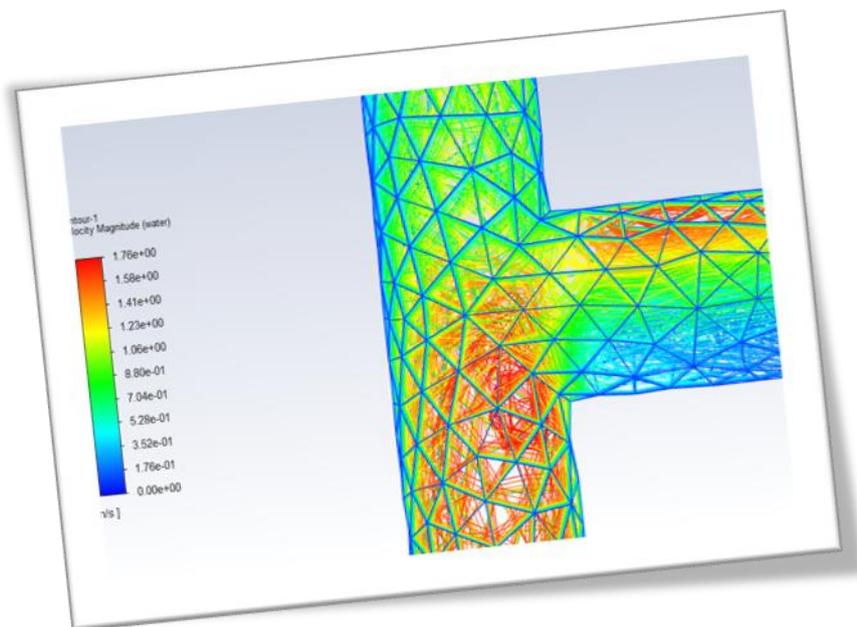


MÉLANGE À FLUX MULTIPHASE DANS UNE T-JONCTION



Etudiants :

Martin CHANU

Hugo VERAN

Peiyao Li

Eva MERLE

Aurélien ZANINI

Enseignant-responsable du projet :

Mostafa Safdari Shadloo

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **12/06/2021**

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 036**

Intitulé du projet : **Mélange à flux multiphase dans une T-jonction**

Type de projet : **bibliographie, simulation numérique**

Objectifs du projet :

- *Gestion d'un projet en équipe, répartition du travail et choix d'une méthodologie*
- *Réalisation de recherches complètes sur un sujet scientifique*
- *Découverte, première approche de la mécanique des fluides numériques*
- *Initiation à la maîtrise d'un logiciel de CFD (Ansys Fluent)*
- *Résolution d'un problème donné à l'aide d'une simulation :*
 - *Choix des paramètres de simulation*
 - *Comparaison de deux méthodes de résolution*
 - *Etude en deux lieux distincts de la jonction, en 2D et en 3D*

Mots-clefs du projet : « **mécanique des fluides** », « **t-jonction** », « **flux multiphase** », « **CFD** »

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
2.1. Organisation du travail	6
2.2. Difficultés rencontrées	7
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. Description du problème.....	8
3.2. Mécanique des fluides théorique	8
3.2.1. Caractéristiques de base d'un fluide.....	8
3.2.2. Équations du mouvement : Navier-Stokes, continuité, quantité de mouvement.	9
3.2.3. Méthodes de résolution numérique	12
3.3. Simulation numérique.....	16
3.3.1. Résolution du problème (étapes, réglages à faire, options à entrer ou choisir, exécution du calcul)	16
3.3.2. Interprétation, analyse des résultats.....	17
4. Conclusion et perspectives	19
5. Bibliographie	20
6. Annexes.....	21
6.1. Documentation technique.....	21
6.2. Schémas de montages, plans de conception.....	22

NOTATIONS, ACRONYMES

CFD : Computational Fluid Dynamics

T-jonction : (ici) pièce hydraulique en forme de T permettant de joindre trois tubes

ρ : masse volumique en kg.m^{-3}

μ : viscosité en N.s.m^{-2}

τ : contrainte de cisaillement en N. m^{-2}

∇ : nabla, opérateur différentiel vectoriel

\hat{u} : énergie interne d'un système

c_v : capacité thermique à volume constant

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de notre cursus de STPI 2 au sein de l'INSA Rouen Normandie, nous devons, au quatrième semestre, effectuer un projet de recherche (EC P6). Ce projet, réalisé en groupe, consiste en un travail d'étude bibliographique, ainsi qu'en la réalisation d'expérimentations en atelier (ou laboratoire) ou directement sur machines (simulation numérique). Le but étant de répondre à une problématique précise dans un domaine tel que les mathématiques, la chimie, l'informatique ou encore la physique.

Notre groupe de 5 personnes, composé d'Hugo VERAN, Eva MERLE, Martin CHANU, Aurélien ZANINI et Peiyao LI s'est vu attribuer le sujet suivant : « *Mélange à flux multiphase dans une T-jonction* ». Il s'agit d'un projet portant sur la mécanique des fluides, assistée par ordinateur, autrement appelée CFD (Computational Fluid Dynamics). Ce domaine de la physique, branche de la mécanique des milieux continus, est consacré à l'étude du comportement des gaz et des liquides ^[1].

De nos jours, la mécanique des fluides est omniprésente autour de nous, et ses domaines d'application sont multiples. En effet, que ce soit pour les transports, les systèmes de ventilation ou encore le nucléaire par exemple, l'ingénieur se doit de pouvoir évaluer, expliquer et prédire le comportement des différents fluides concernés dans un environnement donné. Cela lui permet notamment d'être en mesure de dimensionner un équipement ou encore de créer des mécanismes.

Cependant, cette étude passe par la résolution d'équations régissant le fluide, qui se complexifient très vite dès lors que le problème n'est pas trivial. C'est la raison pour laquelle depuis la seconde partie du XXème siècle, l'Homme s'aide de plus en plus des outils informatiques dont il dispose afin de pouvoir résoudre des problèmes de plus en plus complexes : il s'agit de la mécanique des fluides numériques ^[2,3] (CFD). Aujourd'hui, cet outil est largement répandu dans le monde de l'ingénierie et de nombreux logiciels sont à disposition. Ils sont devenus quasiment indispensables grâce à leur fiabilité, performance et à leur bas coût d'utilisation en comparaison avec des expériences grandeur nature.

Dans cette optique, la résolution de notre problématique nous a permis de découvrir et d'apprendre à utiliser un logiciel de simulation numérique nommé Ansys Fluent.

Dans ce rapport, nous exposerons tout d'abord notre sujet et ses problématiques associées puis l'organisation que nous avons choisie. En second lieu, nous expliquerons nos recherches et nos résultats. Enfin, nous présenterons les perspectives et applications de ce projet.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Organisation du travail

L'évolution de notre projet a été encadrée par le professeur M.S. Shadloo. Lors de chaque séance hebdomadaire, M. Shadloo nous donnait des directives de travail. Nous avons ainsi consacré les premières séances de travail à l'introduction de la mécanique des fluides. En effet, n'ayant pas encore assisté à des cours de mécanique des fluides (dispensés en P8-2) durant notre formation, ce domaine de la mécanique nous était totalement inconnu. Sur les conseils de M. Shadloo, nous avons tous effectué des recherches très diverses sur ce domaine.

Nous avons concentré nos recherches sur des documentations Internet mais également sur l'ouvrage *Fluid Dynamics* de Frank M. White^[4]. L'ensemble de nos recherches était résumé sur un fichier Google Docs afin que chacun puisse y partager ses découvertes avec le reste du groupe. Au cours des semaines, le secteur des recherches se précisait de même que l'objectif final. En outre, après quelques semaines de recherches personnelles, M. Shadloo nous a fourni des vidéos explicatives regroupant des informations sur la mécanique des fluides et sur l'utilisation du logiciel Ansys Fluent.

Dans un deuxième temps, une fois les connaissances de base acquises, nous avons commencé notre apprentissage de la simulation numérique. Chaque semaine, nous devions effectuer un exercice de simulation sur un sujet différent pour s'entraîner à utiliser le logiciel. Bien qu'ayant essayé de travailler tous ensemble sur ces exercices d'entraînement, les simulations étaient souvent effectuées par Hugo, Martin et Eva. Dans le même temps, Aurélien et Peiyao continuaient les recherches sur la mécanique des fluides afin d'aborder plus facilement les simulations suivantes et d'analyser les résultats de celles-ci. Chaque membre du groupe avançait de même petit à petit le rapport de façon autonome grâce à Google Docs.

Quant à l'écriture du rapport, nous nous sommes mis d'accord sur le principe suivant : chaque membre rédige une ou plusieurs parties qu'il a bien comprises et étudiées lors des recherches avec un binôme qui a également choisi cette partie. Evidemment, nous avons fait en sorte que la répartition soit égalitaire. Les parties en lien avec l'organisation du travail, l'introduction et l'analyse des résultats ont été rédigées par l'ensemble du groupe en simultanément. La partie sur la simulation a été rédigée par les membres ayant réalisé la simulation, soit Martin, Hugo et Eva. De plus, Martin et Eva se sont chargés d'adapter le rapport en un diaporama en vue de la soutenance, et Eva s'est en outre occupée de réaliser l'affiche finale.

2.2. Difficultés rencontrées

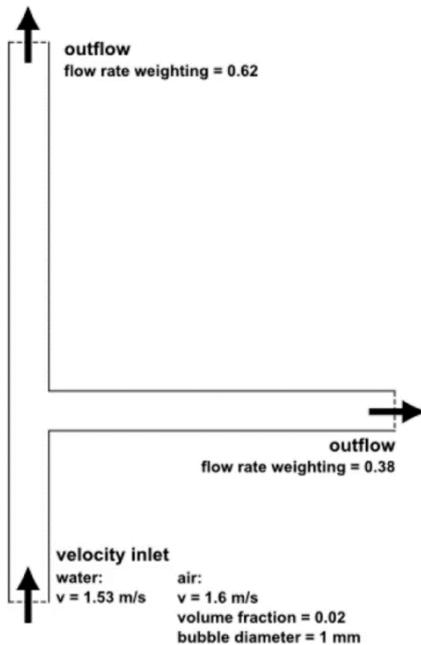
Evidemment, nous avons fait face à des difficultés qui nous ont retardés dans l'avancée du projet. Tout d'abord, la majeure partie de nos ressources (Internet, vidéos et *Fluid Dynamics*) étant en anglais, la barrière de la langue notamment sur le vocabulaire scientifique a freiné et altéré notre compréhension lors des recherches. De même, les entretiens avec le professeur Shadloo étaient en anglais. Ceci nous a tout de même permis d'approfondir notre niveau en anglais, et notamment dans le domaine particulier de notre sujet.

Un autre type de difficulté en lien avec les simulations est apparu lorsque nous avons commencé les entraînements. Il nous était impossible de télécharger le logiciel sur nos ordinateurs portables, ainsi nous étions obligés d'effectuer toutes les simulations sur les ordinateurs de l'INSA. Puis, des problèmes plus spécifiques avec les paramètres d'Ansys nous ont contraints à recommencer plusieurs fois un bon nombre des simulations demandées.

Dans ce contexte particulier de crise sanitaire, le principe de cours hybride en présentiel/distanciel a représenté un obstacle de plus à la création d'un groupe uni et à la communication entre les membres.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Description du problème



Notre problème consiste à étudier un écoulement multiphasique dans une jonction-T à une entrée et deux sorties.

Cet écoulement est constitué d'un mélange d'eau et d'air, entrant dans la T-jonction par le bas, et dont les paramètres en entrée et en sortie sont donnés sur la figure ci-contre (fraction volumique, vitesse d'entrée, débit de sortie).

On note que la fraction volumique d'air est très petite devant celle d'eau.

Notre but, à travers ce projet, est d'analyser le parcours du mélange dans le système et de repérer la position des bulles d'air.

Figure 1: schéma du problème initial

3.2. Mécanique des fluides théorique

Dès les premières séances avec notre professeur encadrant, nous avons réalisé que nous manquions de connaissances en mécanique des fluides. En effet, étant au début du semestre 4, nous n'avions encore reçu aucun enseignement sur ce sujet. Il était donc nécessaire de nous informer. Parmi toutes les informations que nous avons trouvées, nous avons décidé de vous exposer celles qui nous ont permis de comprendre et de réaliser notre projet. Tout d'abord, nous avons pris connaissance des caractéristiques de base à étudier lors de l'analyse d'un fluide. Puis nous avons étudié les équations qui régissent son mouvement. Enfin, il nous a fallu chercher les différentes méthodes de résolution numérique pour trouver le modèle adapté à notre problématique.

3.2.1. Caractéristiques de base d'un fluide

Selon Le Larousse ^[5], un fluide est "un corps dont les molécules ont peu d'adhésion et peuvent glisser librement les unes sur les autres (liquides) ou se déplacer indépendamment les unes des autres (gaz), de façon que le corps prenne la forme du vase qui le contient".

La principale différence entre un solide et un fluide est visible à l'échelle moléculaire. Dans un fluide, les molécules sont beaucoup plus espacées et libres que dans un solide. Les molécules d'un solide sont maintenues ensemble grâce à des forces de cohésion. Les forces intermoléculaires sont plus faibles dans un fluide.

Les propriétés de masse volumique et le poids spécifique sont des mesures de la "lourdeur" d'un fluide. Cependant cela n'est pas suffisant pour caractériser le comportement d'un fluide. On fait donc appel à une grandeur supplémentaire, la viscosité.

En réalité, la viscosité fonctionne à peu près comme les frottements d'un skieur. On peut la définir simplement comme un principe qui fait que le liquide a tendance à coller à la paroi du tube ou la tendance qu'ont les molécules à transmettre le mouvement de proche en proche. Par exemple, le miel a une viscosité plus importante que l'eau. On a la relation suivante :

$$\tau = \mu * \frac{du}{dy} \quad (eq.1)$$

Avec μ la viscosité en N.s/m² , τ la contrainte de cisaillement en N/m² , du/dy le taux de déformation de cisaillement

Nombre de Reynolds [6] :

Lorsqu'on observe un fluide en écoulement, un fleuve par exemple, on constate que plusieurs tourbillons peuvent se former lors de son écoulement. Ceci n'est pas le cas pour tous les fluides, l'écoulement de l'huile par exemple est complètement vierge de tourbillons. Cette agitation du fluide est appelée turbulence. Dans le cas contraire, si l'écoulement apparaît stable, on le qualifie de laminaire.

Le nombre de Reynolds caractérise la turbulence d'un fluide. Selon sa valeur, le fluide est qualifié de laminaire ou de turbulent. Plus il est important et plus l'inertie est importante et la viscosité faible et donc plus les tourbillons pourront se développer facilement. On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (eq.2)$$

Avec :

- v : la vitesse débitante du fluide en m.s⁻¹
- ρ : la masse volumique en kg.m⁻³
- D : diamètre en m
- μ : viscosité dynamique en kg / (m.s)

Dans le cas de notre projet, nous avons étudié un mélange de plusieurs fluides. Ce genre de système de flux multiphasique consiste en un certain nombre de régions monophasées délimitées par des interfaces communes mobiles. Pour de nombreux cas dans lesquels le phénomène d'écoulement est dominé par une phase devant d'autres insignifiantes petites phases, l'écoulement multiphasique est décrit comme un écoulement à une seule phase et les effets des autres phases sont négligés. Cependant, dans ce rapport, nous traiterons de cas où les phases secondaires ne peuvent pas être ignorées du fait de leur influence sur le comportement dynamique du mélange.

Une interface est une région étroite formant une frontière commune entre deux phases à ligne infinitésimale en 2D, ou à surface infinitésimale lorsque l'on est en 3D. Notre système ne possédant pas une interface importante visible, nous ne l'étudierons pas.

3.2.2. *Équations du mouvement : Navier-Stokes, continuité, quantité de mouvement*

Lorsqu'on cherche à déterminer le mouvement d'un fluide, deux options s'offrent à nous :

- Chercher une estimation des effets bruts (débit massique, force induite, variation d'énergie) dans un volume de contrôle

- Ou rechercher les détails point par point d'un modèle d'écoulement en analysant une région infinitésimale du flux

Dans cette partie, nous étudierons les relations différentielles au sein d'un écoulement fluide. Cela se traduit par l'application des quatre lois de conservation sur un petit volume de contrôle ou sur un système fluide infiniment petit. Dans les deux cas, le résultat donne les équations différentielles classiques de la mécanique des fluides. Il nous faut également appliquer des conditions aux limites appropriées.

Dans la grande majorité des cas, ces équations sont relativement compliquées à résoudre (d'autant plus à notre niveau), et on sait peu de choses sur leurs propriétés mathématiques générales. En revanche, il est possible d'en tirer de nombreuses conclusions très utiles.

3.2.2.1 Le champ d'accélération d'un fluide ^[4]

En mécanique des fluides, la variable la plus importante est le champ des vecteurs vitesse. Sa connaissance revient pratiquement à résoudre le problème fluide. On observe le fluide qui se déplace, et les coordonnées sont fixées dans l'espace : on utilise un référentiel Eulérien.

On définit $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$ et $w(x, y, z, t)$ comme étant respectivement $\frac{\partial x}{\partial t}$, $\frac{\partial y}{\partial t}$ et $\frac{\partial z}{\partial t}$. On peut donc définir $\mathbf{V}(x, y, z, t) = iu + jv + kw$

Afin d'écrire la deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ pour un système infinitésimal, il nous faut calculer le champ d'accélération \mathbf{a} du fluide :

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} = i \frac{du}{dt} + j \frac{dv}{dt} + k \frac{dw}{dt} \quad (eq. 3)$$

Afin de ne pas alourdir ce rapport davantage nous ne détaillerons pas les différents calculs permettant d'arriver à cette conclusion :

$$\mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \left(u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + z \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right) = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (eq. 4)$$

Le premier terme $\partial \mathbf{V} / \partial t$, est l'*accélération locale*, qui devient nulle lorsque l'écoulement est à l'état d'équilibre. Le second terme $(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V}$, est appelé *accélération convective* et augmente quand les particules se déplacent au travers de zones dans lesquelles la vitesse varie en fonction des coordonnées (par exemple dans une buse). C'est pourquoi même un système à l'équilibre peut avoir une accélération importante. Là où on trouve des effets convectifs dans les lois classiques prenant en compte la masse, la quantité de mouvement ou l'énergie, les équations différentielles deviennent non linéaires et sont plus compliquées que les écoulements qui n'impliquent pas de changements convectifs.

3.2.2.2 L'équation de conservation de la masse ^[4]

La conservation de la masse, aussi appelée *relation de continuité*, affirme que la masse du fluide est invariable dans le temps et dans l'espace :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (eq. 5)$$

Le premier terme représente la variation de la masse volumique du fluide au cours du temps, c'est-à-dire à quel point le fluide est comprimé. Le deuxième terme exprime la divergence de l'écoulement.

Le cas d'un fluide incompressible permet de grandement simplifier cette équation car les changements de densité sont négligeables et donc $\partial\rho/\partial t=0$. De même, ρ peut être écarté de la divergence et on a :

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (\text{eq.6})$$

3.2.2.3 L'équation de conservation de la quantité de mouvement ^[4]

$$\sum F = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} dx dy dz \quad (\text{eq.7})$$

Cette formule montre que les forces appliquées au volume de contrôle doivent être proportionnelles à ce volume. Ces forces peuvent être de deux types : les forces de volume, appliquées à l'ensemble du fluide, et dues à des champs extérieurs (gravitationnel, magnétique, potentiel électrique... mais on ne prendra ici en compte que la gravité de forme $d\mathbf{F}_{grav} = \rho \mathbf{g} dx dy dz$). Ainsi que les forces de surface σ_{ij} , créées par les contraintes sur les côtés du volume élémentaire. Ces contraintes sont la somme de la pression hydrostatique et des contraintes dues à la viscosité présentes lors d'un mouvement présentant un gradient de vitesse. Ces dernières sont écrites τ_{ij} (c.f. annexes, figure 9).

On peut donc utiliser le principe fondamental de la dynamique, en exprimant chaque force par unité de volume :

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (\text{eq.8})$$

3.2.2.4 L'équation d'Euler ^[4]

Malheureusement, cette équation ne peut être utilisée avant de connaître les contraintes dues à la viscosité du fluide. La façon la plus simple de remédier à ce problème est de supposer être en présence d'un fluide parfait, c'est-à-dire non visqueux et donc que son écoulement ne provoquera aucun cisaillement. On a alors :

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (\text{eq.9})$$

C'est l'équation d'Euler pour un fluide non visqueux. On peut noter qu'en intégrant cette formule le long d'une ligne de courant, on peut trouver l'équation de Bernoulli.

3.2.2.5 Les équations de Navier-Stokes ^[4,7]

Pour un fluide newtonien, les contraintes visqueuses sont proportionnelles aux taux de déformation des éléments et au coefficient de viscosité. Pour un écoulement incompressible, on aura donc une équation de la forme :

$$\rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \nabla p = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (\text{eq.10})$$

On peut la développer pour obtenir trois équations dérivée partielle du second ordre (c.f. annexe).

Associée à la conservation de la masse, on obtient les équations de Navier-stokes

La complexité inhérente de ces équations est responsable du fait que la preuve de l'existence et de la régularité de leurs solutions constitue l'un des problèmes du millénaire de l'Institut de mathématiques Clay.

3.2.2.6 L'équation de l'énergie^[4]

La relation déterminant l'énergie d'un système fluide dans un volume élémentaire fixé est :

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_v = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} e \rho dV \right) + \int_{CS} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \rho (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (eq. 11)$$

Encore une fois afin de ne pas alourdir ce texte, nous ne détaillerons pas les différentes étapes de calcul permettant de connaître la formule générale de l'équation de l'énergie :

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + \rho (\nabla \cdot \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (eq. 12)$$

3.2.2.7 Les conditions limites pour les équations de base^[4]

Il y a donc trois équations régissant le mouvement des fluides :

- La conservation de la masse : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$
- La conservation de la quantité de mouvement : $\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt}$
- L'équation de l'énergie $\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p (\nabla \cdot \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$

Φ (énergie perdue par frottements visqueux) ayant une forme connue, et la densité étant généralement variable, ces trois équations comportent cinq inconnues, ρ , \mathbf{V} , p , \hat{u} , et T . Nous utilisons donc deux relations supplémentaires pour compléter ce système (nous utilisons ici l'exemple d'un gaz parfait) : $\rho = \rho(p, T) = \frac{p}{RT}$ et $\hat{u} = \hat{u}(p, T) = \int c_v dT$. Ce système peut être résolu analytiquement ou numériquement, sous réserve de poser des conditions limites correctes.

Si l'écoulement n'est pas à l'état d'équilibre, il doit y avoir une condition initiale, ou bien une distribution spatiale initiale pour chaque variable. Ainsi, à $t=0$ chaque variable est une fonction de (x, y, z) connue. Afin de pouvoir analyser le système pour tout t , il nous faut des informations à propos des limites spatiales autour de l'écoulement. Les plus fréquentes en mécanique des fluides sont : un mur solide, les surfaces d'entrée et de sortie, ou une interface liquide-gaz. Pour un mur plein on a $V_{\text{fluide}} = V_{\text{wall}}$ et $T_{\text{fluide}} = T_{\text{wall}}$. Pour les surfaces d'entrée et de sortie, la pression, la vitesse et la température doivent être connues en tout temps (elles peuvent souvent être à $\pm\infty$). Enfin le cas d'une interface liquide-gaz, les calculs sont relativement longs et fastidieux, nous ne les détaillerons donc pas ici.

Ce qu'il faut retenir principalement, c'est qu'à chaque instant t , il nous faut résoudre les équations de Navier-Stokes, tout en prenant en compte les forces et flux appliqués aux limites de chaque volume élémentaire.

3.2.3. Méthodes de résolution numérique

La mécanique des fluides étudie le mouvement et le comportement de liquide ou de gaz dans des situations physiques précises. Comme expliqué auparavant, la résolution de problèmes de mécanique des fluides est souvent complexe ; c'est pourquoi on utilise des logiciels de simulation numérique^[2,3]. Plusieurs approches sont possibles ainsi que plusieurs méthodes pour ces études.

La compréhension des différentes méthodes de résolution nous a demandé beaucoup de travail. En effet, les nuances sont parfois très difficiles à cerner et plusieurs méthodes et approches se recoupent. Cependant, nous avons réussi à comprendre quelles méthodes nous devons utiliser au vu de notre sujet.

En premier lieu, l'étude d'un fluide peut être réalisée à l'aide de deux approches bien différentes. Ces deux approches sont des systèmes de référentiels qui associent des coordonnées pour décrire le mouvement du fluide. La première est appelée approche Lagrangienne et la seconde, approche Eulérienne.

D'après l'enseignement de P8-2, la description Lagrangienne consiste à suivre par la pensée le mouvement individuel de chaque élément de fluide, assimilé à une particule. Autrement dit, il s'agit du suivi d'une particule le long de sa trajectoire au cours du temps, repérée par ses coordonnées cartésiennes (notion de vitesse et d'accélération). Le référentiel varie donc au cours du temps et suit le mouvement de la particule. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle s'adapte peu à l'expression des conditions limites sur un obstacle.

La description Eulérienne, quant à elle, repose sur la connaissance de l'évolution au cours du temps de grandeurs macroscopiques locales telles que la masse volumique, la température, la vitesse, la pression en chaque point de l'espace. On décrit l'interface via un champ vectoriel associant à chaque point un vecteur vitesse (lignes de courant). L'idée n'est pas de représenter la trajectoire de la particule, mais plutôt de connaître en chaque instant la vitesse des différentes particules qui au cours du temps vont passer par ce point. Ici, la vitesse est donc représentée comme une fonction de 4 variables, (3 espaces + temps). Le référentiel est immobile et ne varie pas au cours du temps.

Pour illustrer la différence entre ces deux approches, on peut associer la description lagrangienne à l'étude d'une particule sur laquelle on serait fixé, et la description Eulérienne à un cube dans lequel on étudie les caractéristiques du fluide à l'instant donné.

Une fois la description choisie, reste à déterminer la méthode de résolution numérique. Encore une fois de nombreuses possibilités s'offrent à nous. Cependant ici, nous ne décrivons que les méthodes utiles pour l'étude d'un flux multiphasique.

Mais avant cela, il faut définir les deux grands types d'interactions de phases fluides possibles :

- Continue-continue : il s'agit d'une interaction où deux phases distinctes et immiscibles forment une interface "visible", assez conséquente entre elles. Dans ce cas, on s'intéresse davantage à la localisation et au mouvement de ladite interface.
- Dispersée-continue : la phase dispersée peut être composée de particules (solide), de gouttes (liquide) ou de bulles (gaz), dont le diamètre est de l'ordre du micromètre au millimètre (très petit). Cette phase dispersée est dissoute dans la phase continue. L'interface n'est alors pas étudiée.

Voici maintenant les grands groupes de méthodes de résolution numérique qui nous ont été présentés durant notre projet :

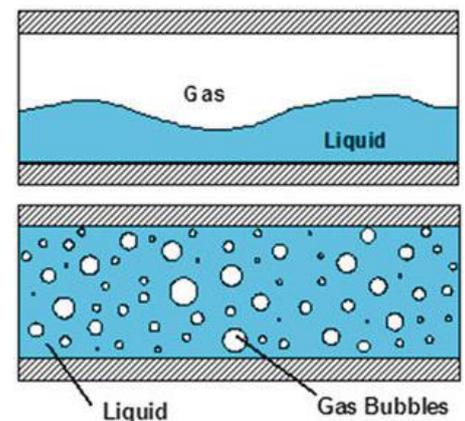


Figure 2 : types d'interaction des phases ^[8]

Méthodes Euler-Lagrange

D'une part, on trouve les méthodes Euler - Lagrange, qui étudient le mouvement de la phase dispersée et de la phase fluide continue avec deux approches différentes afin de modéliser de façon globale le comportement du système. En effet, le principe de cette méthode est d'étudier la phase dispersée (les particules) selon une approche Lagrangienne et la phase

continue (le fluide) selon l'approche Eulérienne. Ce type de méthode est très précis mais également très compliqué à utiliser. Elles ne sont utilisables que lorsque la quantité de la phase dispersée est très inférieure à la quantité du fluide continu.

Notre système est composé d'eau qui constitue le fluide le plus important et de particules d'air en infériorité. La logique la plus simple était d'employer la description Eulérienne pour la phase composée d'eau et la description Lagrangienne pour les particules d'air. Cependant, le logiciel Ansys Fluent mis à notre disposition utilise uniquement les méthodes Euler-Euler pour des raisons de rapidité et de simplicité de calcul. Nous avons donc utilisé des méthodes Euler-Euler pour notre résolution.

Méthodes Euler - Euler

Les méthodes dites d'Euler-Euler, quant à elles, considèrent les différentes phases du système comme des continus interpénétrants. Les deux phases sont suivies ensemble grâce à une approche eulérienne et non individuellement.

Lors de l'utilisation d'un maillage, chaque case est étudiée et des équations sont résolues en fonction de la composition de la case. Une équation d'Euler est résolue pour une phase gazeuse et les équations de Navier Stokes sont résolues pour une phase liquide.

Puisque le volume d'une phase ne peut pas être occupé par les autres phases, le concept de fraction de volumephasique est ainsi introduit. De plus, un lien est effectué avec les cases alentours afin de prendre en compte leur influence et étudier l'évolution du système. Le couplage avec les autres cases est réalisé par les coefficients d'échange de pression et d'interphase.

Ces méthodes Euler-Euler comprennent plusieurs modèles tels que le modèle VOF, Level-Set, Eulérien ou encore le modèle de mélange ^[9,11].

Pour toutes ces méthodes, une équation de transport, équivalente à l'équation de continuité (conservation de la masse), est résolue pour chaque phase secondaire afin de suivre l'interface dans son mouvement. Autrement dit, on résout q-1 équations

Cette équation est multipliée par la fraction volumique (notée r_q) de la phase concernée q. La fraction volumique s'apparente à une fonction discrète qui indique le « taux de présence » d'un des fluides dans chaque volume de contrôle, c'est-à-dire dans chaque case. Cette fonction r_q varie donc entre 0 et 1 pour le fluide considéré de cette manière :

- 0 si le volume de contrôle ne contient pas le fluide considéré
- 1 si le volume de contrôle ne contient que le fluide considéré
- $0 < r_q < 1$ si le volume de contrôle contient un mélange diphasique (interface présente)

La somme des fractions de volume est donc égale à 1 (c.f. annexes, figure 11)

Pour les interactions de phase dispersée-continue, la fraction volumique peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1. Concernant les interactions de phase continue-continue, la fraction volumique est limitée aux valeurs 0 ou 1 (sauf dans la région de l'interface).

La fonction taux de présence est alors advectée par le champ de vitesse locale U_q , ce qui donne, pour l'équation de transport :

$$\frac{\delta r_q \rho_q}{\delta t} + \nabla \cdot (r_q \rho_q U_q) = 0 \quad (eq. 13)$$

De plus, des équations distinctes de l'énergie et de la quantité de mouvement sont résolues pour chaque phase. Ainsi, on a un champ de vitesse différent pour chaque phase au barycentre de la cellule. Cette différence de vitesse est due à plusieurs forces d'interphases, dont la traînée, qui est le mécanisme prédominant de transfert de quantité de mouvement.

La phase primaire se déplace à la vitesse U_q et la phase secondaire, à la vitesse U_p .

La force de traînée s'exerçant sur la phase primaire par unité de volume est :

$$D_{pq} = \frac{1}{2} \rho_q C_D \left(\frac{A_p}{V} \right) (U_p - U_q) |U_p - U_q| \quad (eq. 14)$$

Avec C_D le coefficient de traînée et A_p la surface interfaciale.

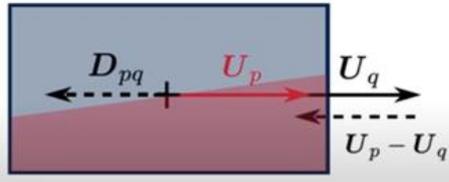


Figure 3 : Illustration de la force de traînée pour une interaction de phases continue-continue [9]

Le modèle de traînée le plus employé et celui que nous utilisons pour notre simulation est celui de Schiller-Naumann. Ce modèle est utilisé pour modéliser la traînée entre différentes phases fluides dans un mélange multiphasique.

Comme précisé auparavant, il existe plusieurs modèles de résolution numérique dans l'approche Euler-Euler : eulérien "complet", VOF et mélange.

En réalité, les modèles VOF et de mélange sont des versions simplifiées du modèle eulérien "complet". Le modèle de mélange est utilisé pour les interactions de phases dispersées-continues, et la méthode VOF sera préférée pour les interactions de phases continues-continues. Dans notre cas, étant en présence d'un système de phases dispersées-continues, nous utilisons donc le modèle de mélange.

Concernant notre problème, à savoir le flux multiphasique dans la T-jonction, le professeur nous a demandé de le résoudre avec le modèle de mélange, puis avec le modèle eulérien afin de comparer les résultats fournis par ces différentes méthodes.

Le modèle Eulérien (complet) [11]

Le modèle eulérien complet est le plus complexe des modèles de résolution multiphasiques d'Ansys Fluent. Il résout autant d'ensemble d'équations de quantité de mouvement et de continuité qu'il y a de phase dans le système. Avec le modèle eulérien, un nombre illimité de phases secondaires peuvent être modélisées, à condition qu'une mémoire suffisante soit disponible. Cependant, la solution est limitée par le comportement de convergence. Cette méthode est la plus précise mais demande beaucoup plus de calculs numériques et de ressources informatiques. Les applications sont les colonnes à bulles, la suspension de particules, les lits fluidisés, etc.

Le modèle de mélange [11]

Comme précisé auparavant, le modèle de mélange est un modèle multiphasique simplifié qui peut être utilisé dans différents cas. Le principe de ce modèle repose sur le fait de pouvoir modéliser les n phases d'un système en résolvant un unique ensemble d'équations de quantité de mouvement, de continuité et d'énergie pour le mélange entier. Ces équations sont moyennées, et les équations de fraction volumique, quant à elles, sont résolues pour les phases secondaires. Enfin, si les phases bougent à des vitesses différentes, des expressions algébriques sont utilisées pour les vitesses relatives.

Enfin, le modèle de mélange est un bon substitut pour le modèle eulérien dans certains cas. Ce modèle est souvent utilisé lorsque l'interface n'est pas très importante c'est-à-dire qu'il y a une large distribution de la phase dispersée ou que l'on n'arrive pas à la caractériser (lois d'interphase inconnues ou peu fiables). Le modèle de mélange mène aux mêmes résultats que le modèle eulérien complet en résolvant un plus petit nombre de variables que ce qu'aurait fait le modèle eulérien. En effet, ce modèle est très économe et demande peu de

calculs numériques, mais apparaît par conséquent comme moins précis. Les applications sont la sédimentation, les flux de bulles où la fraction volumique de gaz est basse, etc.

Ainsi, nous venons de survoler une partie de ce que le logiciel de simulation numérique va devoir réaliser pour résoudre le problème posé, à savoir, la résolution d'ensemble d'équations pour chaque phase (quantité de mouvement, énergie, ...), des calculs de forces, de fractions volumiques, etc...

Bien d'autres paramètres et équations entrent en jeu dans le processus, mais il serait bien trop long et complexe de tout citer.

3.3. Simulation numérique

3.3.1. *Résolution du problème (étapes, réglages à faire, options à entrer ou choisir, exécution du calcul)*

La résolution de ce type de problème est réalisable par simulation numérique. En raison du nombre très élevé de calculs et de la complexité de ceux-ci, nous avons donc été amenés à utiliser et découvrir un nouveau logiciel nommé ANSYS fluent. A titre d'entraînement, nous avons réalisé quelques simulations avant de résoudre notre problème de départ.

La mécanique des fluides numérique, ou computational fluid dynamics en anglais (CFD), a pour but d'étudier numériquement, c'est-à-dire à l'aide de logiciels de simulation, les mouvements des fluides ^[2]. Cela repose sur la résolution numérique des équations décrivant ces fluides (équations de Navier-Stokes, équation d'Euler, ...).

Aujourd'hui, cet outil est largement répandu dans le monde de l'ingénierie ^[3] : aéronautique, automobile, aérospatial, météorologie, machineries...

Dans le domaine de la recherche ou de la conception, il permet notamment de pouvoir tester et modéliser les phénomènes recherchés sans avoir besoin de faire des expériences physiques réelles. Ainsi, le développement est réalisé à moindre coût et plus rapidement. (Cette approche permet d'avoir accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, ...) pour chaque point du domaine de calcul).

Le processus de simulation numérique repose sur les 4 étapes suivantes :

- L'identification du problème : lecture de l'énoncé, détermination des paramètres et modèles mathématiques en fonction du type d'écoulement, des obstacles, de l'interface, du nombre de phases, etc.
- La modélisation : définition d'une géométrie, discrétisation de l'espace (domaine de calcul) par un maillage, choix des modèles et méthodes utilisés, discrétisation du temps, ...
- La simulation à proprement parler, c'est-à-dire la résolution numérique grâce au logiciel utilisé
- L'exploitation des résultats : on analyse les résultats et on en tire des conclusions (validation du modèle, ajustements), en vérifiant leur cohérence.

Concernant notre projet, nous devons résoudre le système en régime permanent (état stationnaire), en utilisant dans un premier temps une géométrie 2D planaire. Ensuite, nous avons réitéré l'expérience avec cette fois-ci une géométrie 3D, en résolvant de plus ce système en régime transitoire. L'intérêt de faire une simulation de l'état transitoire est de déterminer s'il est possible d'utiliser directement l'état permanent, ou si ce temps transitoire influe de façon non négligeable sur la simulation. Sur le logiciel Ansys Fluent, le régime permanent correspond à l'option "Steady State", et l'état transitoire se trouve sous la dénomination "Transient".

D'autre part, le problème devait être résolu à l'aide de deux approches multi phases différentes, afin de les comparer entre elles. Premièrement, par le modèle de mélange multiphase, puis par le modèle multiphase eulérien.

Ansys

Avant de conclure notre projet, il nous a fallu réaliser plusieurs simulations préliminaires afin de nous habituer à l'utilisation d'un logiciel aussi complet qu'Ansys. Nous avons d'abord simplement modélisé un transfert de chaleur, puis un écoulement d'eau à différentes températures dans une pièce coudée.

Après cette phase de prise en main, nous avons commencé l'étude d'un mélange multiphase dans une t-jonction en tant que problème plan. Une fois ceci fait, nous sommes passés à un problème en trois dimensions. Pour cela, il a d'abord fallu modéliser la jonction à l'aide du DesignModeler d'Ansys.

La deuxième étape consiste en la création du maillage nécessaire au logiciel pour réaliser la simulation. C'est à ce moment que nous déterminons les points d'entrée et de sortie du mélange.

Enfin, lors de la configuration nous pouvons choisir la méthode utilisée (ici mixture/eulerian), la composition de chaque phase, le modèle de viscosité, et l'interaction entre les deux phases. Ici, on affecte comme phase primaire l'eau, car elle a la plus grande fraction volumique, et comme phase secondaire l'air, dont les bulles ont un diamètre de 0,001m.

Concernant les interactions entre les phases, nous précisons au logiciel que nous voulons utiliser la loi de Schiller-Naumann, qui décrit la traînée entre la particule sphérique et le fluide. Enfin, nous changeons quelques paramètres de contrôle du programme. C'est aussi à ce moment que nous déterminons si la simulation se fera en régime permanent ou transitoire.

Dans le second cas, il nous faut choisir la durée de chaque time-step ainsi que leur nombre et donc la durée totale de simulation. Il ne reste donc plus qu'à définir les conditions limites dans l'espace. Les murs, tout comme l'intérieur du domaine sont automatiquement définis par Ansys à l'aide du maillage réalisé. Les dernières conditions sont l'entrée du mélange ainsi que la vitesse de chaque phase, la fraction volumique de l'air, l'intensité des turbulences et le diamètre hydraulique.

Une fois tout ceci fait, il ne reste plus qu'à initialiser, puis à lancer le calcul de la simulation.

Lorsque celle-ci est terminée, on obtient un récapitulatif des convergences de différents paramètres, dont par exemple la masse permettant de vérifier que la simulation a grossièrement réussi (en effet ceci ne prouve pas que tout est exact, on constate juste qu'au premier abord ces paramètres sont corrects). On dispose également d'un affichage de plusieurs réglages (contours de pression, vitesse, turbulences, fraction de volume) directement sur le modèle de la jonction. A partir de ces contours, nous pouvons étudier les divergences dans différents plans de la jonction, en fonction de la méthode utilisée.

3.3.2. *Interprétation, analyse des résultats*

Régime permanent

La différence la plus notable dépend du plan dans lequel on étudie l'écoulement. En effet, au milieu de la jonction on remarque une similarité avec la simulation en 2D réalisée quelques semaines auparavant, alors que dans le plan le plus proche du bord on a plus de turbulences qui entravent le déplacement des bulles d'air dans le canal (*c.f. annexes, figures 12, 13, 14 et 15*). On constate également que dans notre cas la méthode utilisée influe très

peu sur le résultat de la simulation puisque qu'on peut voir que les contours sont sensiblement les mêmes. Ainsi la méthode la plus adaptée à notre problème est celle du mélange car moins gourmande en performances et plus rapide.

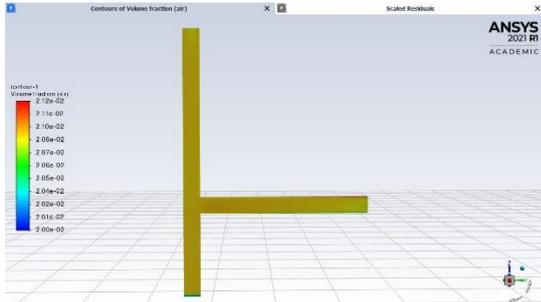


Figure 4 : Contour de la fraction du volume d'air, plan milieu, méthode de mélange

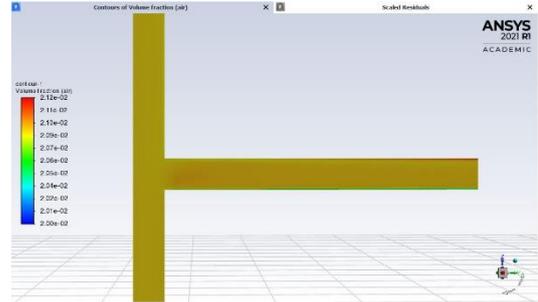


Figure 5 : Contour de la fraction du volume d'air, plan milieu, méthode eulérienne

Régime transitoire

On constate la même légère divergence entre le milieu et le bord de la jonction, mais qui semble néanmoins négligeable. Encore une fois, la différence entre les deux méthodes n'est pas discernable à l'œil nu. Dans le cas du régime transitoire, la méthode de mélange est à privilégier de par son efficacité.

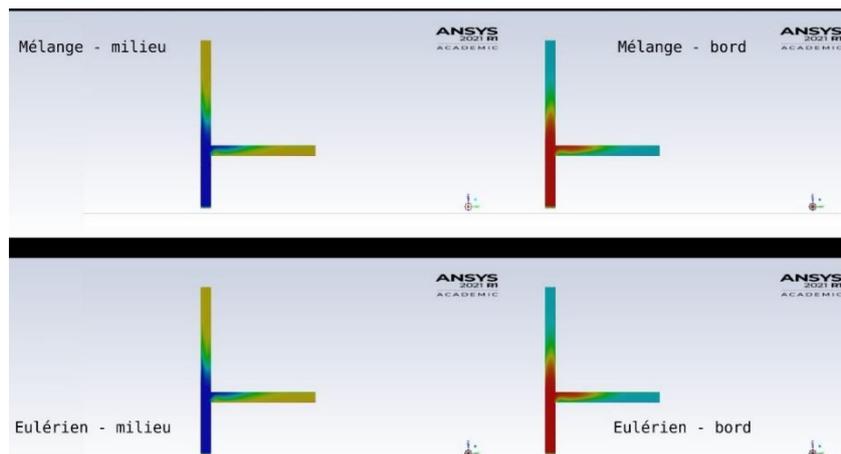


Figure 6 : Comparaison des méthodes sur les plans milieu et bord en état transitoire

Enfin on constate que la simulation n'évolue plus ou très peu après 19 images, capturées à 0,05s d'intervalle. Ainsi on peut considérer le système comme étant permanent au bout d'une seconde. L'utilisation d'un régime transitoire n'est donc pas tellement utile car la durée de l'étude est grande devant le temps caractéristique.

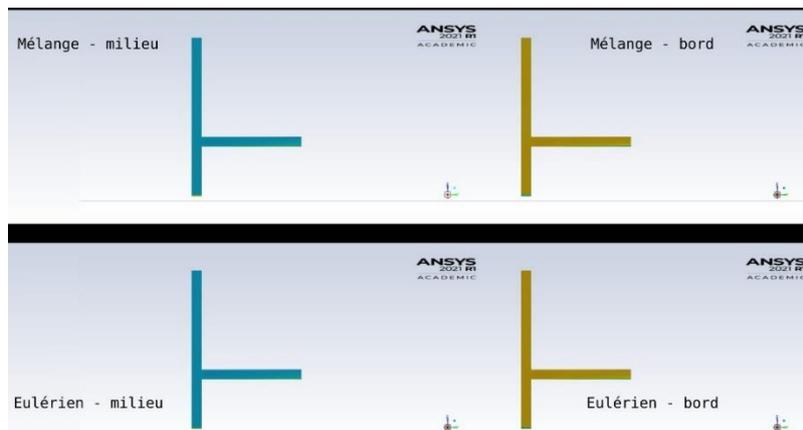


Figure 7 : Comparaison des méthodes sur les plans milieu et bord en état transitoire après une seconde

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Différentes applications, au quotidien, de notre système sont envisageables. Tout d'abord un système de T-Jonction parcouru en majeure partie par de l'eau est un élément classique dans les systèmes de tuyauterie pour le chauffage ou l'apport d'eau courante. Les résultats obtenus peuvent être pris en compte dans l'étude d'un système de chauffe-eau par exemple ou l'on voudrait connaître la position de bulles d'air dans le système.

Les T-jonctions sont des équipements classiques dans le domaine de la mécanique des fluides et sont souvent étudiées. Il existe par exemple, une T-Jonction un peu particulière, nommée tube de Ranque-Hilsch ^[12] (c.f. annexes, figure 10). L'une de ses extrémités de sortie est bouchée au centre, afin de forcer le fluide à sortir en suivant le bord du tube, et l'autre, ouverte uniquement au centre, pour forcer le fluide à sortir au centre du tube. Alimenté par de l'air comprimé, cet outil permet de séparer le fluide à température moyenne en un fluide chaud d'une part et en un fluide froid d'autre part. Plusieurs recherches sont en cours sur ce sujet qui paraît, bien que trop complexe pour nos connaissances, très intéressant comme perspective de continuation de nos recherches.

Dans un premier temps, sur le plan intellectuel, ce projet de recherche et de simulation nous a permis d'approfondir nos connaissances en mécanique des fluides mais également de développer notre intérêt pour ce domaine. De plus, sa réalisation a été déterminante dans la validation de nos choix d'orientation. En effet, plusieurs membres du groupe se questionnaient sur la formation de spécialité Energétique et Propulsion et ce sujet est en lien direct avec les enseignements dispensés dans cette spécialité, il a donc en partie permis de confirmer ou non leur choix.

D'autre part, nous avons appris à utiliser un nouveau logiciel de simulation dont l'utilisation pourrait se révéler utile au cours de nos prochaines années de formation mais également lorsque nous exercerons notre fonction d'ingénieur. De plus, nécessitant un important travail de recherche, cet enseignement a exercé notre faculté à étudier des textes scientifiques, à réaliser des expérimentations et à analyser des résultats, donc, à suivre une démarche scientifique complète. Ceci a donné lieu à une nouvelle approche de l'apprentissage chez nous.

Sur le plan humain, ce travail, réalisé en groupe, nous a obligés à apprendre à communiquer dans des langues différentes et par des canaux multiples. Cet aspect de l'organisation du projet a notamment été complexifié pendant cette période de crise sanitaire. A travers tous ces points, auxquels on peut ajouter la répartition du travail et la méthodologie adoptées, chaque membre du groupe a enrichi son expérience dans le management d'une équipe qui semble aujourd'hui une nécessité pour le métier d'ingénieur.

Nous tenons à remercier Monsieur Shadloo pour son encadrement tout au long du projet mais également Monsieur Yon, nous ayant apporté une aide sur le plan théorique.

5. BIBLIOGRAPHIE

(Certaines des références suivantes n'ont pas directement servies à la rédaction du rapport, mais plutôt à la compréhension globale du sujet. Ainsi, elles ne sont pas citées dans le rapport).

- [1] *Mécanique des Fluides* [en ligne]. Wikipédia. Octobre 2022, Juin 2021. Disponible sur : [Mécanique des fluides — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides) (valable à la date du 03/03/2021)
- [2] *Mécanique des Fluides Numérique* [en ligne]. Wikipédia. Décembre 2009, Mars 2021. Disponible sur : [Mécanique des fluides numérique — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides_num%C3%A9rique) (valable à la date du 25/03/2021)
- [3] Mécanique des fluides numérique (CFD) [en ligne]. Disponible sur : [Mécanique des fluides numérique \(CFD\) \(mscsoftware.com\)](https://www.mscsoftware.com/fr/m%C3%A9canique-des-fluides-num%C3%A9rique-cfd) (valable à la date du 15/05/2021)
- [4] Frank WHITE : *Fluid Mechanics* [Livre] Edition McGraw-Hill, 2011. Bibliothèque Universitaire de l'INSA de Rouen, (consulté le 10/02/2021)
- [5] *définition « fluide »* [en ligne]. Larousse. Disponible sur : [Définitions : fluide - Dictionnaire de français Larousse](https://www.larousse.fr/dictionnaires/fran%C3%A7ais/fluide) (valable à la date du 5/06/2021)
- [6] *Nombre de Reynolds* [en ligne]. Wikipédia. Novembre 2003, Mai 2021. Disponible sur : [Nombre de Reynolds — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds) (valable à la date du 10/04/2021)
- [7] *But How Do Fluid Simulations Work ?* [vidéo en ligne]. Décembre 2020. Disponible sur : [But How DO Fluid Simulations Work? - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=...) (valable à la date du 5/06/2021)
- [8] *Numerical Methods for Dispersed Multiphase Flows* [en ligne]. Juillet 2017. Disponible sur : [\(PDF\) Numerical Methods for Dispersed Multiphase Flows \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/317111111) (valable à la date du 5/06/2021)
- [9] *[CFD] Eulerian Multi-Phase Modelling* [vidéo en ligne]. Mai 2019. Disponible sur : [\[CFD\] Eulerian Multi-Phase Modelling - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=...) (valable à la date du 5/06/2021)
- [10] *Le couplage de la méthode Level-Set et VOF* [en ligne]. Disponible sur : [Le couplage de la méthode Level-Set et VOF \(CLSVOF\) \(enseeiht.fr\)](https://www.enseeiht.fr/le-couplage-de-la-methode-level-set-et-voe) (valable à la date du 7/04/2021)
- [11] *Ansys Fluent 12.0 Theory Guide* [en ligne]. Janvier 2009. Disponible sur : [ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 16.2.1 Approaches to Multiphase Modeling \(enea.it\)](https://www.enea.it/ansys-fluent-12-0-theory-guide-16-2-1-approaches-to-multiphase-modeling) (valable à la date du 5/06/2021)
- [12] *Tube de Ranque-Hilsch* [en ligne]. Wikipédia. Mai 2005, Mai 2021. Disponible sur : [Tube de Ranque-Hilsch — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tube_de_Ranque-Hilsch) (valable à la date du 05/06/2021)
- [13] *Interface-tracking and interface-capturing techniques for finite element computation of moving boundaries and interfaces in Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [en ligne]. Science Direct. Tayfun E.TEZDUYAR. Avril 2006. Disponible sur : [Interface-tracking and interface-capturing techniques for finite element computation of moving boundaries and interfaces - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782506001111) (valable à la date du 27/02/2021)
- [14] *Cours de mécanique des fluides* [en ligne]. Jean-François SINI. 2008. Disponible sur : [Cours de Mécanique des Fluides \(archives-ouvertes.fr\)](https://www.archives-ouvertes.fr/jean-francois-sini) (valable à la date du 6/02/2021)
- [15] *Qu'est-ce que la pression ?* [en ligne]. Khan Academy. Disponible sur : [Qu'est-ce que la pression ? \(leçon\) | Khan Academy](https://www.khanacademy.com/fr/la-pression/a/lecon-1) (valable à la date du 3/02/2021)
- [16] *Le principe d'Archimède* [vidéo en ligne]. Mars 2014. Clipedia. Disponible sur : [Le principe d'Archimède - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=...) (valable à la date du 19/03/2021)
- [17] *Interface-capturing methods for two-phase flows : An overview and recent developments* [en ligne]. S. MIRJALILI, S. S. JAIN and M. S. DODD. 2017. Disponible sur : [09 Dodd 117 135.pdf \(stanford.edu\)](https://stanford.edu/~maddalena/papers/09_Dodd_117_135.pdf) (valable à la date du 2/05/2021)

6. ANNEXES

6.1. Documentation technique

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned}$$

Figure 8 : Equation de Navier-Stokes développée

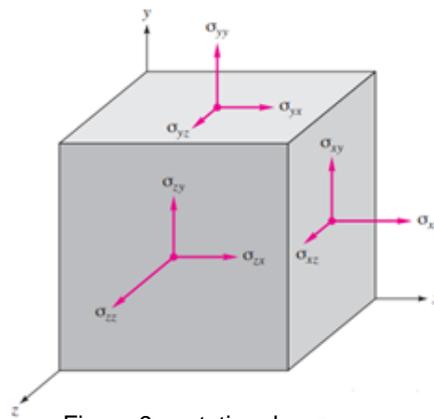


Figure 9 : notation des σ



Figure 10 : Tube de Ranque-Hilsch

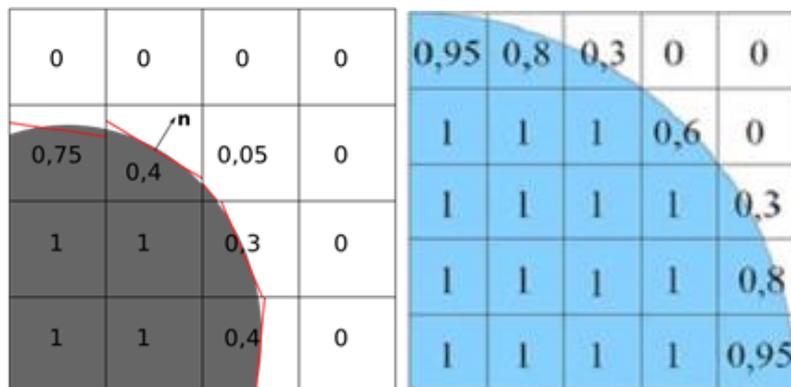


Figure 11 : exemple du taux de présence dans un maillage pour un système de phases continue-continue^[10]

6.2. Schémas de montages, plans de conception...

Dans l'étude des prochains contours, nous nous concentrerons sur la méthode de mélange car ceux obtenus par la méthode eulérienne sont sensiblement les mêmes.

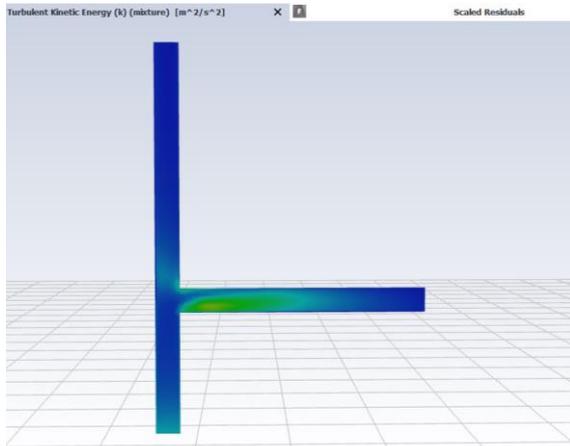


Figure 13 : Energie cinétique des turbulences, plan bord

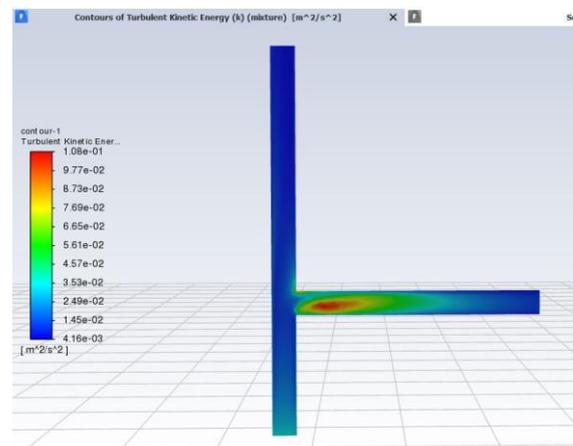


Figure 12 : Energie cinétique des turbulences, plan milieu

Les contours ci-dessous sont ceux pour lesquels la différence entre le milieu et le bord de la jonction sont les plus flagrantes. En effet, sur le bord les turbulences sont atténuées par la présence de la paroi, alors qu'elles peuvent se créer librement au milieu.

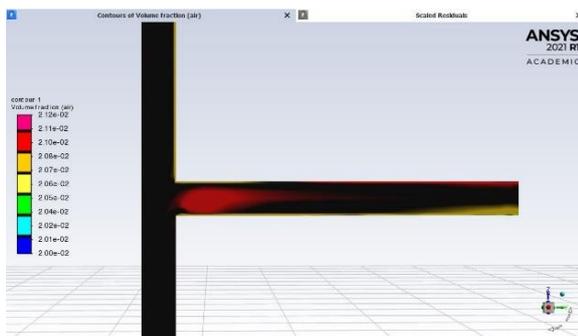


Figure 14 : Fraction de volume d'air, plan bord

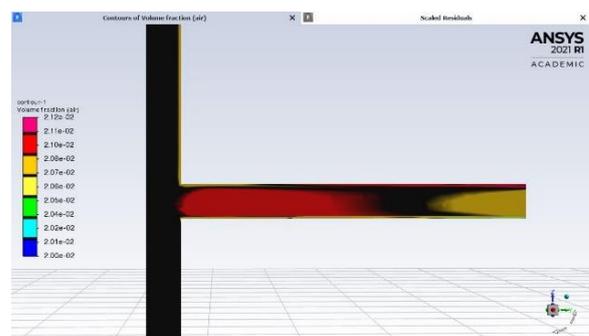


Figure 15 : Fraction de volume d'air, plan milieu

Les images obtenues par défaut étant peu lisibles, nous avons choisi une autre échelle de couleurs, plus radicale afin d'avoir une idée de la différence entre les deux plans. On remarque que les zones où l'air est le plus concentré se trouvent là où l'on trouve les turbulences les plus importantes, probablement car celles-ci l'empêchent de se propager et le confinent à cet endroit. De fait, si on souhaitait éviter ces turbulences et donc avoir une meilleure propagation de l'air, on pourrait utiliser un tube doté de congés.