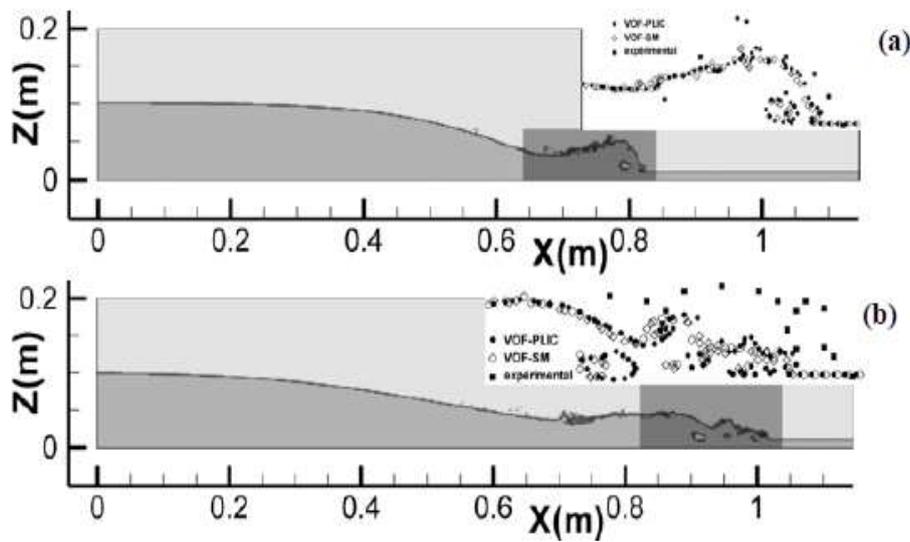


**Fig.1.17** Comparaison entre le modèle laminaire et le modèle turbulent

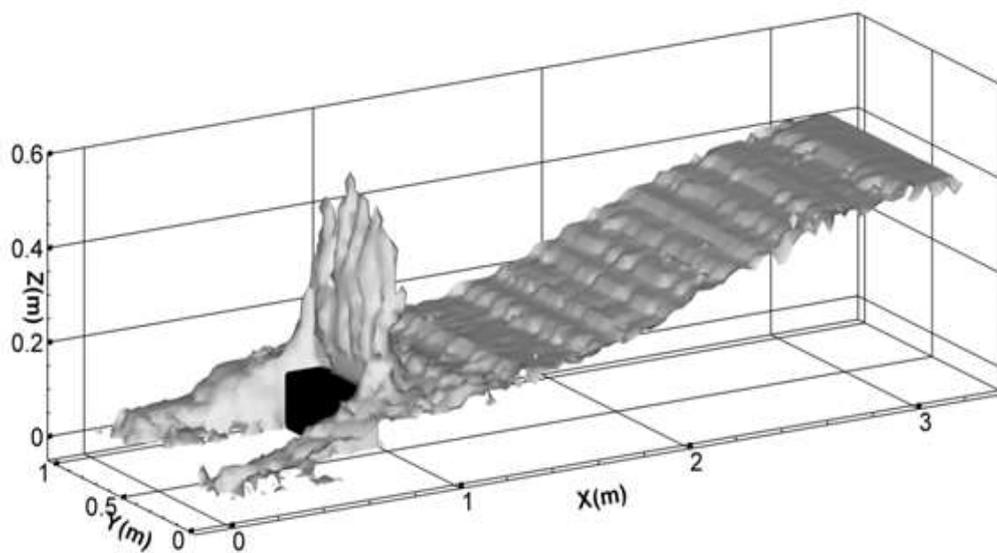
**Guillaume. B et al** [10] ont présenté une méthode hybride de suivi d'interface s'inspirant de l'aspect particulière des méthodes MAC et de la représentation volumique du champ de concentration des méthodes VOF. Les mailles du domaine sont pourvues d'un nombre de particules variable transportées de façon Lagrangienne

à partir du champ de vitesse Eulérien interpolé. Ces particules sont porteuses d'informations de phase qui seront projetées sur le maillage Eulérien à chaque pas de temps afin d'actualiser le champ de fraction volumique.

La validation de la méthode a fait l'objet de comparaisons sur des cas tests de tache cisailée avec un champ de vitesse analytique, ainsi que sur des cas de rupture de barrage 2D et 3D confirmant les performances de la méthode lors du couplage avec la résolution des équations de Navier-Stokes (Figs 1.18 et 1.19).



**Fig.1.18** Rupture de barrage 2D sur fond mouillé.  $t=0.24s$  (a),  $t=0.4s$  (b)



**Fig.1.19** Rupture de barrage 3D sur fond mouillé avec obstacle.

Représentation de la surface libre au temps  $t=0.7s$ .

**Maronnier. V et al** [11] ont présenté une simulation numérique pour un écoulement d'un fluide complexe avec des surfaces libres. Les inconnus sont les champs de vitesse et de pression dans la région liquide, ainsi qu'une fonction définissant la fraction volumique du liquide. Bien que la formulation mathématique du modèle soit similaire à la méthode du volume de fluide (VOF), les schémas numériques utilisés pour résoudre le problème sont différents. Une méthode de fractionnement est utilisée pour la discrétisation du temps. À chaque étape du temps, deux problèmes d'advection et un problème généralisé de Stokes doivent être résolus. Deux grilles différentes sont utilisées pour la discrétisation spatiale. Les deux problèmes d'advection sont résolus sur une grille fixe et structurée faite de petites cellules rectangulaires, en utilisant une méthode caractéristique avant. Le problème de Stokes généralisé est résolu à l'aide d'une méthode d'éléments finis sur un maillage fixe et non structuré.

Les résultats numériques sont présentés pour plusieurs cas de test : le remplissage d'un canal en forme de S, le remplissage d'un disque avec noyau, le barrage cassé dans un domaine confiné.

Les résultats numériques montrent l'efficacité de cette approche et les résultats numériques correspondent les résultats expérimentaux.

## **CONCLUSION**

En résumé, il y a plusieurs approches pour suivre les écoulements à surface libre (la méthode SPH, VOF ... etc.) qui sont valables pour cette tâche d'après les comparaisons avec les résultats expérimentaux.

Parmi ces approches on a choisi la méthode vof pour notre étude.

# Position du problème

## 2.1. Introduction

Le présent chapitre porte sur l'étude de la simulation numérique de la rupture tridimensionnelle d'une colonne d'eau contenu dans une cavité remplie d'air. Un contact thermique avec un substrat (solide) en acier est prévu à la frontière inférieure. La simulation numérique est assurée à l'aide du code commercial ANSYS 15.0. Un couplage numérique est envisagé entre le code FLUENT et le code Transient Thermal (thermique transitoire) existants dans ANSYS. Fluent assure le calcul thermo-convectif avec surface libre dans le domaine air-eau, alors que, Transient Thermal assure le calcul thermique dans le domaine du substrat.

## 2.2. Problème étudié

La Fig. 2.1 schématise le modèle physique étudié. Il s'agit d'une colonne d'eau de largeur 1,2 m et de hauteur 0,6 m située dans l'extrémité gauche de la cavité remplie d'air. La cavité se trouve au-dessus d'un substrat solide en acier d'épaisseur 0,2 m. Initialement (à  $t = 0$  s), on assiste à la rupture de la colonne d'eau qui se trouve à la température de 45 °C. L'air et le substrat sont à la température de 25 °C. Les propriétés thermo-physiques utilisées dans les calculs sont données dans le tableau (2.1) [12-14].

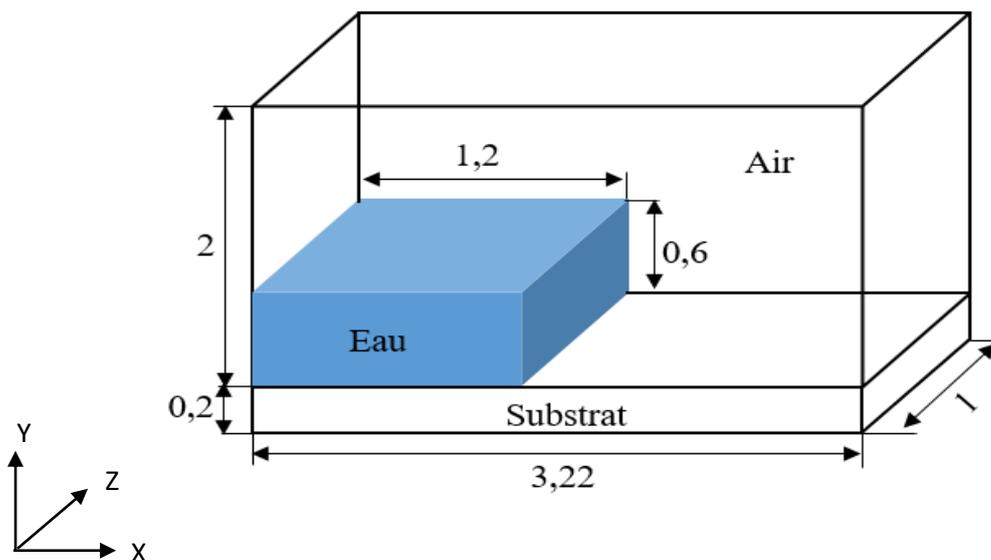


Fig.2.1 Dimensions [m] du modèle physique étudié.

Tableau (2.1) propriétés thermo-physiques de l'air, l'eau et l'acier structuré

PROPRIETES	Symboles	Valeurs			Unités
		Air	Eau	Acier	
masse volumique	$\rho$	1,225	998,2	7850	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Chaleur spécifique	$C_p$	1006,43	4182	434	[J/Kg K]
Conductivité thermique	$\lambda$	0,0242	0,6	60,5	[W/mK]
Viscosité	$\mu$	$1,783 \times 10^{-5}$	0,001003		[Kg/ms]
Coefficient de dilatation thermique	$\beta$	0,00366			[1/K]
Température de référence	$T_{ref}$	298	298	298	[K]

## 2.3. Modélisations mathématiques

### 2.3.1. Modèle dynamique

La modélisation numérique du problème physique repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ L'écoulement est instationnaire, tridimensionnel en régime laminaire
- ✓ Les deux phases eau et air sont considérées comme un fluide Newtonien incompressible.
- ✓ L'effet de la gravité est introduit selon l'approche de Boussinesq.

Les équations gouvernant l'écoulement diphasique eau-air sont les équations de la conservation de la masse (continuité) la conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et celle de l'énergie. En régime instationnaire, les équations de conservation sont données comme suit :

#### a. Equation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$u$ ,  $v$ , et  $w$  sont les composantes de la vitesse suivant les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ , respectivement.

### b. Equation de quantité de mouvement

Suivant l'axe des  $x$  :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

Suivant l'axe des  $y$  :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (2.3)$$

Suivant l'axe des  $z$  :

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

Où  $p$  désigne la pression et  $g$  la gravité.

#### 2.3.2. Modèle VOF :

L'évolution de la surface libre de l'eau en rupture doit être déterminée à chaque instant en tant qu'un élément de la solution. Dans le présent travail, la méthode volume de fluide (VOF décrite dans le chapitre 3) est utilisée pour capturer la surface libre. Son principe consiste à calculer l'écoulement des deux fluides (air et eau), en tant qu'un seul fluide, dont les propriétés physiques changent à travers l'interface. Les caractéristiques physiques  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  et  $C_p$  sont déterminés de façon plus précise en utilisant la variable additionnel  $C_k$  qui représente de la fraction volumique.

$$\rho = C_k \rho_1 + (1 - C_k) \rho_2 \quad (2.5)$$

$$\mu = C_k \mu_1 + (1 - C_k) \mu_2 \quad (2.6)$$

$$\lambda = C_k \lambda_1 + (1 - C_k) \lambda_2 \quad (2.7)$$

$$C_p = C_k C_{p_1} + (1 - C_k) C_{p_2} \quad (2.8)$$

➤ Approximation de Boussinesq :

Le terme  $\rho g \beta (T - T_{ref})$  représente l'approximation de Boussinesq qui tient compte de la variation de la masse volumique du fluide en fonction de la température qui est la cause du mouvement libre du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif.

### 2.3.3. Modèle thermique

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par :

$$\diamond \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

(2.9) c'est l'équation d'énergie pour le mélange (air-eau).

$$\diamond \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

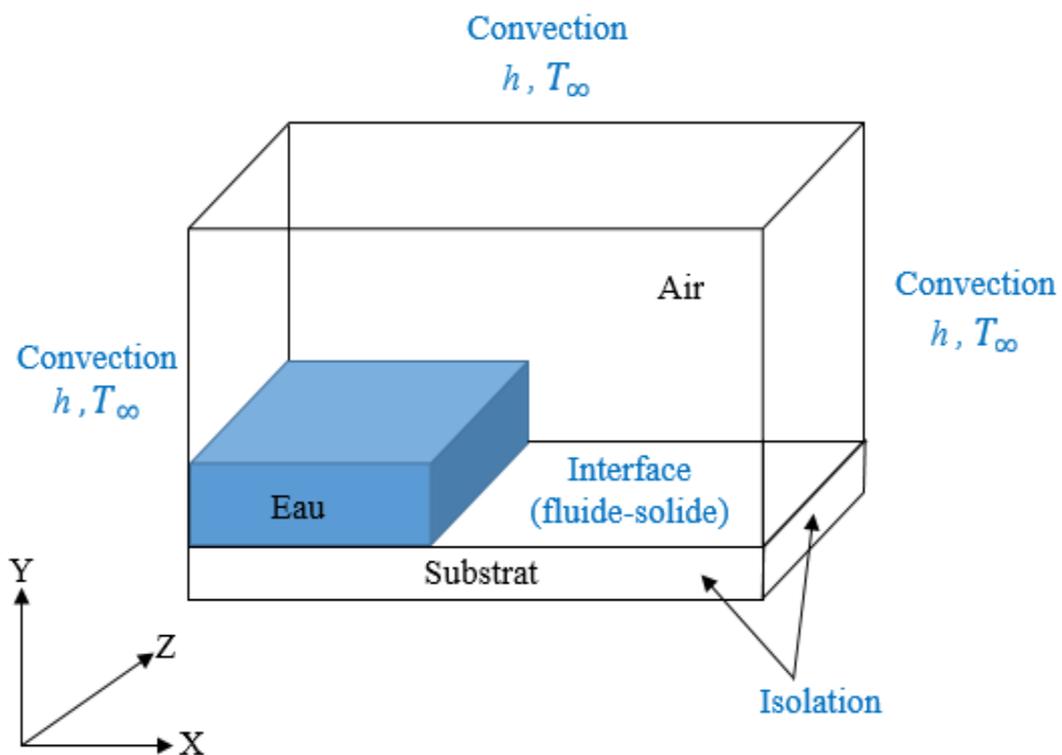
(2.10) c'est l'équation d'énergie au niveau de substrat.

## 2.4. Conditions initiales et aux limites

### 2.4.1. Conditions initiales

Initialement, la colonne d'eau est à la température de 45°C, située dans un réservoir rempli d'air à la température de 25°C. La température du substrat est de 25°C. Les deux phases fluides (eau et air) sont supposées au repos (les composantes de la vitesse sont nulles).

### 2.4.2. Les conditions aux limites



**Fig.2.2** Conditions aux limites.

- Les parois extérieures du réservoir, la condition de non glissement (Type Wall) est imposée (vitesses nulles sur la paroi).

$$u = v = w = 0$$

- Les parois extérieures du réservoir sont exposées à un transfert thermique par convection. La température de l'extérieur ( $T_\infty = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et le coefficient de convection ( $h = 1163 \text{ W/ (m}^2\text{K)}$ ) [15]).

- Les parois extérieures du substrat sont supposées isolées :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ (} n \text{ désigne la normale à la surface)}$$

- Interface fluide-solide

Au niveau de la limite entre les deux fluides et le solide (interface fluide-solide), l'information pour la solution est partagée entre le solveur du fluide (Fluent) et le solveur du solide (substrat). L'information échangée dépend de la méthode de couplage. Pour les calculs de couplage à double sens, les températures des fluides et du substrat sont transférées entre les deux solveurs.

## 2.5. Simulation numérique

La méthode VOF utilisée par fluent ne permet pas de traiter un écoulement diphasiques dans un domaine distingué, comme la présence de paroi solide (substrat). Alors, il est proposé d'utiliser un système de couplage entre des deux code de calcul :

- ✓ Le solveur **Fluent** pour la simulation dynamique et thermique de l'écoulement diphasique eau/air dans le réservoir en utilisant la méthode VOF,
- ✓ et le solveur **Transient Thermal** pour la simulation thermique au niveau du substrat.

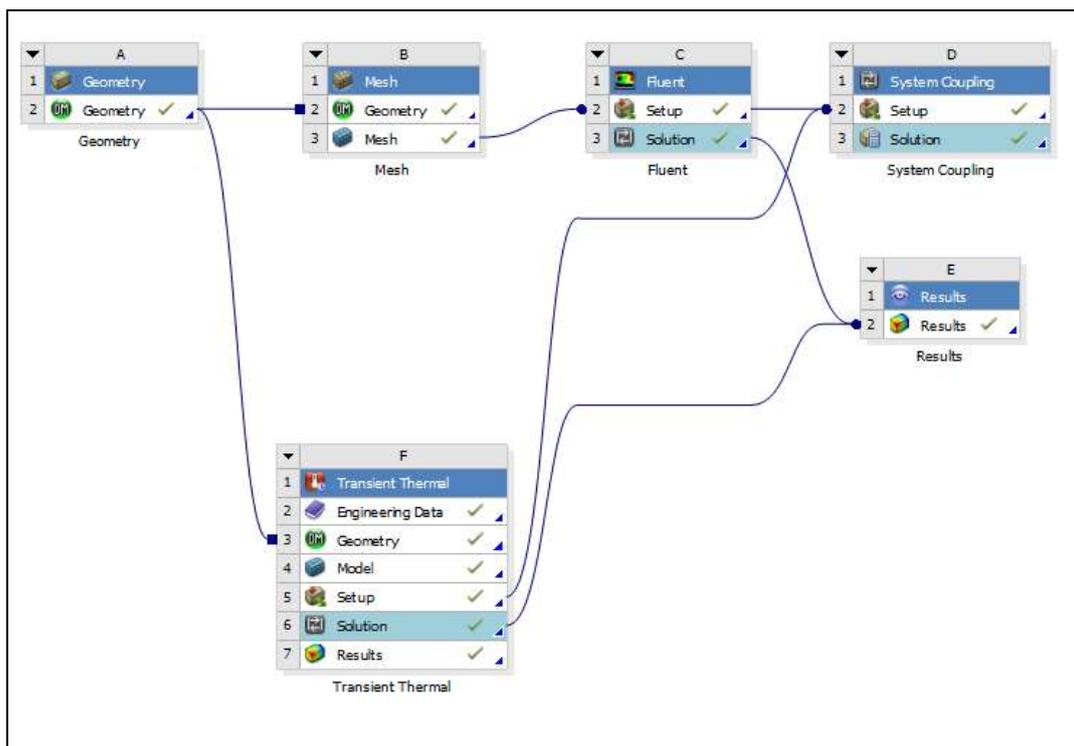


Fig.2.3 Schéma de couplage dans ANSYS 15.0

### 2.5.1. Création de la géométrie

La géométrie est dessinée dans le logiciel (DESIGN MODELER) qui permet de créer des géométries complexes. La géométrie étudiée est composée de deux parties de formes parallélépipédiques :

- la partie supérieure (air +eau).
- la partie inférieure (substrat).

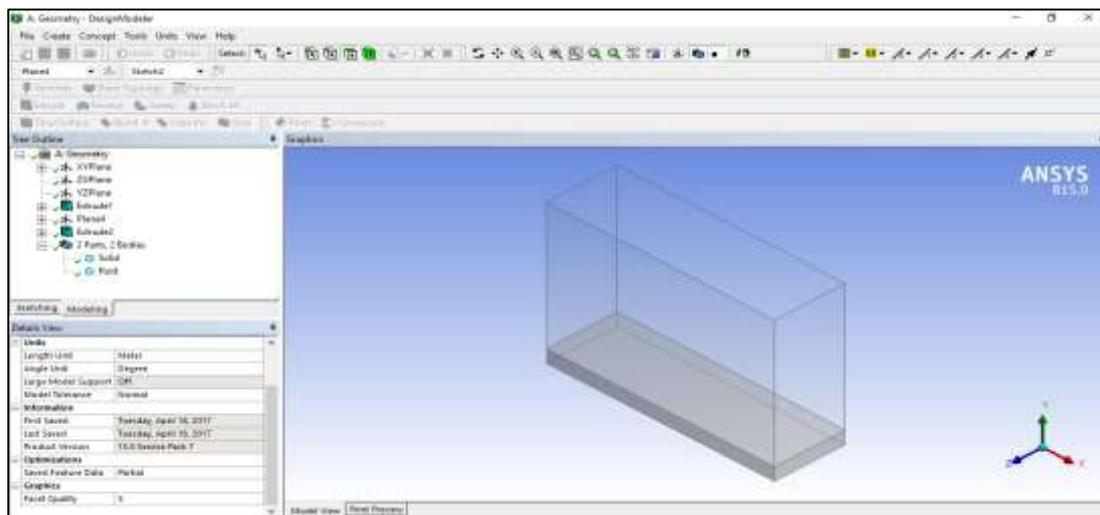
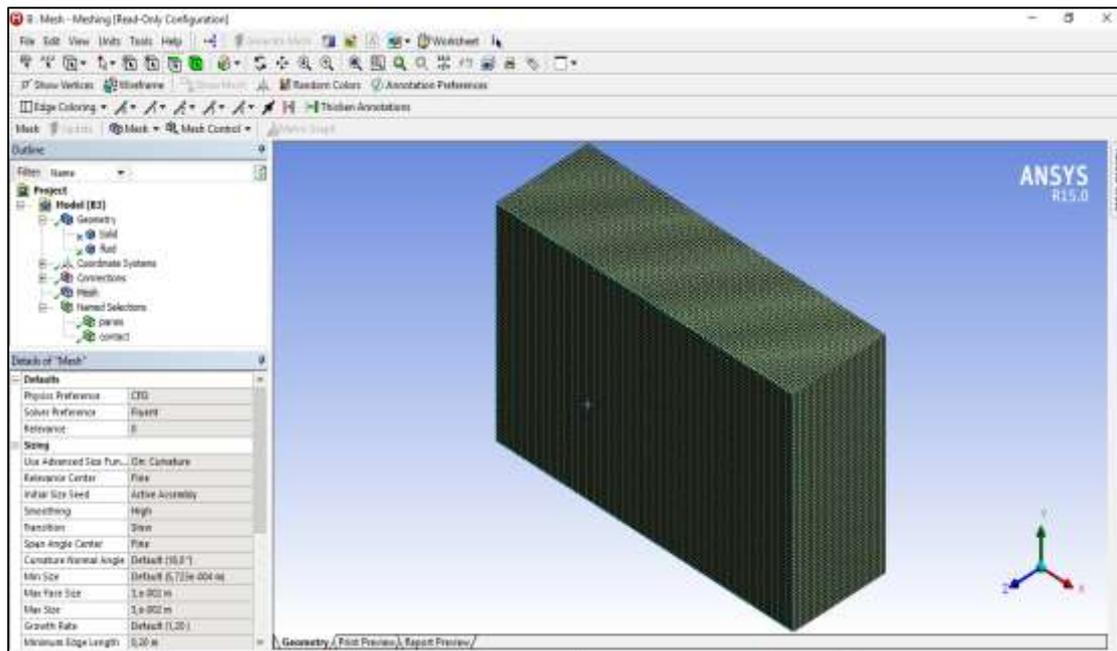


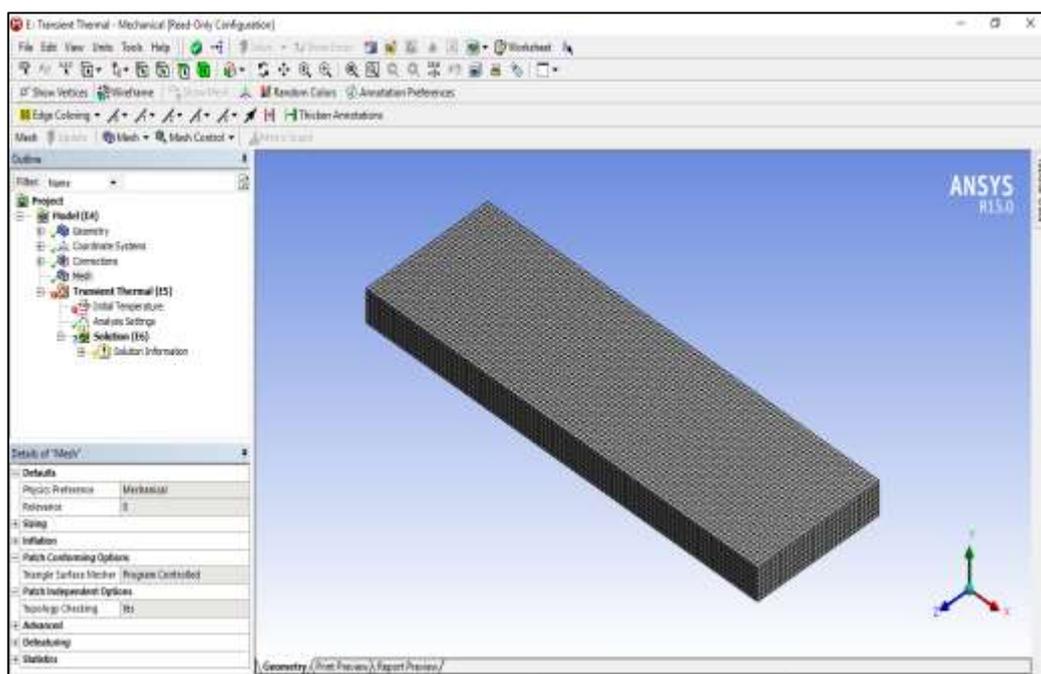
Fig.2.4 création de la géométrie dans DESIGN MODELER

### 2.5.2. Choix du maillage

Le maillage de la géométrie du problème est divisé en deux parties. La cavité (partie fluide) est maillée à l'aide du mailleur MESHING (Fig. 3.5) et le substrat (partie solide) à l'aide du mailleur du code Transient Thermal (Fig. 3.6)



**Fig.2.5** Création du maillage dans MESHING (partie fluide)



**Fig.2.6** Création du maillage dans TRANSIENT THERMAL (partie solide)

### 2.5.3. Calcul numérique

Le code commercial ANSYS FLUENT est utilisé pour la résolution des équations régissant l'écoulement de la colonne d'eau par la méthode des volumes finis. L'équation de la conservation de l'énergie au niveau de substrat est résolu par le code « Transient Thermal ». Un système de couplage numérique est prévu pour transférer les résultats obtenus entre les deux codes.

Pour Les calculs numériques effectués sous FLUENT, nous avons adopté les configurations suivantes :

- **Le modèle du solveur** utilisé est Pressure Based (isolée), cette formulation permet de résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement et celle de l'énergie toutes isolées les unes des autres.
- **Transient** : pour l'étude instationnaire du problème physique

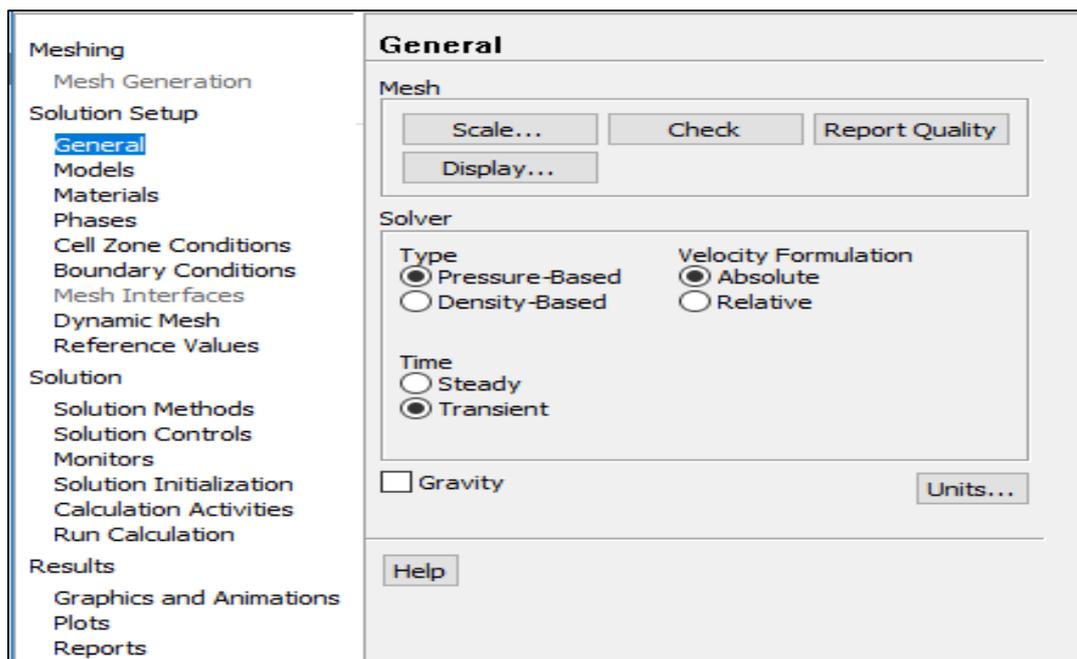


Fig.2.7 Définition du modèle du solveur.

- La méthode VOF est adoptée pour le suivi de l'interface



Fig.2.8 Définition de la méthode multi-phase VOF.

- **Définir les paramètres de la résolution** : Pour le couplage pression-vitesse dans l'équation de Navier-Stokes, Fluent propose plusieurs schémas, à savoir SIMPLE, PISO [16] et autres. Dans cette étude, le schéma PISO (Pression-Implicite with Splitting of Operators) est adopté. Le schéma PISO est fortement recommandé pour les calculs des écoulements transitoires avec de grands pas de temps.
- **Les facteurs de sous relaxation** qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure 3.9 :

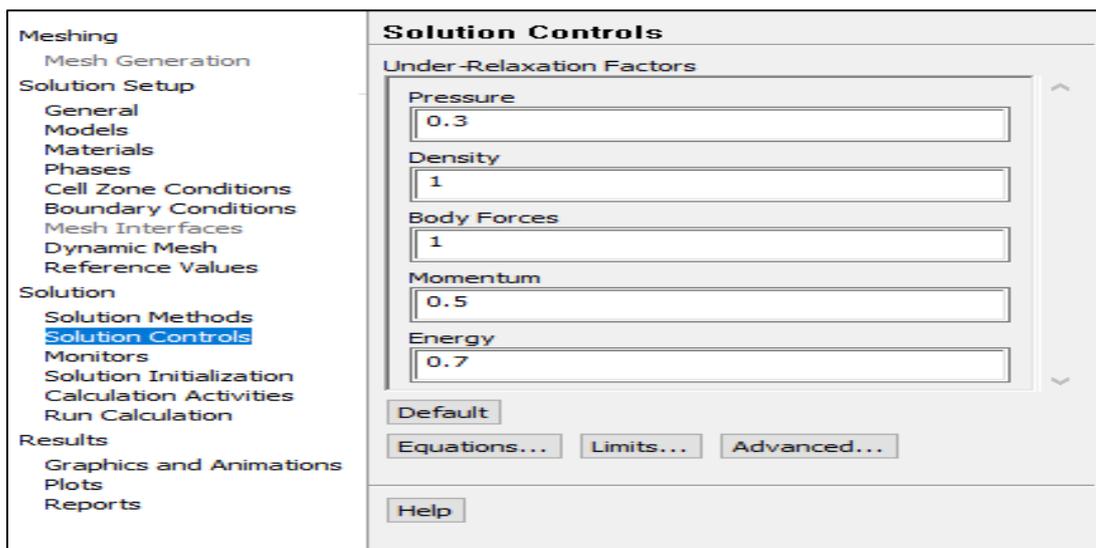


Fig.2.9 Facteurs de Sous-Relaxation

# Modélisation numérique de la surface libre

### 3.1. Introduction

La simulation des écoulements à surface libre voit ses limites sans cesse repoussées. L'une des dernières grandes difficultés dans ce domaine est liée aux problèmes de reconnections d'interfaces, telle que l'on en rencontre dans les écoulements avec débordement. Depuis l'avènement des méthodes dites de capture d'interface initiées par Hirt & Nichols [17], les simulations d'écoulements comportant des formes complexes de surface libre sont envisageables. Ce chapitre présente les différentes méthodes employées pour déterminer l'allure de la surface libre ainsi que la méthode utilisée dans notre simulation.

### 3.2. Ecoulements multiphasiques à surface libre

Les écoulements à surface libre fait référence aux écoulements des fluides en contact avec l'atmosphère (canal, rivière, conduite ...). Les écoulements à surface libre fortement déformable concernent des domaines d'activités aussi variés que le déferlement d'une vague, l'atomisation d'un jet ou la confection de revêtement par dépôt et solidification. La caractérisation de tels phénomènes est difficile à mener expérimentalement car les échelles spatiotemporelles mises en jeu sont souvent difficiles à atteindre. La mise en œuvre par simulation numérique directe d'un modèle d'écoulement à surface libre apparaît donc comme une solution intéressante.

### 3.3. Méthodes de suivi d'interface

Les méthodes d'approximation d'interface mobile sont classifiées essentiellement en deux catégories :

#### 3.3.1. Méthodes à maillage mobile

Dans les méthodes à maillage mobile ou à suivi d'interface (interface-tracking methods) le maillage est réajusté chaque fois que la surface libre est déplacée. Ces méthodes sont conceptuellement les plus intuitives puisqu'elles consistent à utiliser un maillage qui accompagne la forme des interfaces. Comme la

forme évolue au cours du temps, le maillage change lui aussi. Avec une telle discrétisation, l'ensemble des conditions de saut aux interfaces peuvent être imposées naturellement et en respectant exactement la géométrie des surfaces. Ces méthodes sont donc plus précises. Elles ont néanmoins l'inconvénient d'être difficiles à mettre en œuvre. Dans les méthodes explicites, qui doivent employer de petits pas de temps, ces méthodes sont souvent ignorées.

### 3.3.2. Méthodes à maillage fixe :

Le calcul est exécuté sur un maillage fixe, qui se prolonge au-delà de la surface. Dans le cas des méthodes à maillage fixe, seul un maillage eulérien discrétise l'ensemble du domaine physique considéré. Les équations d'évolution des fluides et celles des interfaces sont résolues sur ce maillage fixe.

La forme de la surface libre est déterminée par les cellules qui sont partiellement remplies. Ceci est réalisé soit par le suivi des particules de masse négligé (massless) introduites dans la phase liquide près de la surface libre au début (Marker and Cell ou MAC, décrite par Harlow et Welch 1965), ou bien en résolvant une équation de transport pour la fraction liquide (volume of Fluid ou VOF, décrite par Hirt et Nichols en 1981).

#### 3.3.2.1. La Méthode de MAC (Marker-And-Cell)

La première technique imaginée dans le cadre des méthodes de capture d'interface a été proposée en 1965 par F. Harlow et J. Welch [18] qui l'ont nommée méthode MAC. La méthode a été initialement développée pour traiter des écoulements à surface libre dans lesquels la dynamique de l'écoulement diphasique est limitée à celle d'une seule phase. Elle a été par la suite étendue à des problèmes à deux fluides comme les instabilités de Rayleigh-Taylor [19]. Les marqueurs sont placés dans l'écoulement, ils sont situés dans l'une des phases (voir Fig.3.1). Les marqueurs sont donc volumiques et sont transportés à chaque instant par le champ eulérien de vitesse interpolé. La localisation de l'interface est indiquée par la répartition spatiale des marqueurs. Même si le concept d'Harlow et Welch est novateur à l'époque, plusieurs inconvénients sont apparus. D'une part la méthode

MAC nécessite un très grand nombre de marqueurs uniformément distribués pour assurer une description satisfaisante de l'écoulement. Les temps de calcul sont alors pénalisés ce qui limite les applications de cette méthode. D'autre part la connaissance de la position de l'interface reste très imprécise puisqu'elle est conditionnée par la présence des marqueurs dans les zones proches de l'interface. L'interface est donc affectée par une diffusion numérique responsable d'erreurs significatives sur la prédiction des propriétés géométriques locales de l'interface comme la courbure.

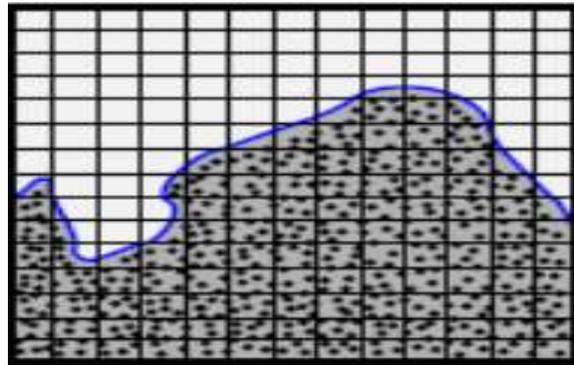


Fig. 3.1 Méthode de MAC

### 3.3.2.2. Method VOF (Volume of Fluid)

La méthode VOF est une méthode puissante pour un fluide à deux ou plusieurs phases non miscibles (par exemple : liquide et gaz), utilisant le remplissage des cellules de calcul pour déterminer l'évolution temporelle du fluide dans un domaine maillé. Cette méthode a été développée par Hirt et Nichols dans les années 80 [20]. Elle résolve un ensemble simple d'équations de quantité de mouvement en dépistant la fraction volumique de chacun des fluides dans tout le domaine. Les applications typiques incluent la prévision de la rupture du jet, grand mouvement des bulles dans un liquide, mouvement du liquide après une interruption d'un réservoir, et du cheminement régulier ou passager de n'importe quelle interface liquide-gaz. Les limites de ce modèle sont :

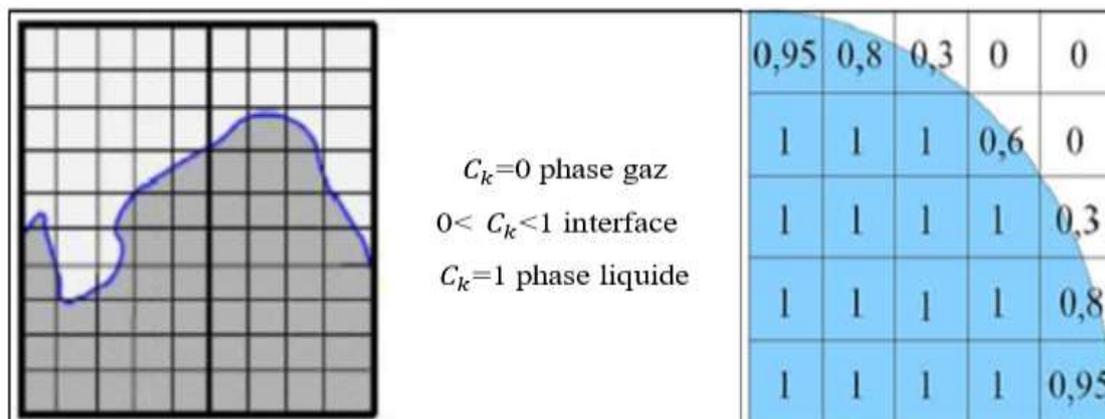
- ✓ Aucune cellule ne doit être vide (présence obligatoire d'une ou plusieurs phases combinées).
- ✓ Une seule phase seulement peut être compressible mais pas les deux.

- ✓ Les écoulements périodiques ne peuvent être simulés lorsqu'on active le modèle VOF (incompatibilité).
- ✓ Ce modèle ne prend pas en compte actuellement ni mélange ni réaction.

**a. Principe de la méthode VOF**

La méthode VOF, particulièrement adaptée pour simuler les écoulements à interfaces fortement déformées, consiste à définir à chaque instant la position de la surface libre de l'écoulement. On utilise pour cela une fonction discrète qui représente dans chaque cellule la fraction volumique de l'eau liquide par rapport au volume total de la cellule.

Les cellules liquides et gazeuses (air) sont définies respectivement par  $C_k=1$  et  $C_k=0$ , et l'interface liquide-air est représentée dans une cellule mixte par une valeur de  $C_k$  comprise strictement entre 0 et 1 (voir Fig.3.2).



**Fig 3.2** Méthode de vof

Comme les marqueurs, la fonction  $C_k$  est advectée par le champ de vitesse  $u$ . Dans le cas des écoulements incompressibles, l'équation d'advection de  $C_k$  donne [21] :

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + u \cdot \nabla C_k = 0 \tag{3.1}$$

L'équation d'advection (3.1) possède deux particularités : elle est hyperbolique et conservative. De nombreux travaux portent sur la discrétisation de

ce type d'équation. Ils montrent entre autre qu'une discrétisation conservative de cette équation permet d'assurer la conservation de la masse. Malheureusement le transport d'une discontinuité s'avère délicat du fait de la diffusion numérique des schémas numériques responsables d'un étalement de la fonction  $C_k$ . Il est en effet impossible de transporter et de conserver au cours du temps une discontinuité. Pour contourner cette difficulté, des algorithmes de reconstruction géométrique ont été imaginés pour repérer la position de l'interface à l'intérieur des mailles comportant

$\nabla C_k \neq 0$  De nombreux algorithmes de reconstruction plus ou moins complexes ont été développés ces dernières années.

On trouvera une revue des méthodes de reconstruction dans [22].

### b. Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF

La formulation de la méthode VOF se fonde sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) n'interpénètrent pas. Pour chaque phase supplémentaire que nous ajoutons à notre modèle, une variable est introduite. En chaque volume de contrôle, les fractions volumiques de toutes les phases sont sommées à l'unité. Les champs pour toutes les variables et propriétés sont partagés par les phases et représentent des valeurs volumiques moyennes, la fraction volumique de chacune des phases est connue à chaque emplacement. Ainsi les variables et les propriétés en n'importe quelle cellule donnée sont purement représentant d'une des phases, ou représentant d'un mélange des phases, selon les valeurs de la fraction volumique. En d'autres termes, si la fraction volumique du  $K^{ième}$  fluide dans la cellule est notée par  $C_k$  elle peut prendre une des cas suivant [23], [24], [25] :

- ❖  $C_k = 0$  : la cellule est vide (du  $K^{ième}$  fluide) ;
- ❖  $C_k = 1$  : la cellule est pleine (du  $K^{ième}$  fluide) ;
- ❖  $0 < C_k < 1$  : la cellule contient l'interface entre le fluide  $K^{ième}$  et un ou plusieurs autres fluides.

Avec :

$$C = \frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maille}} \quad (3.2)$$

$\partial \Omega_{maille}$  Représente le volume total de la maille de calcul de  $\partial \Omega_k$  le volume partie de la maille occupée par la phase  $k$ , Basé sur la valeur locale du  $C_k$  les propriétés et les variables appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

### c. Equation de la fraction volumique

Le cheminement de l'interface (s) entre les phases est accompli par la solution d'une équation de continuité pour la fraction volumique d'une (ou plus) des phases. Pour la  $k^{ième}$  phase, cette équation a la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho_k} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (C_k \rho_k) + \nabla \cdot (C_k \rho_k \vec{v}_k) \right] = S_{C_k} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{p_k} - \dot{m}_{k_p}) \quad (3.3)$$

Où  $\dot{m}_{k_p}$  est le transfert de masse à partir de la phase  $k$  à la phase  $p$  et  $\dot{m}_{p_k}$  est le transfert de masse à partir de la phase  $p$  à la phase  $k$ . Par défaut, la limite de source du côté droit de l'équation (3.3),  $S_{C_k}$  est zéro, mais nous pouvant spécifier une source de masse constante ou définie par l'utilisateur pour chaque phase.

L'équation de la fraction volumique ne sera pas résolue pour la phase primaire ; la fraction volumique de la phase primaire sera calculée est basé sur la contrainte suivante :

$$\sum_{k=1}^n C_k = 1 \quad (3.4)$$

L'équation de la fraction volumique peut être résolue par la discrétisation implicite ou explicite de temps.

#### ✓ Schéma implicite :

Quand le schéma implicite est employé pour la discrétisation temporaire, le schéma d'interpolation en différences finies, QUICK, second ordre en amont et le

premier ordre en amont (Upwind), et les schémas modifiés de HRIC (High Résolution Interface Capturing), sont employés pour obtenir les flux de face pour toutes les cellules, y compris ceux d'interface voisine.

$$\frac{C_k^{n+1} \rho_k^{n+1} - C_k^n \rho_k^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_k^{n+1} U_f^{n+1} C_{kf}^{n+1}) = [S_{C_k} \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{p_k} - \dot{m}_{kp})] V \quad (3.5)$$

Puisque l'équation (3.5) exige les valeurs de la fraction volumique à l'étape actuelle du temps (plutôt qu'à l'étape précédente, comme pour le schéma explicite), une équation de transport scalaire est résolue de manière itérative pour chacune des fractions volumiques de la phase secondaire à chaque pas de temps

✓ **Schéma explicite :**

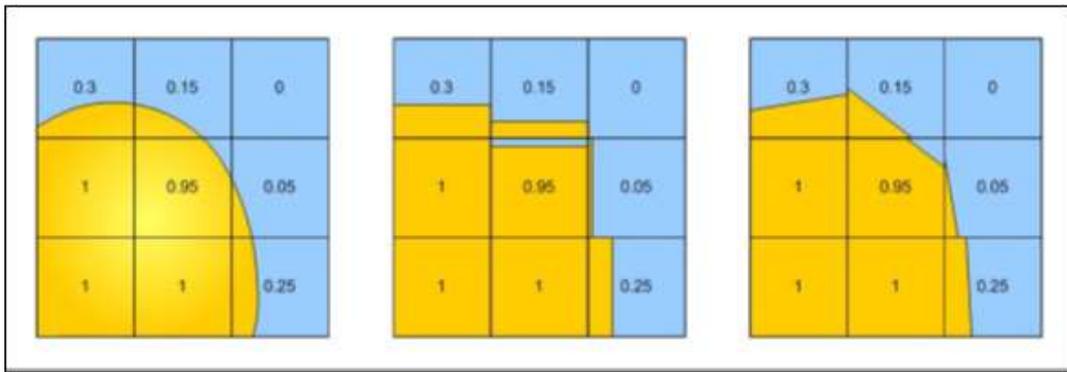
Dans l'approche explicite, les schémas d'interpolation de différence finie, sont appliqués aux valeurs de la fraction volumique qui ont été calculées au pas de temps précédente.

$$\frac{C_k^{n+1} \rho_k^{n+1} - C_k^n \rho_k^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_k^{n+1} U_f^n C_{kf}^n) = [S_{C_k} \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{p_k} - \dot{m}_{kp})] V \quad (3.6)$$

L'équation (3.6) n'exige pas la solution itérative de l'équation de transport au cours de chaque pas de temps, par contre elle est nécessaire pour le schéma explicite.

**d. Interpolation près de l'interface**

Dans un volume de contrôle donné, les flux de diffusion et de convection à travers les faces sont calculés et équilibrés avec les termes sources dans ce même volume. On dispose de plusieurs schémas connus pour le calcul des flux à travers les faces d'un volume de contrôle. Les schémas les plus utilisés dans les modèles VOF sont : le schéma de la reconstitution géométrique, le schéma donneur-accepteur, le schéma explicite et le schéma implicite. Ainsi, une interface peut être calculée de différentes manières dont celles présentées à la Fig.3.3.



**Fig.3.3** Différentes formes de l'interface pour le calcul vof ; (à gauche) Interface réelle et fonction couleur associée ; (au milieu) Classe de méthodes SLIC pour reconstruire l'interface ; (à droite) Classe de méthodes PLIC pour reconstruire l'interface.

La méthode VOF SLIC (Simple Line Interface Calculation) de Noh et Woodward fait partie des premières méthodes VOF développées. Dans cette méthode, l'interface est représentée dans chaque cellule du maillage à l'aide de segments de droite alignés avec l'une des directions du maillage. Cette représentation de l'interface dépend du sens de déplacement qui peut être suivant l'axe horizontal ou suivant l'axe vertical Fig.3.3 (Au milieu)). La méthode SLIC est malheureusement insuffisante dans la pratique. Il est préférable de représenter l'interface par un segment de droite non nécessairement parallèle au maillage, comme sur la Fig.3.3 (À droite), en utilisant la méthode VOF PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation). Ces méthodes sont basées sur le calcul de la normale à l'interface, qui permet de définir la pente de ces droites.

✓ **Schéma reconstruction-géométrique :**

Dans l'approche reconstruction-géométrique, les schémas d'interpolation sont employés pour obtenir les flux de face toutes fois qu'une cellule est complètement remplie d'une phase ou d'une autre. Quand la cellule est près de l'interface entre deux phases, le schéma reconstruction-géométrique est employé.

Le schéma reconstruction-géométrique utilise l'approche piecewise-linear pour représenter l'interface entre les fluides. Dans le code de calcul FLUENT, ce schéma est le plus précis et s'applique pour les mailles non structurées. Le schéma reconstruction-géométrique est généralisé pour les mailles non structurées [26] il suppose que l'interface entre deux fluides a une pente linéaire dans chaque cellule, et emploie cette forme linéaire pour le calcul de l'advection du fluide par les faces de cellules (Fig. 3.3.)

La première étape dans ce schéma de reconstruction calcul la position de l'interface linéaire relativement au centre de chaque cellule partiellement remplie, basé sur des informations sur la fraction volumique et ses dérivés dans la cellule. La deuxième étape calcul la quantité advecté de fluide par chaque face en utilise la représentation et les informations linéaires calculées d'interface sur la distribution normale et tangentielle de vitesse sur la face. La troisième étape calcule la fraction volumique

En chaque cellule en utilisant l'équilibre des flux calculés pendant l'étape précédente.

✓ **Schéma donneur-accepteur :**

Dans l'approche donneur-accepteur [27], les arrangements sont employés pour obtenir les flux de face toutes les fois qu'une cellule est complètement remplie d'une phase ou d'une autre. Quand la cellule est près de l'interface entre deux phases, le schéma donneur-accepteur est employé pour déterminer la quantité de fluide advectée par la face. Ce schéma identifie une cellule en tant que « donneur » d'une quantité de fluide d'une phase et une cellule (voisine) différente comme « accepteur » de cette même quantité de fluide, et est employé pour empêcher la diffusion numérique à l'interface.

La quantité de fluide d'une phase qui peut convectée à travers une frontière de cellules est limitée d'un minimum de deux valeurs : le volume rempli dans la cellule « donneur » ou le volume libre dans la cellule « accepteur ».

L'orientation de l'interface est également employée en déterminant les flux de face.

L'orientation d'interface est horizontale ou verticale, selon la direction du gradient de fraction volumique de la  $k^{\text{ième}}$  phase dans la cellule, et celle de la cellule voisine qui partage la face en question.

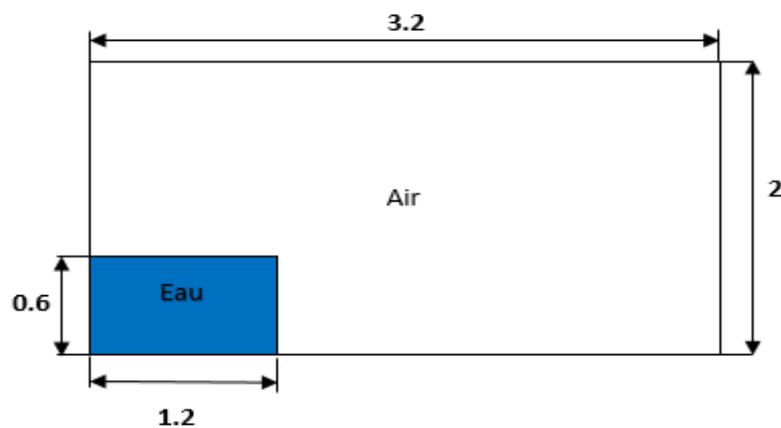
### 3.4. Conclusion

En résumé, la méthode VOF permet de gérer naturellement les changements de topologie de l'interface, les ruptures et connexions. Elle est conservative en masse. Cependant, ses mauvaises propriétés algébriques rendent difficiles le calcul des grandeurs qui caractérisent l'interface (normale, courbure, tangente). De plus, même si les algorithmes de reconstruction sont efficaces pour améliorer la précision, ils sont complexes et coûteux à mettre en place en 3D. Finalement, la qualité de cette méthode dépendra à la fois de la méthode de reconstruction de l'interface et du schéma numérique pour la résolution de l'équation d'advection.

# Résultats et Discussions

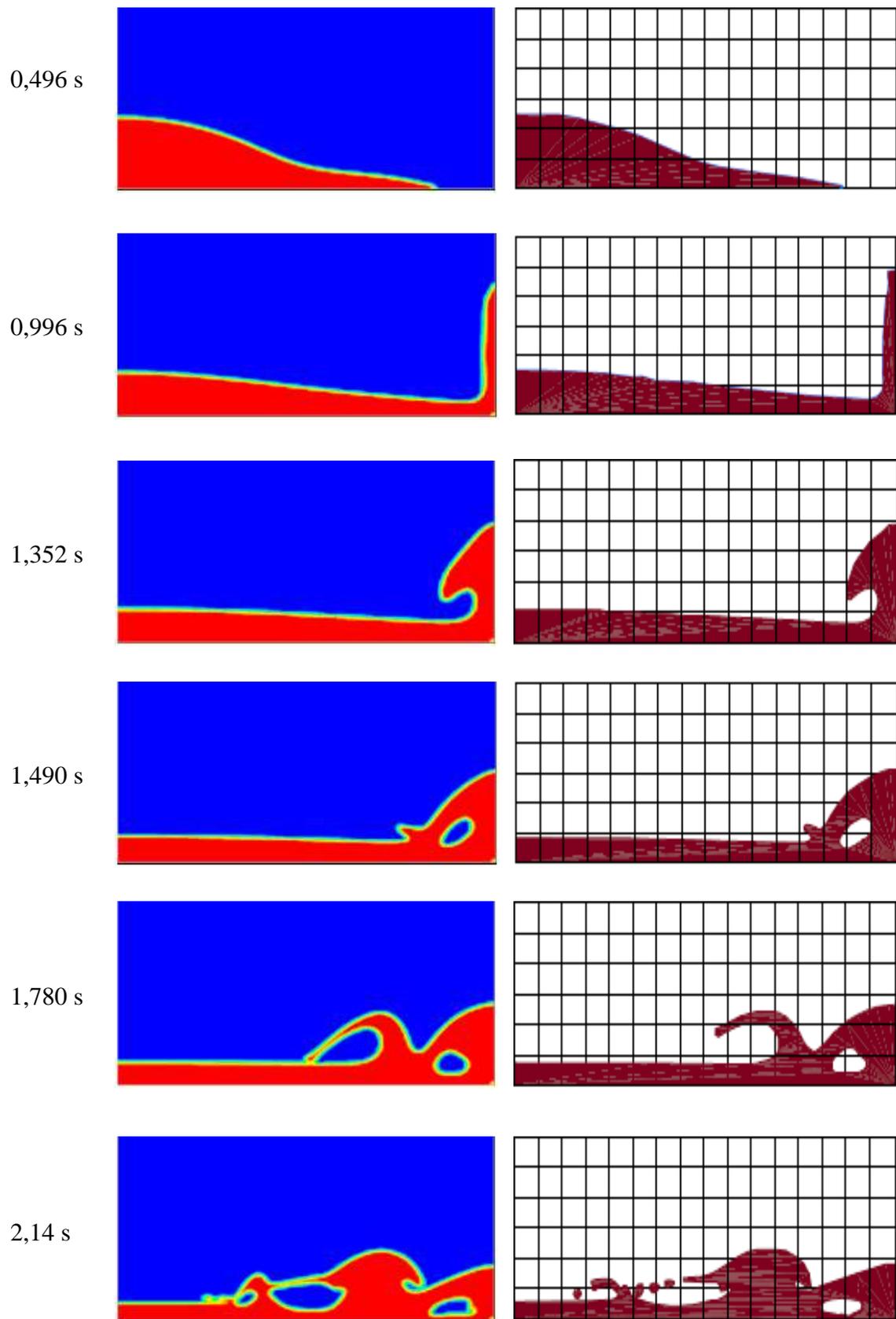
#### 4.1. Validation du modèle VOF

Le modèle de validation porte sur l'étude dynamique bidimensionnelle de la rupture d'une colonne d'eau dans une cavité (sans présence de substrat, Fig. 4.1) [28]. La géométrie étudiée est une cavité remplie d'air dont la condition aux parois est de type **Wall** (condition de non glissement). Une colonne d'eau se trouve à l'extrémité gauche de la cavité. La masse volumique de l'air et de l'eau sont 1,225 et 998,2 kg/m<sup>3</sup>, respectivement.



**Fig.4.1.** Géométrie et dimensions (m) du modèle de validation

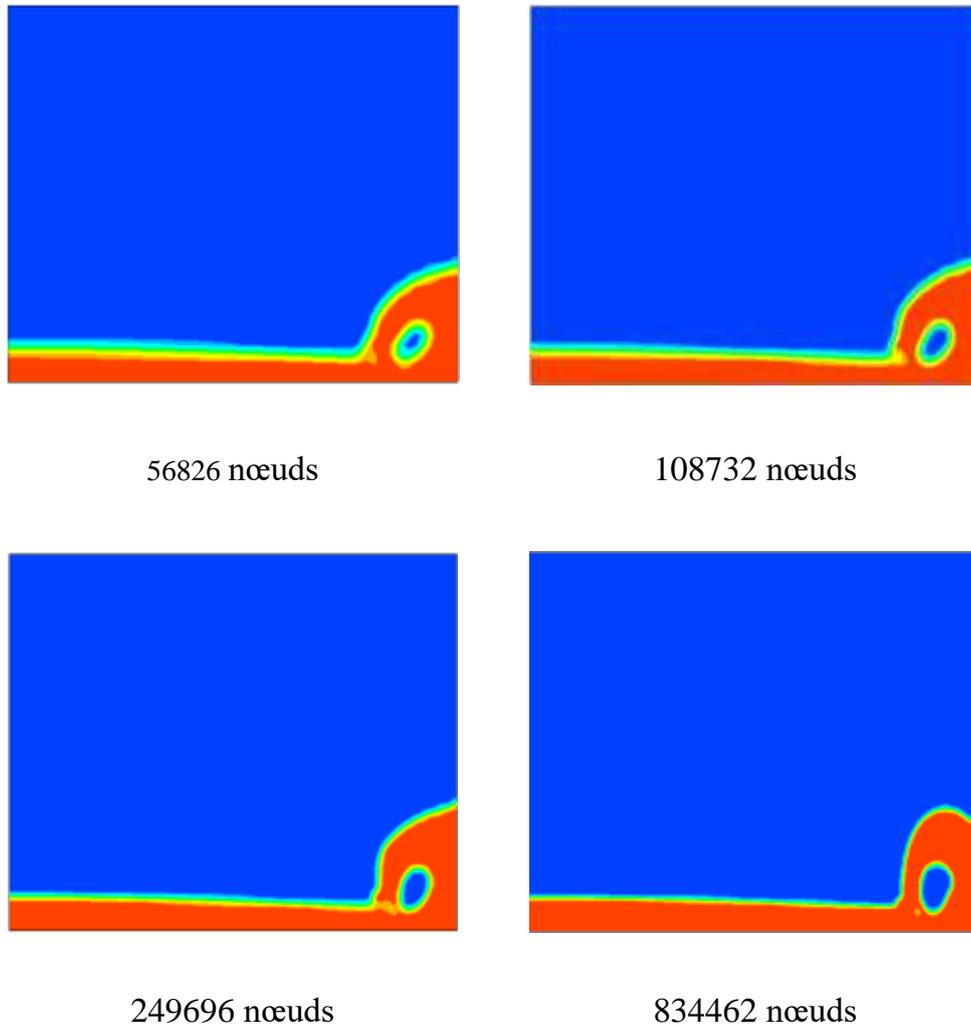
La Fig.4.2 montre l'évolution de la surface libre de la chute d'eau en fonction du temps obtenue et celle tirée de la littérature [29]. Il est observé la bonne précision du modèle adopté avec celui de la référence [29]. Le modèle prédit convenablement la forme de la surface libre et la position des poches d'air emprisonnées dans la phase liquide.



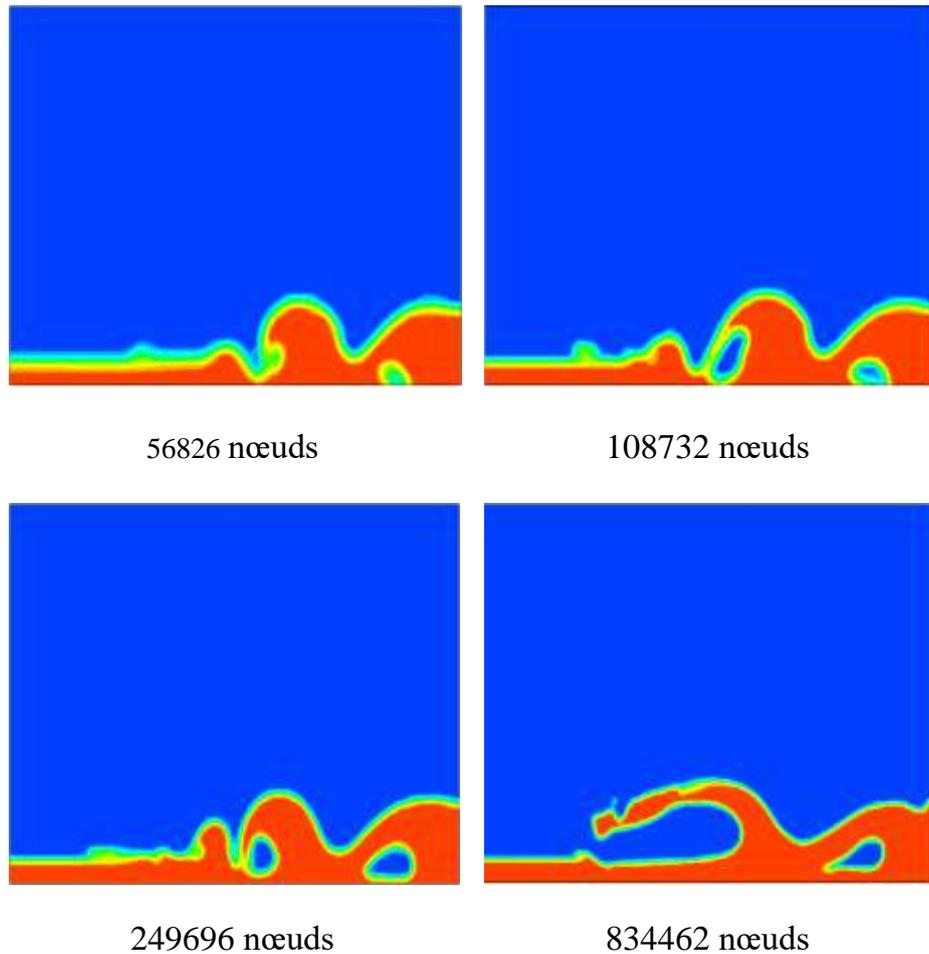
**Fig.4.2** L'évolution dynamique de la colonne d'eau

#### 4.2. Test de maillage

Un test de maillage a été effectué pour optimiser le temps de calcul pour une bonne convergence et une meilleure précision. Quatre différentes tailles de maillages ont été testées, à savoir 56826, 108732, 249696 et 834462 nœuds (52000, 101250, 236577 et 805000 éléments).



**Fig.4.3** Test de maillage à  $t = 1,5$  s

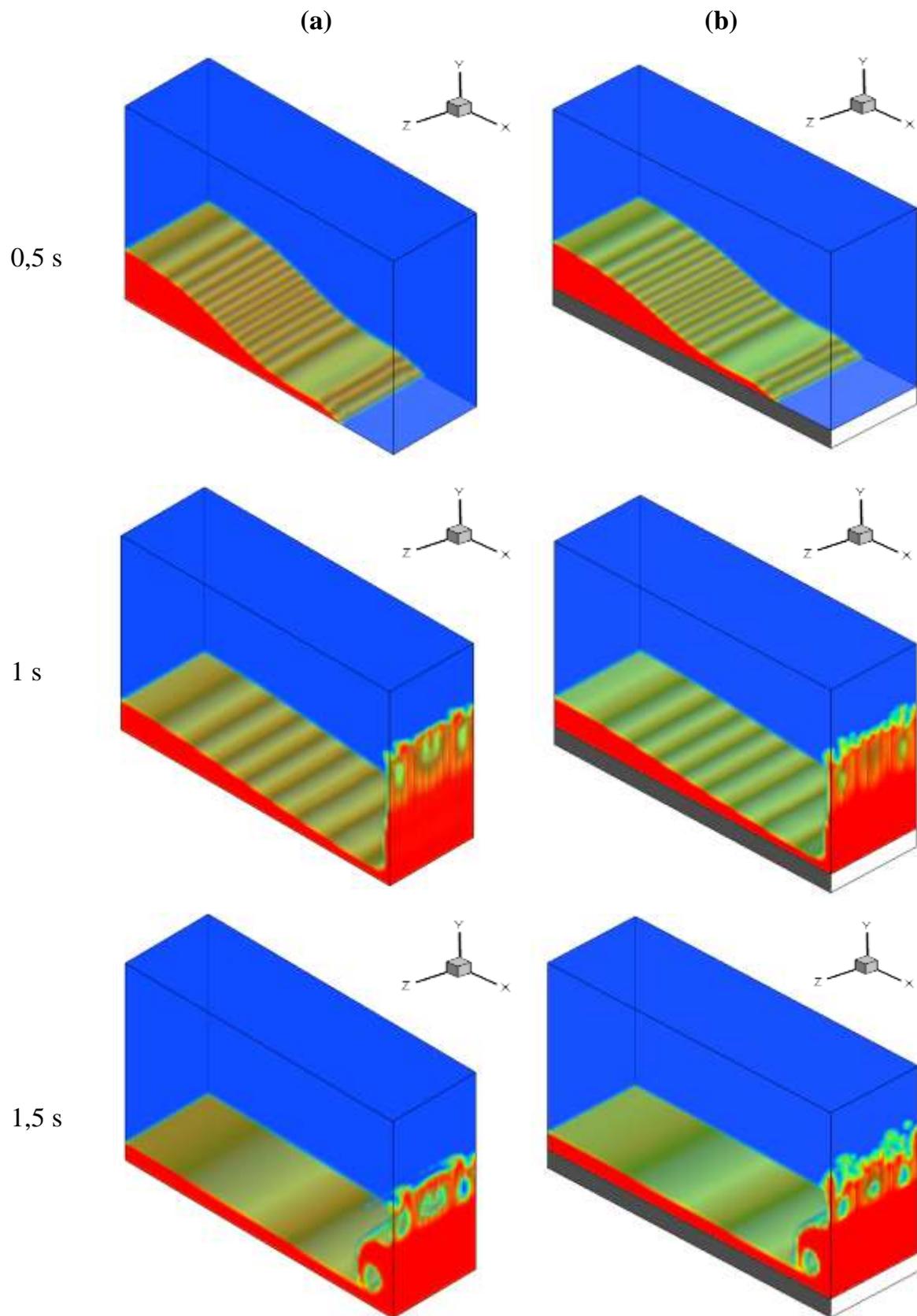


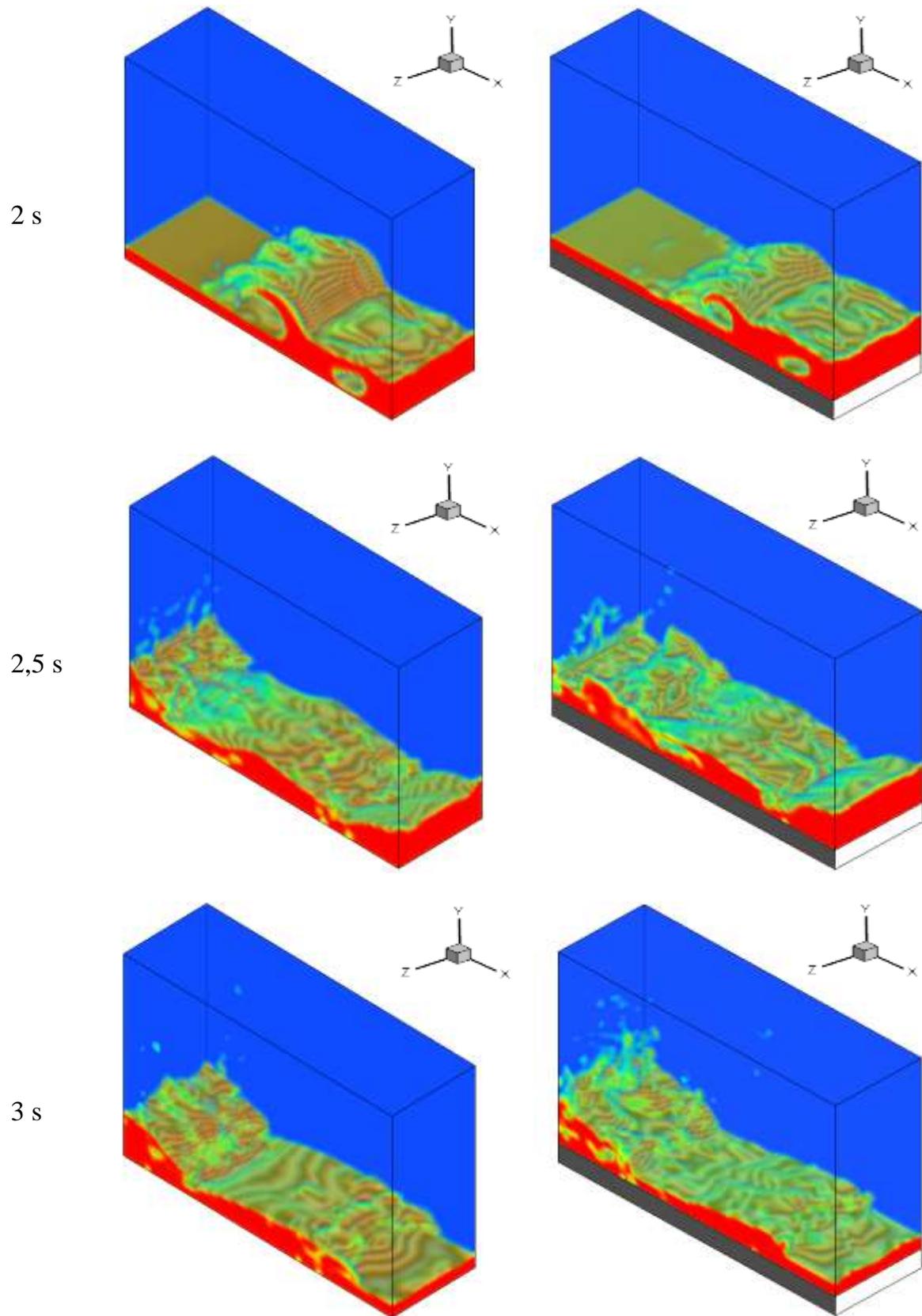
**Fig.4.4** Test de maillage à  $t = 2$  s

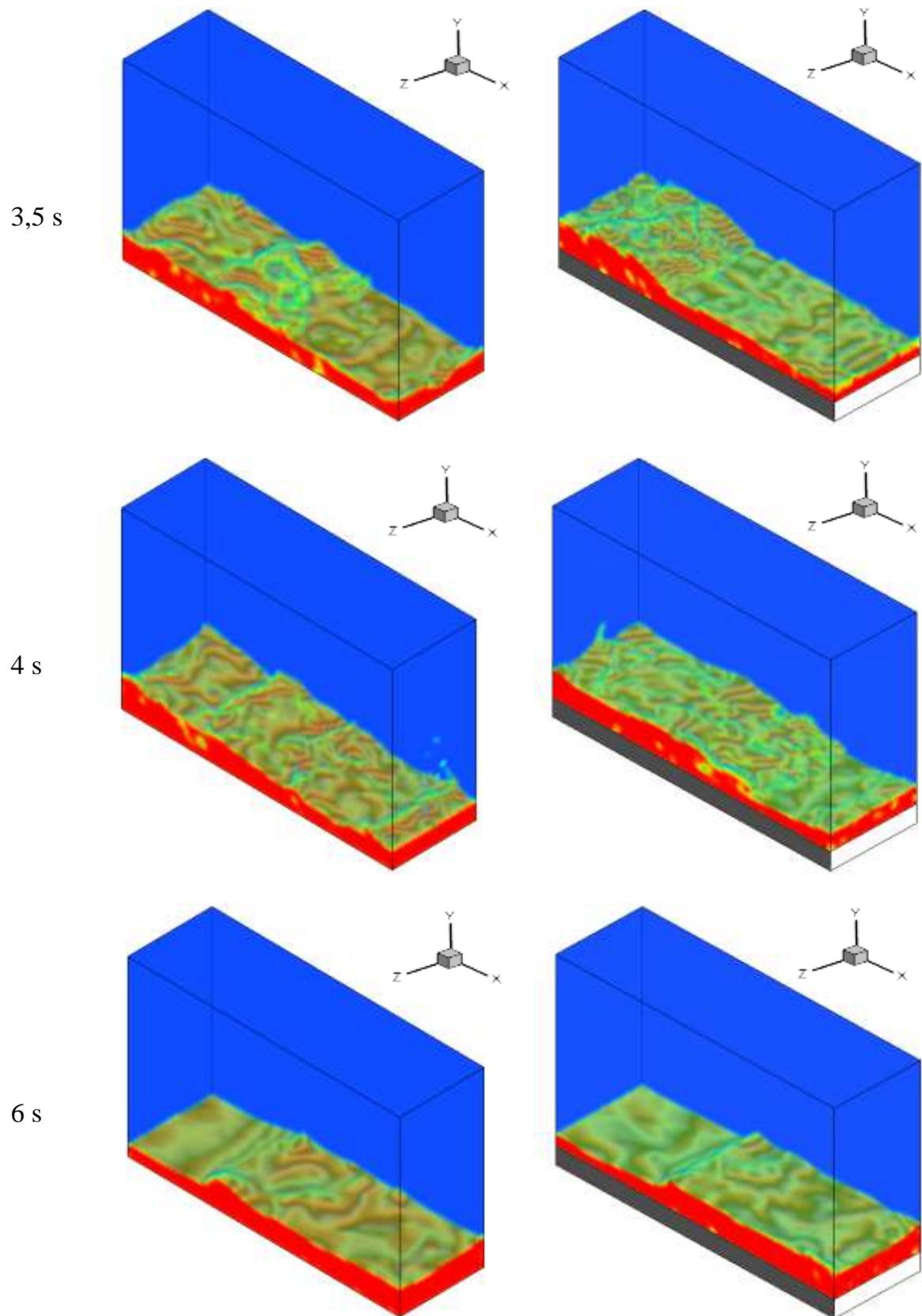
Les Figs. 4.3 Et 4.4 représentent l'évolution dynamique de la colonne d'eau à  $t = 1,5$  s et  $t = 2$  s pour les quatre (04) tailles de maillage. Les résultats montrent que la taille de 249696 nœuds (236577 éléments) offre la meilleure précision. En effet, un maillage de 834462 nœuds montre une évolution de la surface libre assez différente aux autres maillages (à  $t = 2$  s). Cela, nous encourage à adopter un maillage de 249696 nœuds dans nos calculs.

4.3. Résultats et interprétations

4.3.1. Evolution de la fraction volume







**Fig.4.5** Evolution tridimensionnel de la surface libre de l'eau en fonction du temps (a) sans substrat et (b) avec substrat

La Fig. 4.5 montre l'évolution tridimensionnelle du profil de la surface libre d'eau en fonction du temps, sans et avec présence de substrat. La couleur bleu représente l'air et la couleur rouge représente l'eau.

A  $t=0,5$  s, on assiste à la rupture de la colonne d'eau créant une vague qui se déplace vers l'extrémité droite. A  $t=1$  s, la vague atteint l'extrémité droite et monte vers le haut. A  $t=1,5$  s, on assiste à la chute d'une première masse d'eau créant une vague avec emprisonnement d'une première poche d'air, l'autre masse descend d'une manière très instable. Cependant, cette instabilité est plus intense avec la présence du substrat.

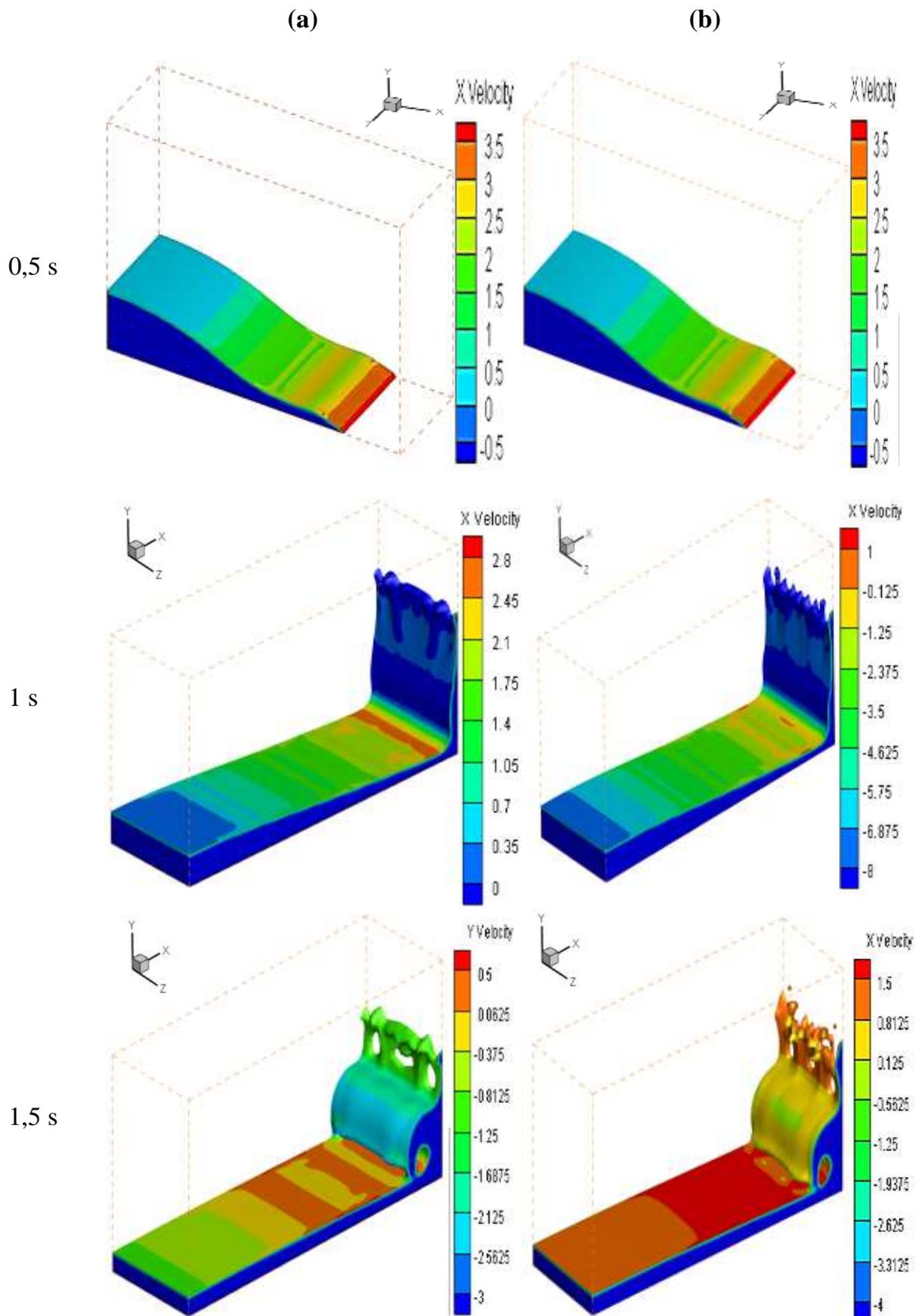
A  $t=2$  s, on assiste à un saut de la vague de retour entraînant l'emprisonnement de la deuxième poche d'air, le saut et la taille de la poche d'air sont plus importants sans substrat. L'écoulement est donc plus agité à la présence du substrat. A  $t=2,5$  s et sans substrat, la vague avec la deuxième poche d'air atteint l'extrémité gauche et entame son deuxième retour, elle entre en collision avec la vague de la première poche d'air. A cet instant et avec le substrat, les deux vagues se trouvent encore dans la période du premier retour.

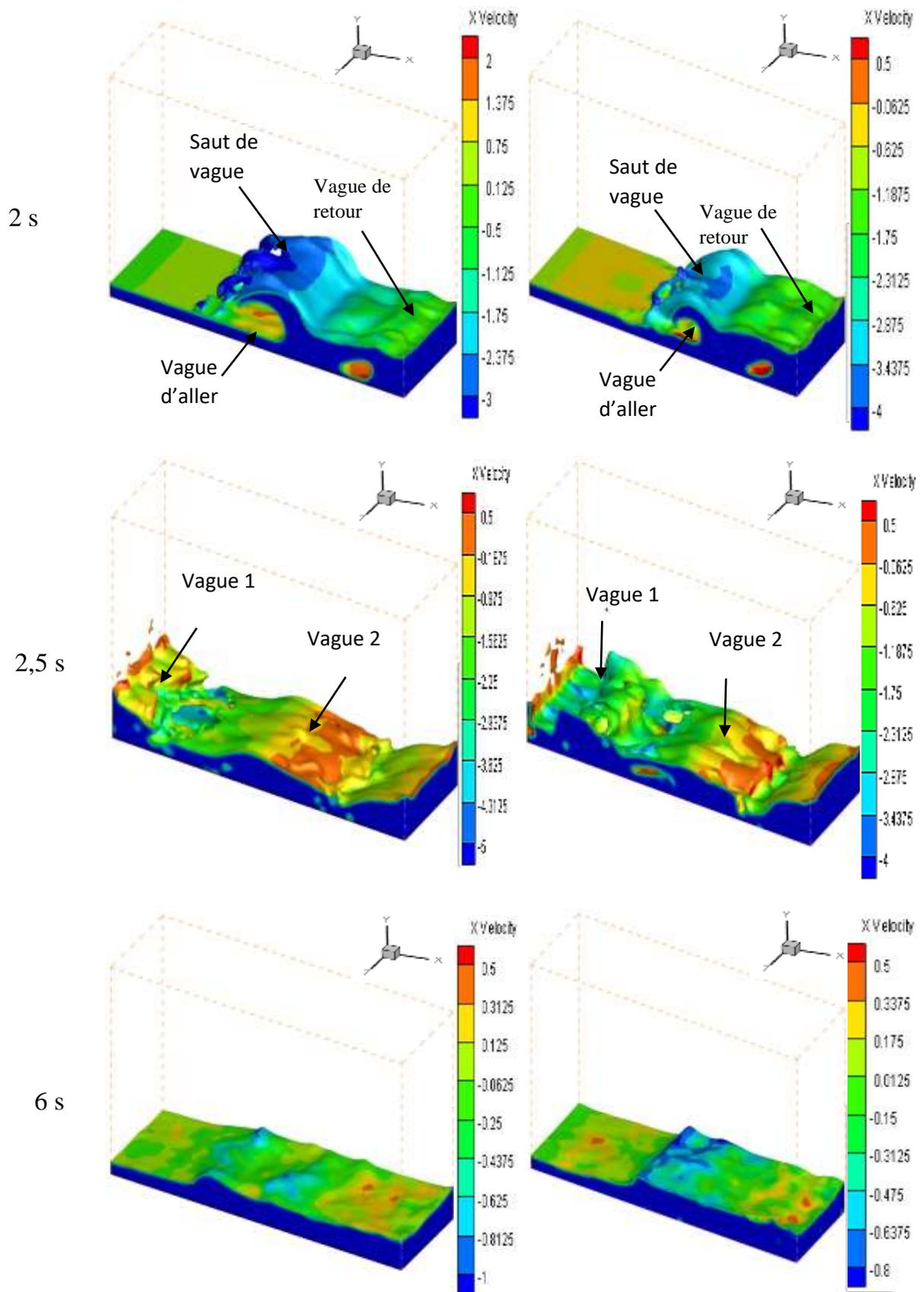
A  $t=3$  s, et sans substrat, la collision entre les deux vagues entraîne la montée de l'eau. Avec substrat, les deux vagues atteignent l'extrémité gauche et créent une grande perturbation au niveau de la surface libre. A  $t=3,5$  s et sans substrat, on assiste à une autre collision entre les deux vagues d'aller et de retour. Avec substrat, on assiste au déplacement d'une importante masse d'eau à la surface créant une vague assez perturbée et de taille plus importante.

A  $t=4$  s, on remarque que la présence du substrat offre un comportement de la surface libre complètement différent, avec une répartition des poches d'air en taille et en position complètement différentes.

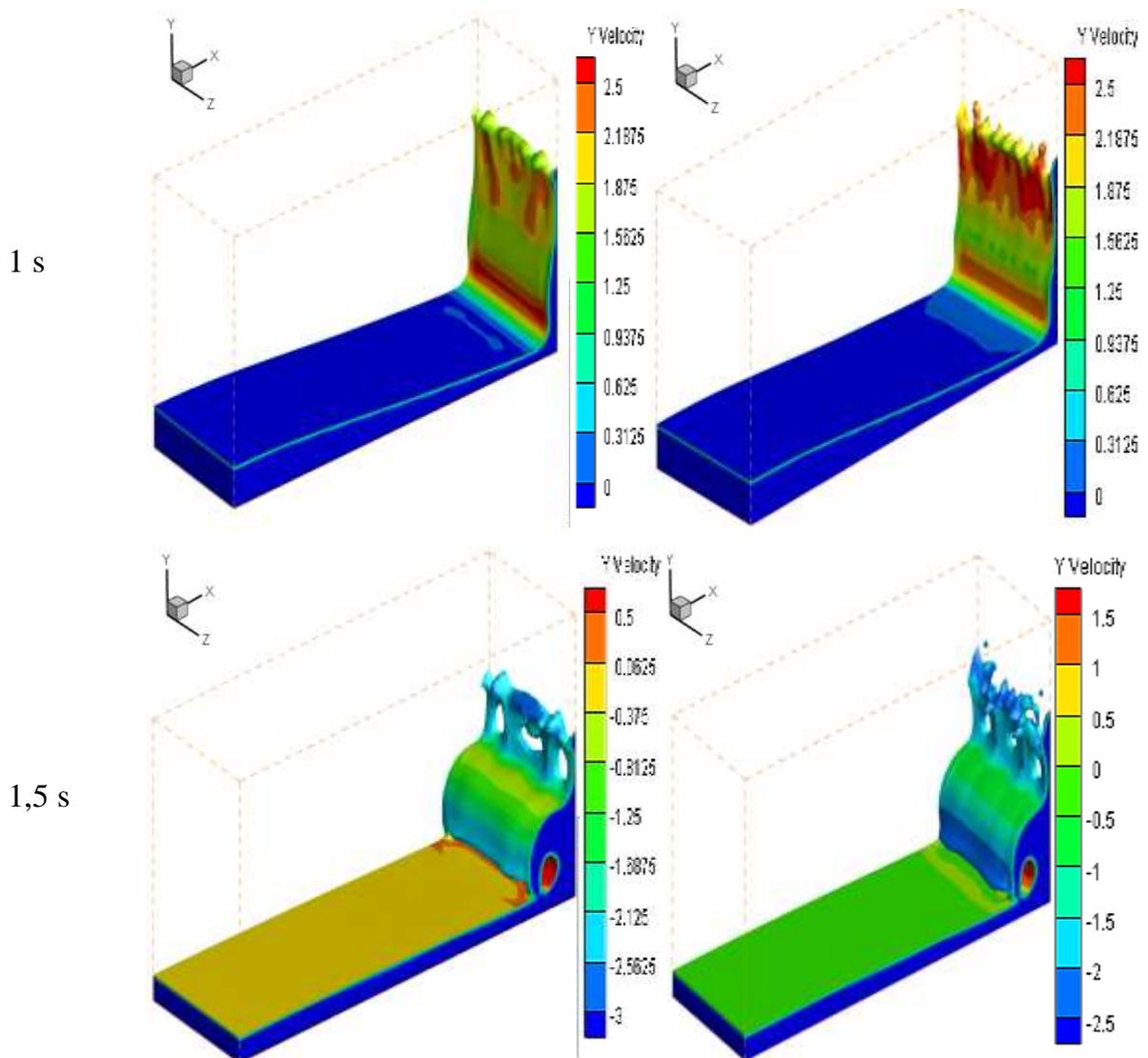
A  $t=6$  s et sans substrat, l'écoulement est plus agité avec présence de collision entre les vagues qui se déplacent en sens opposés. Avec substrat, l'écoulement est moins agité, les vagues ont tendance à se rattraper pour former une vague plus importante.

4.3.2. Evolution de la vitesse





**Fig.4.6** Evolution temporelle des contours de la vitesse (suivant  $x$ ) au niveau de la surface libre (a) sans substrat et (b) avec substrat



**Fig.4.7** Evolution temporelle des contours de la vitesse (suivant  $y$ ) au niveau de la surface libre (a) sans substrat et (b) avec substrat

Les Figs 4.6 et 4.7 montrent l'évolution temporelle des contours de la vitesse au niveau de la surface libre sans et avec substrat suivant  $x$  et  $y$ , respectivement. Afin de mieux visualiser le profil des vitesses au niveau de l'interface, on propose de présenter les temps (1 et 1,5 s) sous un autre angle de vue.

A  $t = 0,5$  s, la rupture de la colonne d'eau crée une vague qui se déplace avec une vitesse de 3,5 m/s.

A  $t = 1$  s, la vague atteint la paroi droite avec une vitesse de 2,8 m/s (Fig. 4.6) et monte vers le haut avec 2,5 m/s (Fig. 4.7) dans les deux configurations (a) et (b). La diminution de la vitesse (de 3,5 à 2,5 m/s) peut être expliquée par la conversion de l'énergie cinétique en énergie potentielle.

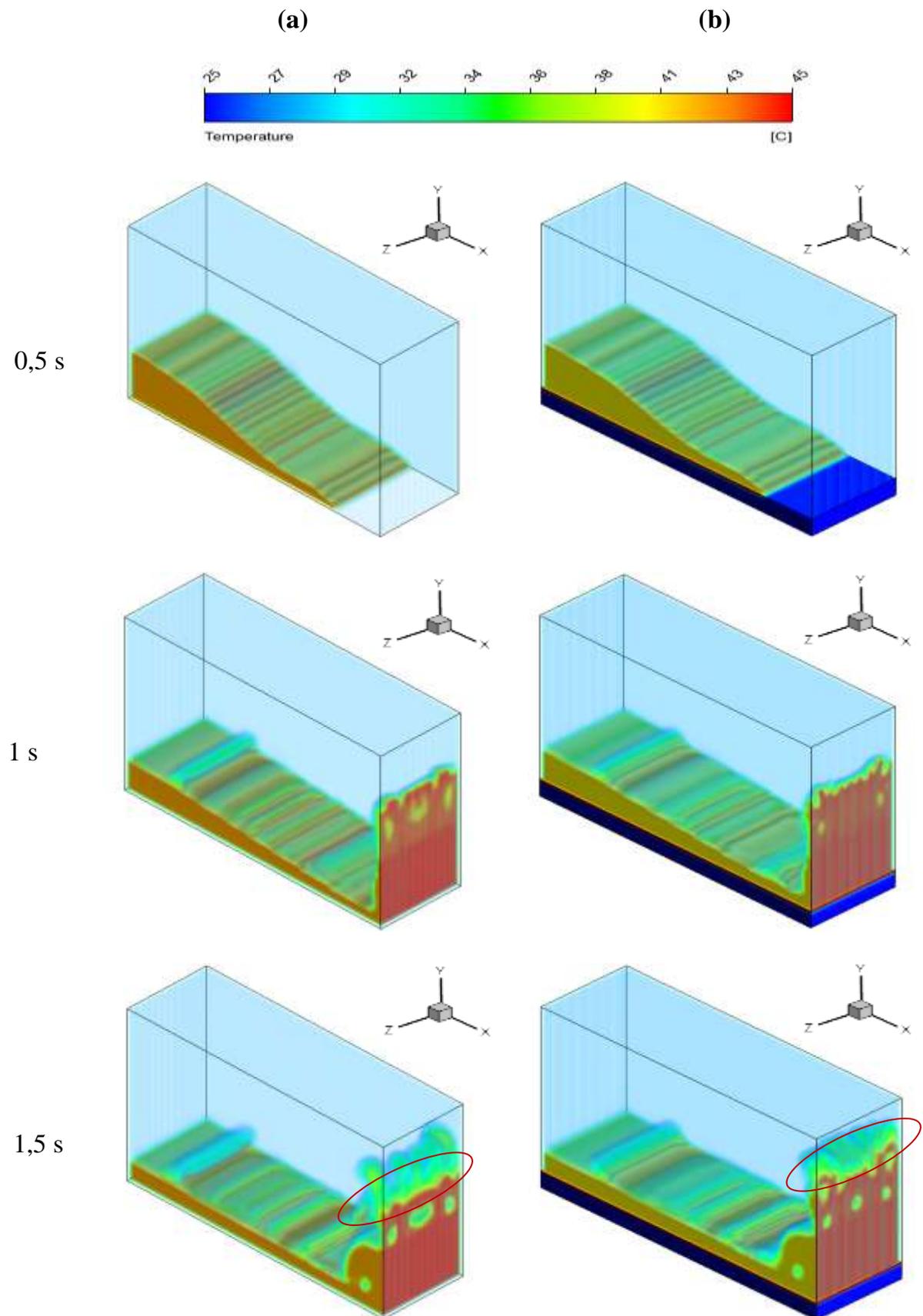
A  $t = 1,5$  s, par l'effet de gravité la vague chute avec une vitesse maximale de 3 et 2,5 m/s pour la configuration (a) et (b), respectivement (Fig. 4.7).

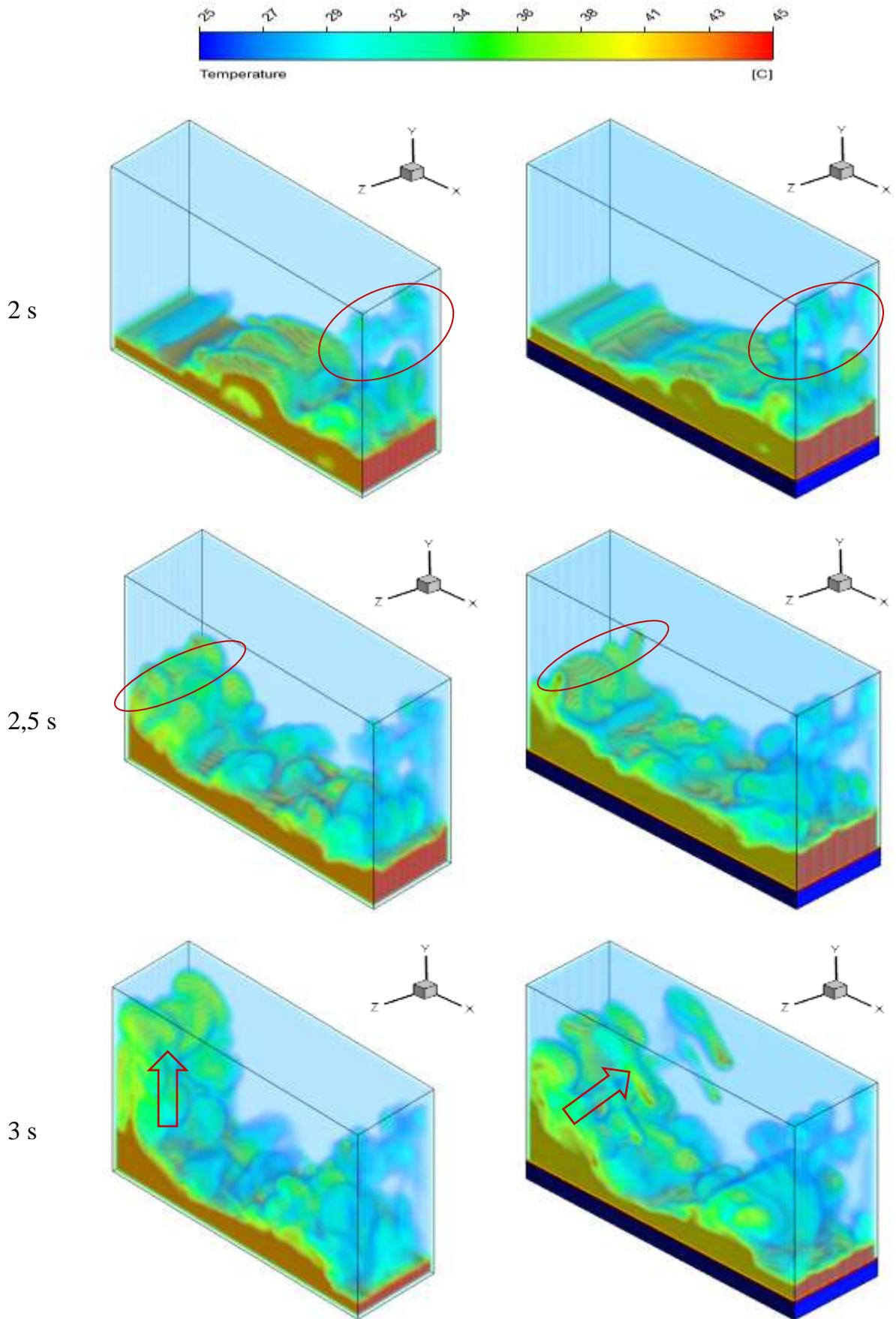
A  $t = 2$  s, la vague de retour se déplace avec une vitesse autour de 1,5 m/s pour la configuration (b) et autour de 1,12 m/s pour la configuration (a). La vague de retour entre en collision avec la vague d'aller qui se déplace avec 2 et 1,5 m/s pour les deux configurations (a) et (b), respectivement. Ce phénomène provoque le saut de la vague de retour avec une vitesse de 3 et 4 m/s pour les deux configurations (a) et (b), respectivement.

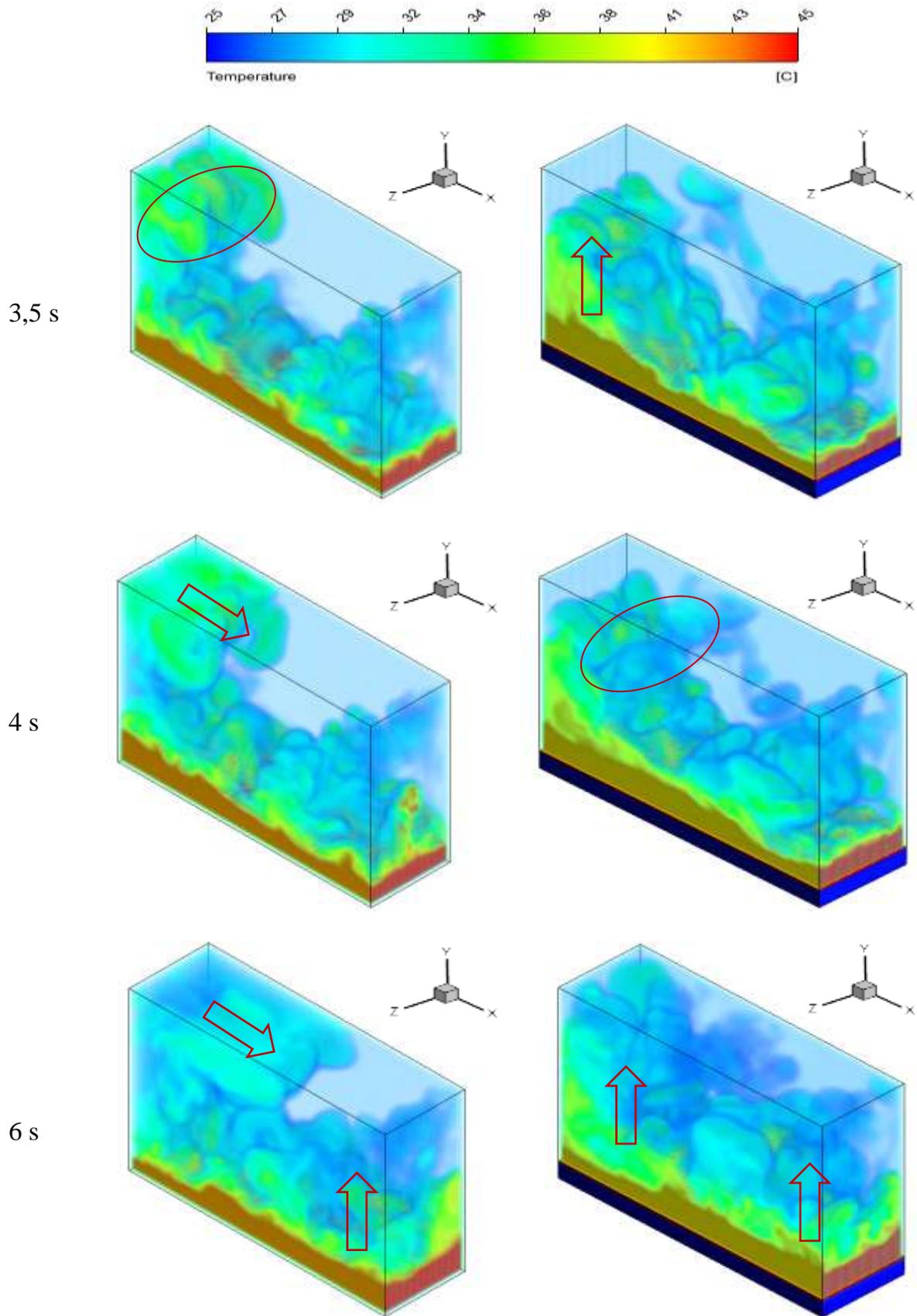
A  $t = 2,5$  s, au moment où la vague 1 atteint la paroi gauche, la vague 2 se déplace avec une vitesse autour de 2,9 m/s (sans substrat). Avec le substrat, les deux vagues 1 et 2 se déplacent parallèlement avec 2,8 et 2,3 m/s, respectivement.

A  $t = 6$  s, l'écoulement se stabilise considérablement avec la présence d'une seule vague qui se déplace avec une vitesse de 1 et 0,8 m/s pour les configurations (a) et (b), respectivement.

4.3.3. Evolution de la température







**Fig.4.8.** Evolution tridimensionnelle de la température en fonction du temps  
 (a) sans substrat et (b) avec substrat

La Fig 4.8 montre l'évolution de la température en fonction du temps (a) sans la présence de substrat et (b) avec la présence de substrat. On remarque clairement que les températures élevées se situent dans la phase liquide (eau). Le réchauffement de la phase air est observé après 1,5 s au niveau de la masse d'eau montante. A 2 s, au niveau de la chute de la colonne d'eau, l'air subit un réchauffement et sa température atteint 30 °C. Après 2,5 s, la vague qui atteint l'extrémité gauche provoque le réchauffement de l'air et la chaleur monte vers le haut par convection naturelle. Sans substrat, la chaleur arrive en haut de la cavité (autour de 3,5 s) et se dissipe le long de la paroi supérieure. Avec substrat, la chaleur monte moins rapidement et la température de l'air est plus importante au niveau de l'interface.

# Conclusion générale

### Conclusion Générale

Le présent travail porte sur la simulation dynamique et thermique tridimensionnelle des écoulements à surface libre (eau-air) avec la présence d'un substrat. Le modèle physique représente la rupture d'une colonne d'eau située dans l'extrémité gauche d'une cavité remplie d'air. La cavité se trouve au-dessus d'un substrat solide en acier. L'évolution de la surface libre à chaque instant est déterminée avec la méthode VOF. Ce modèle a été choisi pour sa simplicité et son temps de calcul relativement court par rapport aux autres modèles multiphasiques. L'étude numérique est effectuée à l'aide d'un système de couplage entre deux codes numériques existant dans ANSYS 15.0, à savoir FLUENT (calcul CFD) et Transient Thermal (calcul thermique dans le substrat). La présente étude permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Les vagues sont plus perturbées et les poches d'air sont de tailles plus importantes dans le cas sans substrat par rapport à ceux avec substrat.
2. Sans substrat, il y a présence de deux vagues qui se déplacent en sens opposées qui se rencontrent pour former une vague montante. Avec substrat, les deux vagues se rattrapent et forment une seule vague de taille assez importante.
3. Les vagues peuvent atteindre des vitesses maximales de 5 et 4 m/s dans les cas sans et avec substrat, respectivement.
4. Sans substrat, la chaleur monte par convection naturelle au voisinage de la paroi gauche et se dissipe le long de la paroi supérieure. Avec substrat, la chaleur monte par convection naturelle le long de la surface libre de manière plus homogène.
5. Le système de couplage proposé par ANSYS répond parfaitement au problème d'interface, cependant le temps de calcul est assez coûteux.

Enfin, nous pensons que cette étude montre clairement l'effet thermique considérable de la paroi sur le comportement dynamique et thermique de la surface libre. Donc, il est difficile de négliger cet effet dans les problèmes à surface libre, comme c'est le cas dans la majorité des travaux publiés.

En perspective, on propose dans le futur de :

1. Traiter des applications réelles comme le remplissage des moules.
2. Analyser le comportement thermique de substrat.
3. Développer un modèle mathématique permettant de remplacer la présence du substrat afin de réduire considérablement le temps de calcul.

# Références bibliographiques

### Références Bibliographiques

- [1]: Tommaso. F, Numerical Simulation of Dam-Break Problem Using an Adaptive Meshing Approach department of Industrial Engineering, University of Florence, Italy, 2015.
- [2]: DORING. M et al, Simulation d'écoulement a surface libre complexe au moyen de méthodes SPH et VOF, Division Hydrodynamique Navale, Laboratoire de mécanique des fluides Ecole Centrale de Nantes, France.
- [3]: Ryszard. S, Simulation of Dam-Break Flow by a Corrected Smoothed Particle Hydrodynamics Method, Institute of Hydro-Engineering, Polish Academy of Sciences, Poland, 2010.
- [4]: Panicker. G et al, Numerical modeling of advancing wave front in dam break problem by incompressible Navier-Stokes solver, 2015.
- [5]: Biscarini1. S et al, CFD modelling approach for dam break flow studies, University of Rome La Sapienza, Rome, Italy, 2010.
- [6]: Lu Lin, Numerical simulation of turbulent free surface flow over obstruction, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China, 2008.
- [7]: Hossein. A et al, Experimental and 3-D Numerical Simulation of Flow over a Rectangular Broad- Crested Weir, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) , 2013.
- [8]: Hu. J et al, Numerical Simulation on Interface Evolution and Impact of Flooding Flow, College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, China, 2015.
- [9]: BENMOUSSA. F, Etude numerique d'un ecoulement a surface libre, magistère en génie mécanique au département de mécanique faculté des sciences de l'ingénieur université de batna, 2013.

- [10]: Guillaume. B et al, Utilisation d'une méthode de suivi d'interface mixte eulérienne/lagrangienne pour les écoulements diphasiques, Université de Bordeaux 1 Laboratoire TREFLE, 2007.
- [11]: Maronnier. V et al, Numerical Simulation of Free Surface Flows, Département de Mathématiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 199
- [12]: Pilliod. J et al, Calculation of two-phase navier-stokes flows using phase-field modelling, Comput. J. Phys., 199, 2004, p 465-502.
- [13]: Gislain Lipeme Kouyi, Experimentations et modelisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la separation particulaire dans les deversoirs d'orage, Thèse de Doctorat Université Louis Pasteur Strasbourg, 16 décembre 2004.
- [14]: ZONG Zhi et al, A second order volume of fluid (vof) scheme for numerical simulation of 2-d breaking waves, Journal of Marine Science and Application, Vol.6, No.2, June 2007, p 1-5.
- [15]: Subhashini Ghorai, et al, CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes, Chemical Engineering and Processing, 16 August 2005, p 55-65.
- [16]: Youngs D. L, Time-dependent multi-material flow with large fluid Distortion, In Numerical Methods for Fluid Dynamics, edited by K. W. Morton and M. J. Baines (Academic Press, New York, 1982), p 273.
- [17]: HIRT. C et al, Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics 39, 1981, p 201-225.
- [18]: KORTI. M, Simulation numérique des champs dynamique et thermique durant le moulage par injection à haute pression des métaux, mémoire du magister, Université Abou Bekr Belkaid, Algérien, 2012.
- [19] : fluent.

[20]: ansys, engenring data.

[21]: Lan. X et al, Fluid Flow, heat transfer and solidification in the mold of continuous casters during ladle change, Department of Mechanical Engineering, Auburn University, 201 Ross Hall, Auburn, AL 36849-5341, USA, 2000

[22]: Suhas Patankar. V, Numerical heat transfer and fluid flow, Edition series in computational methods in mechanics and thermal sciences, 1980.

[23]: Hirt. C et al, volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics 39, 1 (1981), p201-225.

[24]: Harlow. F et al, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Physics of Fluids 8, 1965, p 2182 p2189.

[25]: Daly B.J, Numerical study of two fluid rayleigh-taylor instability, Physics of Fluids, 10 (2), 1967, p 297-307.

[26]: Hirt. C et al, volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics 39, 1 (1981), p201-225.

[27]: Lopez. J et al, A volume of fluid method based on multidimensional advection and spline interface reconstruction » Journal of Computational Physics 195 (2004), p 718-742.

[28]: Issa. R. I. et al, The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme, Comput.J Phys., 93, 1991, p 388-410.

[29]: Abdolmaleki. K et al, Simulation of The Dam Break Problem and Impact Flows Using a Navier-Stokes Solver, Thomas School of Oil and Gas Engineering The University of Western Australia, Crawley, WA, 6009 Australia.