

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTER DE L'ESEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MENTOURI- CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

Présenté Pour L'obtention du Diplôme de Magister

Par

Bensouici Moumtez

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES
ÉCOULEMENTS DANS UN
RÉACTEUR MÉTALLURGIQUE À**

Directeur de la thèse : Talbi. k

Constantine:.....2007

NOMENCLATURE

$C(t)$:	Concentration du traceur en sortie à l'instant « t » (Kg / m^3).
C_0 :	Concentration initiale supposée répartie dans tout le volume (Kg / m^3).
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$:	Constantes.
C :	Concentration du traceur (Kg / m^3).
C_θ :	Concentration adimensionnelle.
$Deff$:	Diffusivité longitudinale effective. (m^2 / s)
D :	Diffusivité du traceur (m^2 / s).
$E(t)$:	Distribution des temps de séjour (s^{-1}).
G_k :	Terme de production de l'énergie cinétique turbulente.
g :	Accélération de la pesanteur (m / s^2).
k :	Energie cinétique turbulente (m^2 / s^2).
M :	Masse totale du traceur (kg).
P :	Pression. (Pa).
Q :	Débit volumique total du fluide (m^3/s).
Q_a :	Débit volumique dans le volume active (m^3/s).
Q_m :	Débit volumique dans le volume mort (m^3/s).
R :	Critère de convergence
Sct :	Nombre de Schmidt turbulent.
t :	Variable de temps (s).
t_{th} :	Temps théorique (s).
\bar{t} :	Temps de séjour moyen (s).
t_{min} :	Temps de débit de réponse sortie (s).
t_{max} :	Temps ou la concentration atteint son maximum (s).

V_{dp}/V :	Fraction du volume piston dispersé (%).
V_p/V :	Fraction du volume piston (%).
V_m/V :	Fraction du volume mort (%).
V_a/V :	Fraction du volume active.
$V_{mél}/V$:	Fraction du volume mélangé.
V :	Volume du répartiteur (m^3).
U_i :	Composante de vitesse moyenne suivant la direction (m/s).
u_i' :	Composante de vitesse fluctuante suivant la direction (m/s).
X_i :	Coordonnées.

Lettres grecques :

α :	Age interne de la molécule (s).
δ :	Kronecker delta.
ε :	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^3).
λ :	Espérance de vie de la molécule (s)
μ :	Viscosité dynamique ($kg/m\ s$).
μ_n :	Le moment d'ordre n de la DTS.
μ_t :	Viscosité dynamique turbulente (kg/ms).
θ :	Temps adimensionnel.
θ_{max} :	Temps maximum adimensionnel.
θ_{min} :	Temps minimum adimensionnel.
θ_c :	Temps de séjour moyen adimensionnel.
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$:	Nombre de Prandtl associées à k et ε .

INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :

Tous les aciers contiennent des inclusions non métalliques qu'on peut définir comme des composés stables formés ou entraînés dans l'acier avant la fin de sa solidification. Dans la plupart des cas, ces inclusions sont néfastes de sorte qu'on essaie par tous les moyens d'en limiter le nombre le maximum possible.

Parmi les moyens mis en œuvre pour améliorer la propreté inclusionnaire des aciers coulés en continue figure le piégeage des inclusions dans le panier répartiteur.

Considéré au départ comme un simple réservoir tampon chargé d'assurer une alimentation régulière et continue des lignes de coulée situées en aval, le répartiteur est devenu au fil du temps un réacteur métallurgique à part entière qui doit permettre à l'aciériste de produire un acier propre.

Cette nouvelle fonction implique que le répartiteur soit conçu de manière tel qu'il facilite la décantation des inclusions et leur piégeage dans la couche de laitier, donc une connaissance parfaite du comportement de l'écoulement de l'acier liquide dans ce réacteur est devenue essentielle et importante.

Différents travaux expérimentaux et numériques ont été menés pour caractériser le comportement de l'écoulement de l'acier liquide dans le répartiteur de coulée continue. Les travaux expérimentaux sont réalisés généralement par l'étude de l'écoulement de l'eau liquide sur des répartiteurs type modèle (maquette) par contre les travaux numériques sont faites par l'utilisation de différents codes de calcul : FORTRAN, PHOENIX, FLUENT.

2. Etude bibliographique :

1- **Lifeng Zhang (2005)** a fait une simulation numérique de l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur de coulée continue type modèle de géométrie parallélépipédique utilisant le modèle « K- ϵ ». Il a validé les résultats expérimentaux publiés par Lee et al (1990).

Le but de sa recherche est d'étudier les effets des résidus et de la taille moyenne de la cellule du maillage sur l'exactitude des résultats, il a conclu que :

- Les résidus doivent être inférieurs à 10^{-4} .

Et

- La taille de la cellule moyenne doit être inférieure à 30 mm.

La taille moyenne de la cellule est calculée par la formule suivante :

$$l_c = 1000 \left(\frac{V}{N_c} \right)^{\frac{1}{3}}$$

D'où l_c : La taille moyenne de la cellule.

V : Volume du domaine.

N_c : Nombre de cellules.

2- **G.Solorio .Diaz et al (2005)** ont fait une simulation numérique (code fluent) et expérimentale de l'écoulement de l'acier liquide en se basant sur l'analyse des courbes de « DTS ». ils ont travaillé sur deux répartiteurs type modèle, l'un avec un tube submergé simple et conventionnel (LS : ladle shroud) et l'autre avec un tube submergé tourbillonnant (SLS : swirling ladle shroud).

Ils ont utilisé trois modèles de turbulence : K- ϵ , RSM, K- ω .

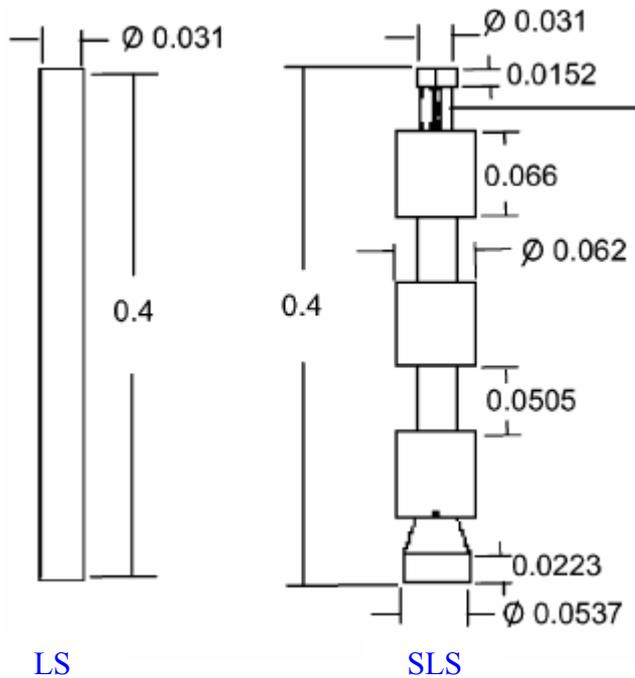
Les conclusions de leur recherche sont :

-le modèle RSM donne des résultats des champs de vitesses très proche de l'expérimental.

-les trois modèles de turbulence ont donnés des courbes de « DTS » proches du physique sauf que le modèle RSM prédit mieux le temps de résidence minimum.

-l'utilisation du SLS permet de diminuer la turbulence du jet entrant ce qui permet une grande capacité de flottaison des inclusions, donc une meilleure décantation que ce dans le LS.

-l'utilisation du SLS permet d'éviter d'encombrer le répartiteur avec des dispositifs de contrôles.



3- **Qinfu Hou et Zougshu Zoo (2005)** ont constaté que le modèle de turbulence RNG-K- ϵ est fortement recommandé que le modèle K- ϵ dans la simulation numérique de l'écoulement de l'acier liquide (swirling flow) dans un répartiteur type modèle équipé de barrage et déflecteur avec un tube submergé connecté à une chambre (swirling chamber) placé dans le fond du répartiteur qui joue un rôle très important pour le flottage des inclusions en diminuant l'énergie cinétique turbulente.

4- **Anil Kumar et al (2004)** ont étudié l'effet du maillage, le type de modèle de turbulence et aussi le type et de conditions aux limites imposé.

Ils ont fait une étude numérique (code fluent) et expérimentale sur l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur type modèle à double sorties, à tube submergé, avec et sans dispositifs de contrôles, travaillant avec les courbes de « DTS ». Ils en ont conclu ce qui suit :

- Le maillage doit être dense et raffiné pour le tube submergé et suffisamment bon pour le répartiteur afin d'obtenir un maillage indépendant de la solution.

- Le modèle RSM est plus précis que le modèle k- ϵ mais en conséquence il est très coûteux en matière de temps CPU et comme résultat il est préférable de choisir un modèle optimal et qui sera le modèle k- ϵ .

-pour les conditions aux limites :

Spécifier « sortie d'écoulement » (outflow) à la sortie au lieu de « pression ambiante ».

5- **Rajeev Kumar et al (2003)** ont fait une simulation numérique sur l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur de coulée continue réel à une seule sortie et à tube submergé utilisant le code fluent dans le but d'obtenir une configuration géométrique optimale du répartiteur si on augmentait sa capacité de 17 tonnes à 25 tonnes.

Pour atteindre cet objectif, ils ont utilisé l'analyse des courbes de « DTS » sous les conditions isothermes et non isothermes, ils ont obtenu qu'en incorporant un déflecteur entre l'entrée et la sortie sera une solution adéquate pour un écoulement optimal de l'acier liquide. Ils ont trouvés aussi que le comportement de l'écoulement sous les conditions non isothermes est presque le même que sous les conditions isothermes.

6- **A.Ramos-Banderas et al (2003)** ont fait une simulation numérique et expérimentale de l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur de coulée continue type modèle pour étudier l'effet des dispositifs de contrôles : impact du jet, du barrage et de l'injection de l'air.

Ils ont trouvé que les résultats numériques et expérimentaux de l'écoulement bi -phasique (eau+air) sont proches et ils ont constaté que l'utilisation de l'ensemble (barrage+impact du jet+injection d'air avec un débit de 596 ml/min) en même temps est la solution optimale.

Ils ont remarqué aussi que l'injection de l'air seule encourage le flottage des inclusions mais pas du même niveau que l'impact du jet.

7- **Rüdiger Shwarze et al (2001)** se sont intéressés sur l'influence du choix du modèle de turbulence sur les résultats de « DTS » obtenus à l'aide du code fluent et comparés aux résultats expérimentaux publiés par Neifer et al (1995) et Kemeny et al (1998).

Ils ont opté pour une nouvelle approche : eulerienne-lagrangienne qui consiste à utiliser des particules comme traceur travaillant sur deux répartiteurs réels l'un avec dispositifs de contrôle et l'autre sans, sous les conditions isothermes, ils ont constaté que le modèle $k-\epsilon$ est fiable pour le répartiteur sans dispositifs de contrôle et que le modèle RNG-K- ϵ est mieux pour le répartiteur avec dispositifs de contrôle.

8- **K.J.Craig et al (2001)** ont utilisés le code fluent pour faire une simulation numérique de l'écoulement utilisant les courbes de « DTS ».ils ont trouvé que l'arrangement (impact du jet et baffle) est mieux que l'arrangement (barrage et déflecteur) en matière d'optimisation de l'écoulement. Ils ont remarqué aussi que le temps de séjour minimum n'est pas le même entre le modèle et le prototype à cause des forces de buoyancy.

9- **A.Bellaouar et al (1999)** ont fait une étude expérimentale de l'acier liquide appuyé par le numérique utilisant le code fluent sur un répartiteur de coulée continue type modèle dans le but d'optimiser l'écoulement et cela en optant pour l'analyse des courbes de « DTS ».pour arriver à cet objectif, ils ont utilisé l'injection de gaz d'argon et l'implantation de dispositifs de contrôles tels que : barrage, déflecteur. Ils ont trouvé que l'utilisation en même temps de l'ensemble :(injection de gaz + barrage + déflecteur) serait la solution adéquate pour une meilleure optimisation de l'écoulement.

10- **Yogeshwar Sahai et Toshihiko EMI (1996)** ont utilisé le modèle mixte pour caractériser l'écoulement de l'acier liquide dans le répartiteur. Ils ont corrigé la formule du calcul du volume mort en ne considérant pas le fluide dans la zone morte immobile mais qui s'écoule lentement en s'échangeant avec l'écoulement principal.

11- **Yogeshwar Sahai et Toshihiko EMI (1996)** ont étudié le critère de similitude entre le modèle et le prototype en maintenant le nombre de Froude constant.

12- **Chandrashekhar Damle et Yogeshwar Sahai (1995)** ont étudié l'effet de la densité et de la quantité du traceur sur l'écoulement et sur les courbes de « DTS » à travers une modélisation mathématique (programme fortran) et physique sur un répartiteur type modèle.

Ils ont recommandé d'utiliser une quantité faible et une densité du traceur proche de celle du fluide dans le répartiteur afin de ne pas perturber l'écoulement.

13- **S.m .Lee et al (1990)** ont fait une étude numérique et expérimentale dans un répartiteur type modèle avec et sans barrage et déflecteur utilisant la DTS.

Ils ont trouvés qu'avec l'incorporation de dispositifs de contrôles (barrage et déflecteur) apparaît efficaces pour le flottage des inclusions non – métalliques dans l'acier.

3. Objectif du travail :

L'objectif principal de la modélisation numérique des écoulements dans un réacteur métallurgique à différents obstacles, est la recherche d'un écoulement optimal qui favorise la propreté inclusionnaire des aciers coulés en continue obtenu par l'installation des dispositifs de contrôle (barrage et déflecteur) dans le répartiteur .pour cela ,on a procédé à une simulation numérique avec l'aide du code fluent de l'écoulement de l'eau liquide dans un répartiteur à échelle réduite avec et sans dispositifs de contrôle se basant sur l'analyse des courbes de DTS.

Une étude paramétrique a été faite pour étudier et évaluer l'efficacité des dispositifs de contrôle, elle consiste en :

Etude de l'influence du barrage et de son emplacement.

Etude de l'influence du déflecteur et de son emplacement.

Etude de l'influence de l'ensemble (barrage + déflecteur) et leur emplacement.

En dernier, une comparaison sera faite entre ces trois configurations géométriques afin de sortir avec un répartiteur optimal.

L'obtention d'un écoulement optimal ou d'une configuration géométrique optimale du répartiteur a été réalisée par :

-augmenter le temps de séjour moyen en diminuant le volume mort.

-limiter la zone de mélange et augmenter le volume piston

4. Contenu du mémoire :

Ce mémoire comprend cinq chapitres :

Le premier chapitre : est consacré à la description de la coulée continue.

Le deuxième chapitre : expose la notion de distribution des temps de séjour (DTS) et son application sur l'écoulement de l'acier liquide dans le répartiteur.

Le troisième chapitre : est consacré à la formulation mathématique adaptée aux équations régissant l'écoulement du fluide et du traceur.

Le quatrième chapitre : présente la procédure de résolution du problème par le code fluent.

Le cinquième chapitre : discute les résultats obtenus concernant le temps de séjour moyen et les différentes fractions volumiques (volume mort, volume piston, volume mélangé).

CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA COULÉE CONTINUE**I.1. Introduction :**

Dans l'industrie sidérurgique, la coulée continue est le procédé qui se situe entre l'élaboration de l'acier et le laminage. Ce procédé a pris depuis 30 ans, une place de plus en plus importante dans la filière de production en raison des avantages par rapport à la technique traditionnelle de coulée en lingots : économique d'énergie et de main d'œuvre, meilleur rendement et amélioration de la qualité du produit.

En ce qui suit on va donner des définitions des deux types de coulée en se concentrant beaucoup plus sur la coulée continue.

I.2. Coulée en lingots :

L'acier est coulé et solidifié dans des moules en fontes : les lingotières.

Une fois la solidification terminée, les lingots sont démoulés après un réchauffage à 1200 C° , ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en : brames, produits longs etc.

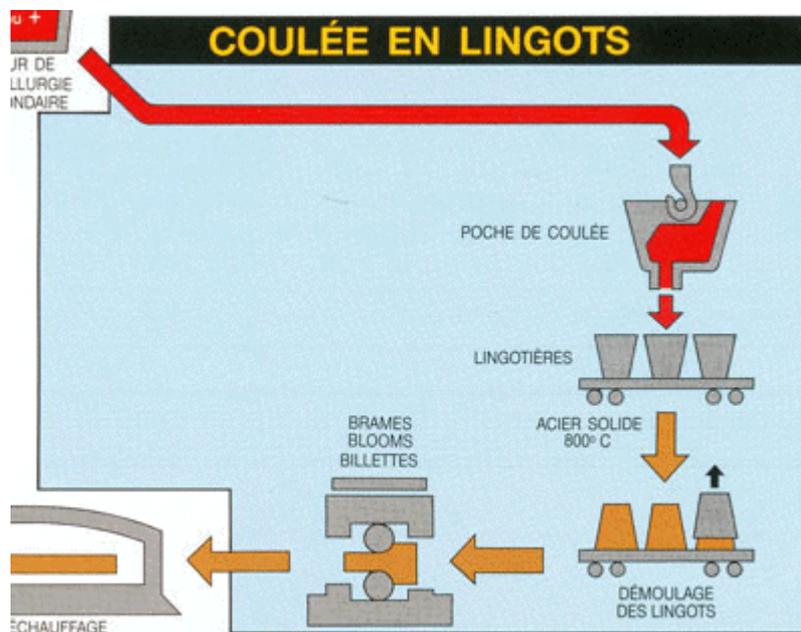


Figure I.1 : Représentation de la coulée en Lingots

I. 3. Coulée continue :

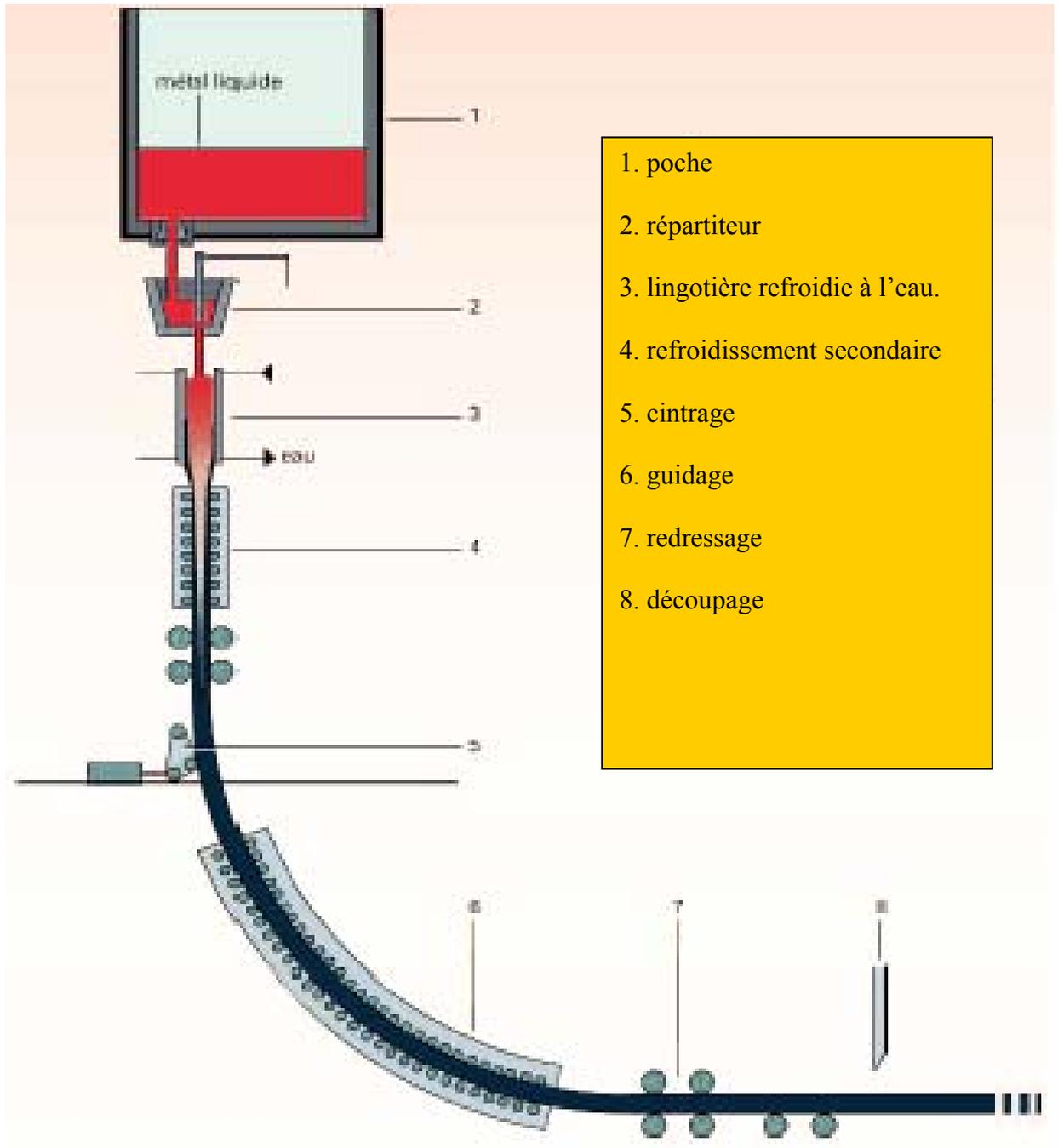
Pour schématiser le procédé, on peut le décrire de la manière suivante : l'acier en fusion contenu dans une poche est coulé dans une lingotière sans fond carrée, rectangulaire, ronde (selon le produit fabriqué), maintenue à basse température par un système de refroidissement (en général hydraulique).

L'acier liquide au contact avec la lingotière, va se solidifier et une peau solide commence ainsi à se former. On parle de refroidissement primaire.

Sous la lingotière sont disposés des rouleaux extracteurs qui font avancer le produit dans la machine à vitesse constante. Entre ces rouleaux, un deuxième système de refroidissement est constitué de jets d'eau, on parle alors de refroidissement secondaire.

Au fur et à mesure que le produit progresse dans la machine, l'épaisseur de la couche solidifiée augmente et inversement l'acier liquide tend à disparaître pour obtenir finalement un produit complètement solidifié en fin de procédé. Au cours de ce refroidissement, l'acier passe par trois états : liquide, pâteux et solide.

En fin de procédé, une fois sa solidification terminée, le produit est découpé en tronçons et envoyé vers un parc de stockage ou plus directement vers un four avant d'être laminé.



- 1. poche
- 2. répartiteur
- 3. lingotière refroidie à l'eau.
- 4. refroidissement secondaire
- 5. cintrage
- 6. guidage
- 7. redressage
- 8. découpage

Figure I.2 : Représentation de la coulée continue

À l'aide des notations de la figure (I.2), décrivons les éléments principaux d'une machine de coulée continue :

A. Le Répartiteur (aussi appelé distributeur ou tundish) : est un récipient placé entre la poche amenant le métal liquide de l'aciérie et les ou la lingotière. Ses principaux rôles sont de permettre l'alimentation simultanée de plusieurs lingotières (généralement deux pour les coulées continue de brames) et la coulée sans séquence (sans arrêt de la machine) de plusieurs poches consécutives.

B. La Lingotière :

De longueur inférieure à un mètre, dont les parois en cuivre sont refroidies par circulation intense d'eau, est l'élément essentiel de la machine, elle permet la mise en forme du produit coulé et assure la formation d'une peau solidifiée suffisamment épaisse pour contenir le métal liquide. Le métal en provenance du répartiteur est distribué dans la lingotière par une busette en céramique, le plus souvent submergé. Afin d'éviter le collage de la peau contre les parois, la lingotière est animée d'un mouvement d'oscillation verticale de faible amplitude et un lubrifiant (huile ou laitier synthétique) est introduit.

C. Le Refroidissement Secondaire : est la partie de la machine que traverse le produit lorsqu'il est extrait de lingotière. Il est constitué d'un système mécanique de soutien et de guidage du produit par rouleaux et d'autre part, d'un système de refroidissement par aspersion d'eau permettant la maîtrise de la température de surface du produit jusqu'à sa complète solidification.

D. Le Guidage :

Formé de rouleaux dont certains sont motorisés, assure la descente du produit à vitesse constante dans la machine.

E. L'oxycoupage : est l'outil qui permet la coupe à longueur du produit solidifié et son identification avant son évacuation vers le laminoir.

I.3.1 Description du répartiteur

A. Définition du répartiteur :

Le corps du répartiteur est un réacteur généralement de forme trapézoïdale isocèle muni d'un cylindre submergé ou non submergé d'une ou plusieurs sorties. Construit en briques réfractaires, sa surface libre munie d'une couche de laitier protectrice de l'oxydation de l'acier liquide causée par l'air ambiant, son rôle aussi est d'attraper et d'éliminer les inclusions non métalliques par voie de réaction chimique

Pour améliorer le flottage des inclusions donc leur décantation, plusieurs techniques sont déployés tels que :

- L'injection de gaz.

Ou

- Plusieurs types de dispositifs de contrôle sont placés à l'intérieur du répartiteur tels que : barrage, déflecteur, baffle.

B. Types de répartiteurs : Il y a plusieurs types de répartiteurs qui se diffèrent selon leur capacité et selon le besoin industriel, dont on citera quelques configurations :

B.1. Répartiteur classique : est un répartiteur qui alimente une seule lingotière, avec ou sans dispositifs de contrôle qui comprend :

- Un tube submergé ou non submergé.

- Une seule sortie.

Ce type de répartiteur peut être de forme trapézoïdale isocèle ou de forme parallélépipédique :

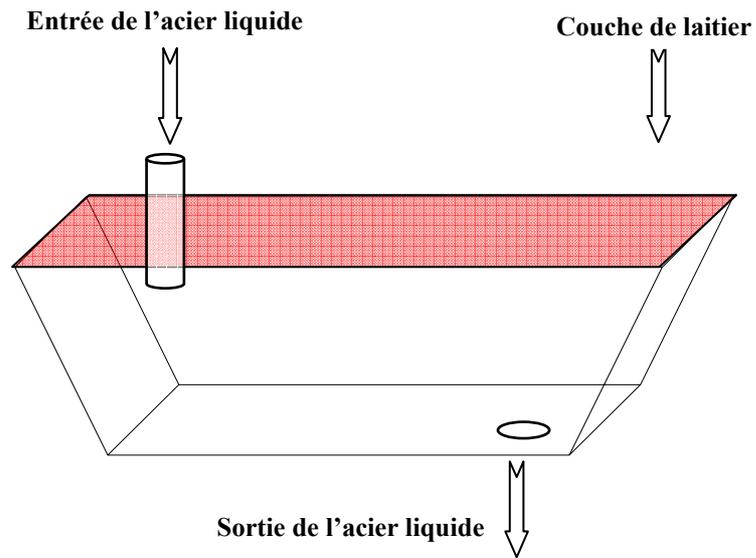


Figure I.3 : Forme classique d'un répartiteur de coulée continue de forme trapézoïdale isocèle

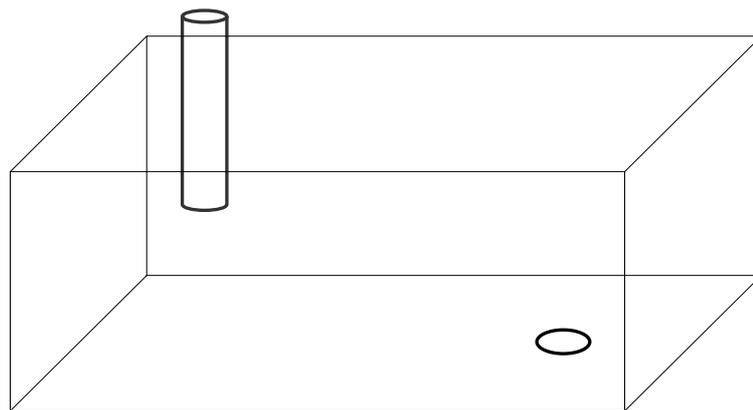


Figure I.4 : Forme classique d'un répartiteur de coulée continue de forme parallélépipédique

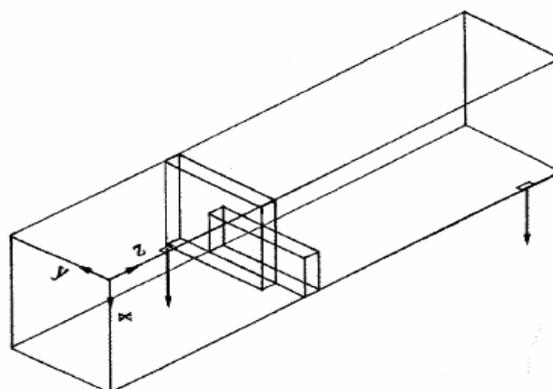


Figure I.5 : Répartiteur à une sortie avec dispositifs de contrôles

B.2. Répartiteur à double sorties : est un répartiteur qui alimente deux lingotières sans dispositifs de contrôles composé de :

- Tube submergé ou non submergé.
- Deux sorties.

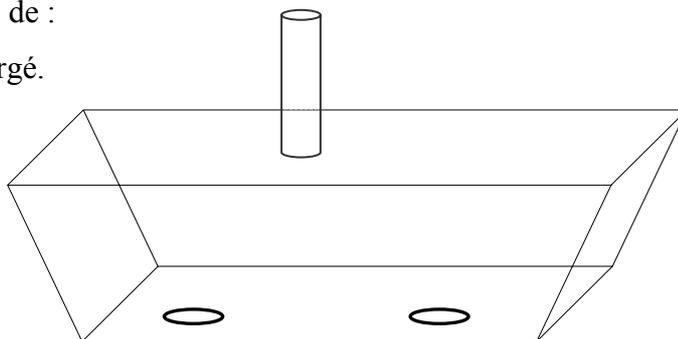


Figure I.6 : Répartiteur à double

B.3. Répartiteur à quatre sorties : est un répartiteur qui alimente quatre lingotières sans dispositifs de contrôles composé de :

- Tube submergé.
- Quatre sorties.

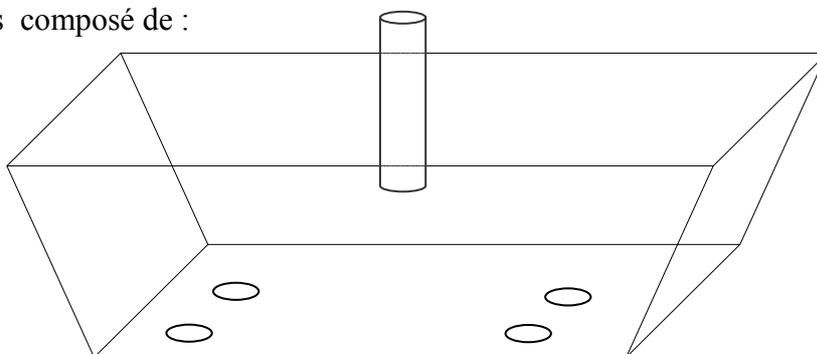


Figure I.7 : Répartiteur à quatre sorties

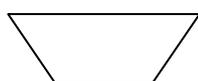
I.3.2. Types de dispositifs de contrôle : Il y a plusieurs types de dispositifs de contrôles qui se diffèrent, dont on citera quelques configurations :

A. Barrage et Déflecteur :

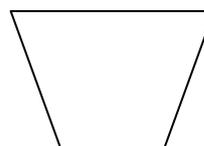
Leur forme est identique à celle du répartiteur c'est-à-dire trapézoïdal isocèle, la différence entre ces deux dispositifs c'est que le barrage est de dimensions plus grandes que le déflecteur. On note généralement la hauteur du barrage doit être inférieure à celle du répartiteur afin de laisser le passage à l'écoulement. Leurs rôles sont :

Barrage : limiter la zone de mélange.

Déflecteur : placé derrière le barrage sert à diriger les inclusions vers la couche de laitier.



Déflecteur



Barrage

Figure I.8 : barrage et déflecteur

B. Baffle : couvre toute la section du répartiteur. Il est percé de trous de formes et de tailles diverses, orientés généralement vers le haut. Les avantages annoncés de ce type de dispositif sont une mise en place aisée dans le répartiteur et une diminution importante des zones mortes. De plus, si le nombre et la forme des trous sont appropriés, le baffle agit comme un filtre pour les inclusions de grandes dimensions.

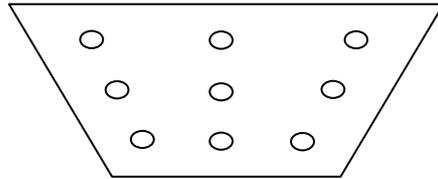


Figure I.9 : Baffle

C. Impact du jet : son rôle est diminuer l'énergie turbulente du jet entrant, placé dans le fond du répartiteur en dessous du tube entrant, il prend plusieurs formes tels que :

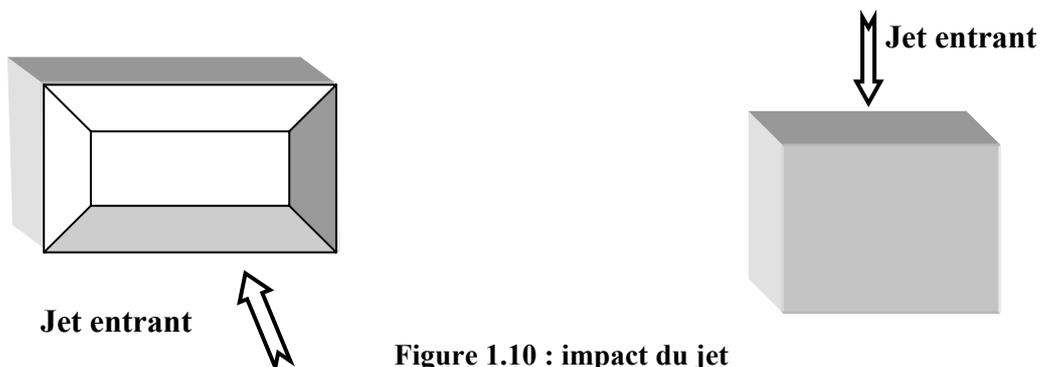


Figure 1.10 : impact du jet

I.3.3. Différence entre le répartiteur prototype et modèle :

- Le répartiteur prototype c'est le répartiteur réel existant dans l'industrie sidérurgique.
- Le répartiteur modèle est un répartiteur type maquette de la même forme que le réel construit en plexiglas pour permettre la visualisation des phénomènes d'écoulements, travaillant avec de l'eau liquide comme fluide.



Figure 1.11 : Répartiteur modèle et prototype

CHAPITRE II : DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR

II.1. Introduction :

Dans la pratique industrielle, les réacteurs se comportent rarement comme des réacteurs idéaux (piston ou parfaitement agité) : une géométrie complexe (présence d'équipement de contrôle et régulation...etc.), une mauvaise distribution du fluide ...etc peuvent perturber l'écoulement ; ce qui en résulte que les performances d'un réacteur réel s'éloignent de ses performances prédites par les modèles idéaux.

Dans un réacteur réel, les molécules séjournent dans le volume réactionnel pendant ses temps « t_s » qui dépendent notamment du profil hydrodynamique, et de la géométrie du réacteur.

Ces temps peuvent s'écarter notablement du temps de séjour théorique, donc il existe une distribution des temps de séjour (DTS) et cette dispersion exerce une influence sur les performances chimiques du réacteur (Danckwerts 1953).

Le but du chapitre sera donc de :

- Caractériser l'état de mélange d'un réacteur réel.
- Identifier ses défauts (pour les corriger, ou uniquement en tenir compte).
- Représenter ce réacteur par un modèle simple.
- Prévoir l'incidence de ces défauts sur les performances réactionnels.

En résumé, la courbe de la DTS nous donne des informations très bénéfiques sur les performances du réacteur.

II .2. Définitions générales :

II .2.1 Définition du réacteur :

Par définition, un réacteur est un appareil dans lequel on effectue une transformation sur la matière, en réglant les conditions pour obtenir un produit déterminé, mais le terme de réacteur peut fort bien s'étendre à des appareils qui ne sont le siège d'aucune réaction chimique.

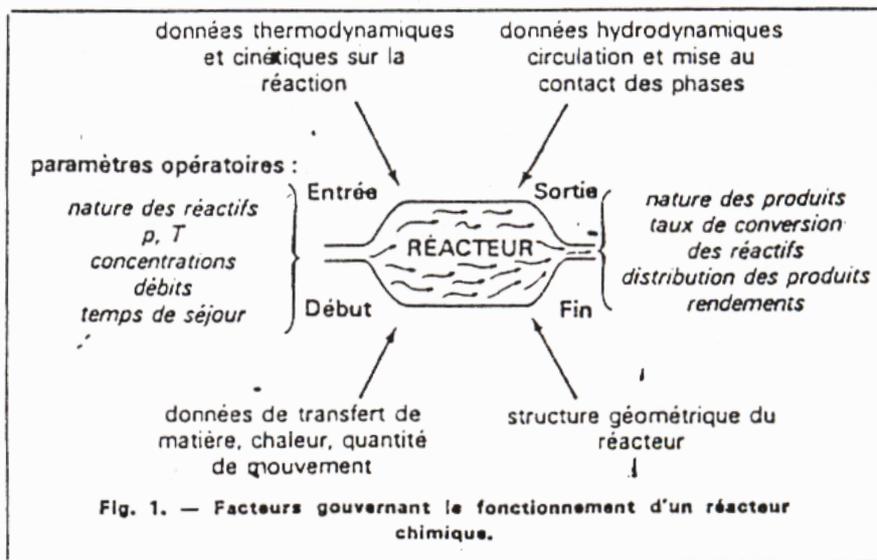


Figure II.1 : Facteurs gouvernants le fonctionnement d'un réacteur

II.2.2. Notions d'âge, d'espérances de vie, et de temps de séjour :

Avant de définir précisément la distribution des temps de séjour, il est intéressant de donner quelques définitions qui caractérisent chaque molécule présente dans un réacteur de section d'entrée «E» et de section de sortie «S».

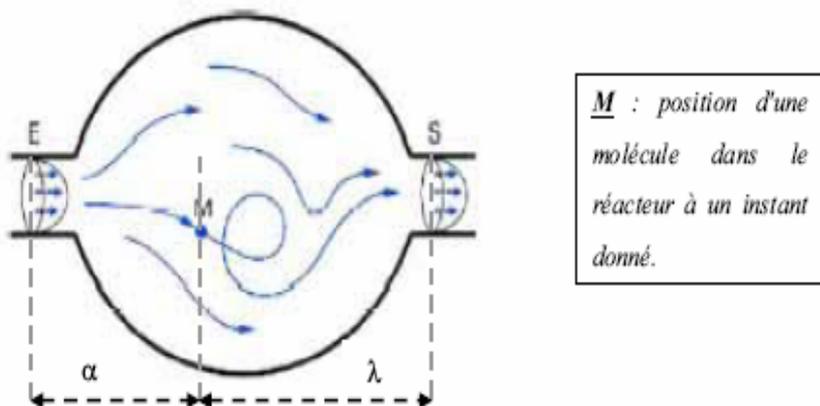


Figure II.2 : Age interne, espérance de vie et temps de séjour d'une molécule dans un réacteur ouvert

Considérons une molécule «M» à un instant donné «t» son temps de présence dans le réacteur à partir du moment où elle a franchie l'entrée «E» s'appelle **l'âge interne α** de cette molécule, le temps qui s'écoulera entre le moment α et la sortie du réacteur de la molécule représente son **espérance de vie λ** . Son temps de séjour réel, t_s qui représente la durée totale de présence de la molécule au sein du réacteur peut s'écrire de la manière suivante :

$$t_s = \lambda + \alpha \quad (\text{II-1}).$$

II.3. Distribution des temps de séjour :

II.3.1. Préambule :

Les calculs de réacteur sont généralement basés sur les concepts d'écoulements idéaux : soit **piston**, soit **parfaitement agité**.

Piston :

Toutes les molécules ont le même temps de séjour dans le réacteur.

Parfaitement agité :

La concentration est uniforme dans tout le réacteur.

L'écoulement **réel** est en fait intermédiaire entre ces deux extrêmes.

Pour chaque molécule, en réacteur monophasique, on peut définir un (temps de séjour) dans le réacteur. La distribution de ce temps de séjour pour l'ensemble des molécules constitue une donnée intéressante pour l'analyse de l'écoulement du réacteur : elle est une caractérisation du mélange dans le réacteur.

II.3.2. Hypothèses fondamentales :

La théorie de DTS est essentiellement définie et utilisée pour des milieux continus et monophasiques, elle repose sur les hypothèses suivantes :

- 1- Ecoulement en régime permanent.
- 2- Ecoulement déterministe : une même cause produira les mêmes effets, difficulté d'application par exemple dans les régimes intermédiaires entre laminaire et turbulent stabilisé.
- 3- Le fluide est incompressible.
- 4- L'écoulement à travers les sections d'entrée et de sortie se fait uniquement par convection forcée, à l'exclusion de toute diffusion et de tout mélange en retour.
- 5- Les conduits d'entrée/sortie sont de petit diamètre devant les dimensions du réacteur.

II.3.3. Définition :

La distribution des temps de séjour $E(t)$ est telle que : $[E(t) dt]$ est la fraction du débit de sortie qui est restée dans le réacteur un temps compris entre t et $t + dt$.

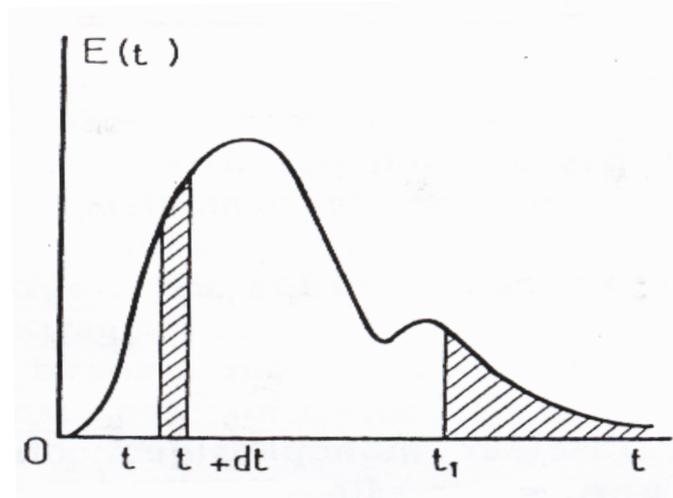


Figure II.3 : Distribution des temps de séjour

- La fraction du débit qui est restée un temps compris entre t_1 et t_2 :

$$\int_{t_1}^{t_2} E(t) dt \quad (\text{II-2}).$$

- La fraction du débit plus jeune que t_1 :

$$\int_0^{t_1} E(t) dt \quad (\text{II-3}).$$

- la distribution $E(t)$ est normée : {l'ensemble du débit de sortie a forcément un temps compris entre 0 et l'infini}

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (\text{II-4}).$$

La fraction de la distribution du temps de séjour doit satisfaire les conditions suivantes :

- $E(t) = 0$ pour $t < 0$ (le fluide ne peut sortir avant d'être entré).
- $E(t) \geq 0$ (les fractions de débit sont toujours positives).

II.4. Détermination expérimentale des temps de séjour (traceur) :

Pour mesurer une distribution des temps de séjour, il s'agit de « marquer » les molécules pour pouvoir les détecter dans le courant de sortie pour cela on utilise un traceur qui peut un corps radioactif, un colorant, ou toute substance de mêmes propriétés hydrodynamiques que le fluide, mais décelable par une propriété physique telle que la conductivité électrique, etc. On applique à l'aide du traceur un certain « signal » à l'entrée du réacteur, de manière à ne pas perturber le régime d'écoulement, et on examine sa « réponse » à la sortie.

Il existe plusieurs méthodes de déterminer la DTS dont on donne seulement deux principales et simples utilisés généralement dans les études expérimentales qui sont :

-injection échelon

-injection impulsion (ou Dirac)

On note que la 2^{ème} méthode qui est la plus utilisée généralement par les chercheurs et qui sera utilisé dans notre recherche.

II.4.1. Injection échelon :

Dans ce type d'injection la concentration en traceur passe brusquement de 0 à C_0 dans l'alimentation à l'instant $t = 0$, la concentration en sortie est notée $C(t)$.

Le suivi type de cette concentration est présentée sur la figure (II.4)

C_0 : Concentration initiale supposée répartie dans tout le volume.

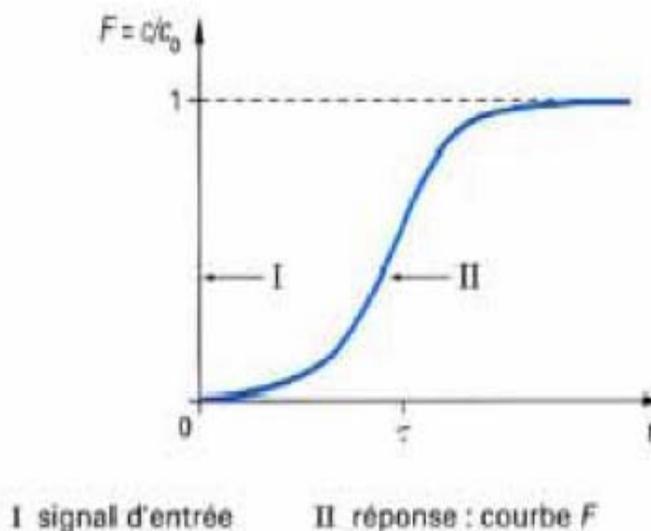


Figure II.4 : Réponse à une injection échelon

II.4.2. Injection impulsion (ou Dirac) :

Soit un réacteur alimenté en continue par un débit Q (régime permanent).

A l'entrée du réacteur, considérons l'injection instantanée d'une masse M du traceur très près de l'alimentation, si C(t) est la concentration moyenne du traceur dans le flux franchissant la section de sortie du réacteur alors :

Pendant l'intervalle de temps dt entre t et t+dt, la masse qui est sortie au sein du réacteur est égale à : QC(t)dt .

Donc la fraction de traceur ayant séjourné entre t et (t+dt) dans le réacteur ou la fraction de débit ayant séjourné un temps dt dans le réacteur est :

$$\frac{QC(t)dt}{M} = E(t)dt \tag{II-5}.$$

$$\Rightarrow E(t) = \frac{Q}{M} C(t) \quad \text{Ou :} \quad E(t) = \frac{C(t)}{t_{th} C_0} \tag{II-6}.$$

Un bilan en traceur sur le réacteur nous donne M :

$$M = \int_0^{\infty} QC(t) dt \tag{II-7}.$$

On peut donc écrire E(t) la distribution des temps de séjour du traceur dans le réacteur :

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \tag{II-8}.$$

Par définition la DTS d'un écoulement est la réponse en concentration du réacteur à une injection instantanée de traceur idéal, c'est-à-dire la fonction d'entrée delta de Dirac δ(t) .

On sait par ailleurs que les transformés de Laplace C_E(s) et C(s) sont des fonctions normalisés d'entrée C_E(t) et de sortie C(t) d'un système linéaire sont liés par une fonction de transfert G(s), avec « S » la variable de Laplace :

$$G(s) = \frac{C(s)}{C_E(s)} \tag{II-9}.$$

Si l'injection est instantanée on a :

$$C_E(t) = \frac{M}{Q} \delta(t) \quad (\text{II-10}).$$

La transformée de la place de fonction $\delta(t)$ étant égale à 1.

$$G(s) = \frac{Q}{M} C(s) \quad (\text{II-11}).$$

La fonction de transfert d'un réacteur est donc la transformée de Laplace autrement dit :

$$C(s) = G(s) = \int_0^{\infty} E(t) e^{-st} dt \quad (\text{II-12}).$$

Donc on note que la DTS peut être obtenue par la transformée de Laplace ; elle peut être obtenue aussi analytiquement pour les cas simples (réacteur parfaitement agité)

II.4.3 Moment de la distribution des temps de séjour :

La distribution des temps de séjour peut être caractérisée par un moment principal qui est le temps de séjour moyen calculé par la formule suivante :

$$\mu_1 = \bar{t} = \int_0^{\infty} t E(t) dt, \quad \left[\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \right] \quad (\text{II-13}).$$

Ou :

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (\text{II-14}).$$

Ce temps de séjour moyen doit être distingué du temps de séjour théorique (ou géométrique) t_{th} se calculant par la relation suivante :

$$t_{th} = \frac{V}{Q} \quad (\text{II-15}).$$

D'où :

V : volume du réacteur.

Q : débit volumique de fluide.

Pour un réacteur idéal (piston ou parfaitement agité) ces deux temps sont identiques.

II.5. Distribution des temps de séjour dans les réacteurs idéaux :

II.5.1. Réacteur piston : Tous les molécules ont le même temps de séjour

$$\bar{t} = t_{th} = \frac{V}{Q}$$

$$E(t) = \delta(t - t_{th}) \quad (\text{II-16}).$$

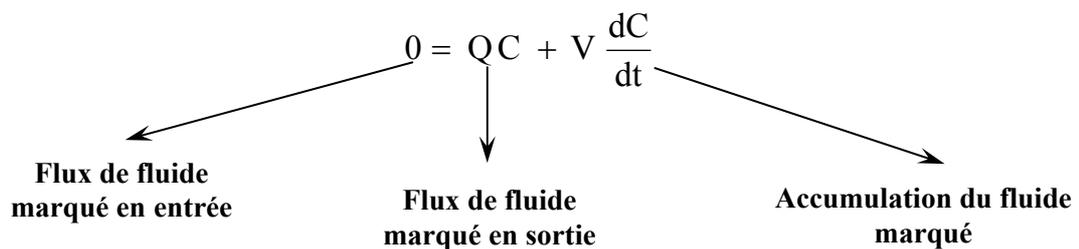
La DTS est un pic étroit situé au temps t_{th} .

Note : La DTS est obtenue par l'utilisation de la transformée de Laplace.

II.5.2. Réacteur parfaitement agité :

Dans un réacteur de ce type, le mélange est uniforme et instantané. A chaque t les caractéristiques du fluide à une injection impulsion à l'intérieur et à la sortie du réacteur sont donc identiques. Pour établir l'expression de $E(t)$, cherchons la réponse à une injection impulsion, introduisons une bouffée de traceur dans le réacteur la concentration monte

instantanément à C_0 puis évolue suivant l'équation : $\frac{C(t)}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_{th}}} \quad (\bar{t} = t_{th})$.

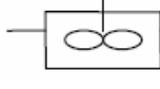


On note que : $E(t) = \frac{C(t)}{\bar{t}C_0}$, on obtient :

$$E(t) = \frac{1}{t_{th}} e^{-\frac{t}{t_{th}}} \quad (\text{II-17}).$$

Note : On note que la DTS est obtenue analytiquement.

Tableau récapitulatif

	Réacteur piston	parfaitement
E (t)	 $\delta(t-t_{th})$	 $\frac{1}{t_{th}} e^{-\frac{t}{t_{th}}}$
Fonction transfert	$e^{(-t_{th} S)}$	$\frac{1}{s t_{th} + 1}$

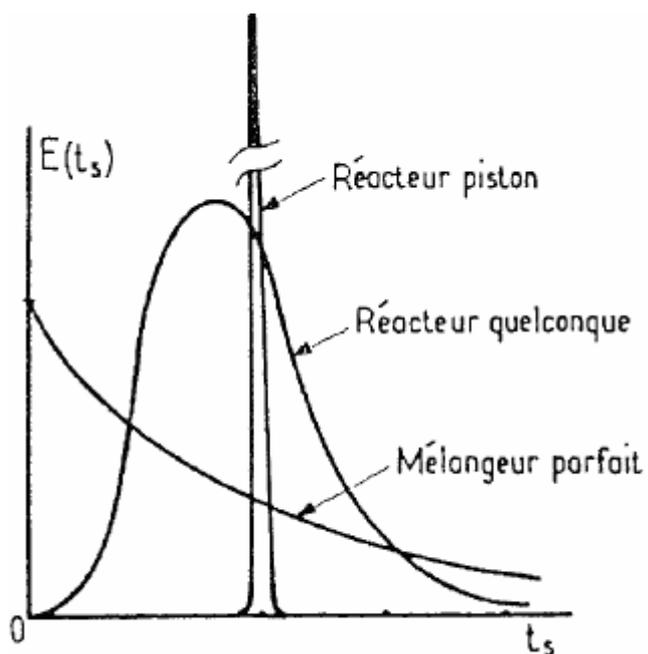


Figure II.5 : Distribution des temps de séjour pour différents réacteurs

II.6 Diagnostics de mauvais fonctionnements :

Il est clair que si tout le volume interne du réacteur est accessible au fluide et s'il n'y a pas de phénomènes de recirculations, alors on a $\bar{t} = t_{th}$.

- en comparant le temps de séjour moyen avec le temps de séjour théorique.

- si $\bar{t} < t_{th}$ existence possible d'un volume mort ou stagnant V_m tel que :

$$V = V_m + V_a \quad (II-18).$$

$$\text{Avec } \bar{t} = \frac{V_a}{Q}.$$

V_m : Volume mort.

V_a : Volume actif.

V : Volume du réacteur.

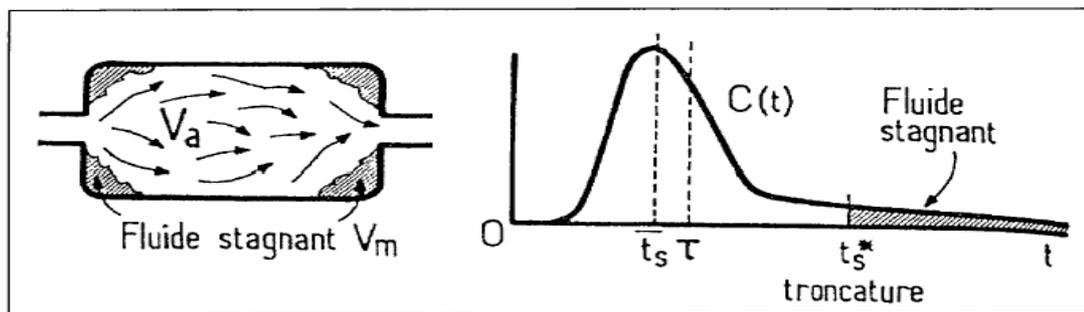
$$V_m = V - V_a \Rightarrow \frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_a}{V}$$

$$\Rightarrow \frac{V_m}{V} = 1 - \frac{\bar{t}}{t_{th}} \quad (II-19).$$

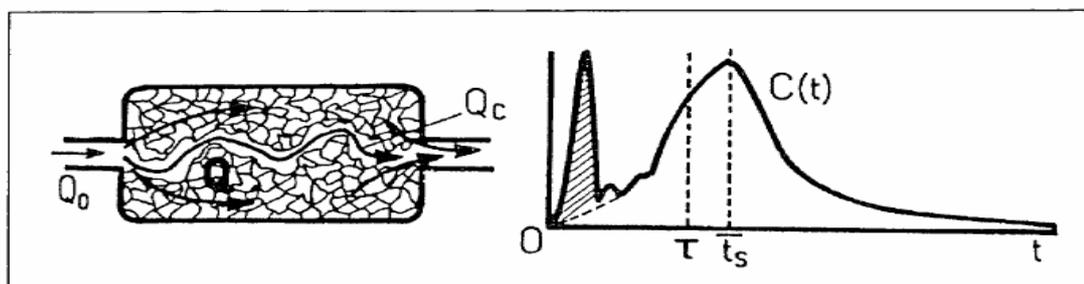
S'il y a un échange entre V_a et V_m la courbe de distribution présente une traînée.

- si $\bar{t} > t_{th}$: existence possible d'un court circuit, le fluide traverse en partie le réacteur par un chemin beaucoup plus court que le chemin moyen qui consiste à visiter toutes les zones du volume V .

Cette portion de fluide a en fait laissé un pic de réponse qui a échappé à l'enregistrement.



existence d'un volume mort (ou stagnant)



Existence d'un court-circuit et pic non enregistré dans la DTS

Figure II.6 : volume mort et court circuit

II.7. Modélisation des écoulements non- idéaux :

L'étude des écoulements à travers un réacteur quelconque commence par l'obtention, pour la méthode des traceurs d'une courbe expérimentale de distribution des temps séjour. Ceci fait, on se pose généralement le problème de rendre compte de l'allure observée au moyen d'un modèle hydrodynamique utilisable commodément pour décrire le comportement du réacteur. Les écoulements réels dans un réacteur n'étant jamais idéaux, la démarche suivie consiste, dans un premier temps, à interpréter les courbes de DTS obtenue aux moyens de modèles élémentaires décrivant des cas idéaux, les plus couramment utilisés sont :

- 1- Le modèle à dispersion axiale proche de l'écoulement piston (modèle mixte).
- 2- Le modèle des mélangeurs en, cascade, extension du réacteur parfaitement agité.

Si cette approche n'est pas suffisante pour rendre compte des réacteurs réels ou l'écoulement est complexe, on est amenée à compliquer les modèles élémentaires en les associant en série ou en parallèle. Dans notre présent travail le model le plus utilisé et le modèle à dispersion axiale (modèle mixte) et plus précisément un modèle mixte modifié que nous allons le définir dans le prochain point.

II.7.1 Le modèle à dispersion axiale (ou mixte) :

Ce modèle, qui s'applique dans le cas d'un faible écart à l'écoulement piston, repose sur la superposition d'un écoulement piston convectif de vitesse « U » et d'une dispersion aléatoire obéissant à la loi de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{II-20}$$

D : diffusivité moléculaire (turbulente) longitudinale ou axiale. (La dispersion dans les autres directions est négligeable).

C : Concentration.

U : vitesse du fluide.

II.7.1.1 Distribution des temps de séjour :

Pour établir l'expression de la distribution des temps de séjour en fonction du coefficient de dispersion « D ». On effectue une injection impulsion à l'entrée du réacteur, et on mesure la réponse C(t) à la sortie du réacteur.

La DTS est donnée par : $E(t) = \frac{1}{t_{th}} \frac{C(t)}{C_0}$, D'où : $t_{th} = \frac{V}{Q}$

La solution de l'équation (II-20) dépend des conditions aux limites, c'est-à-dire des hypothèses sur la dispersion qui règne à l'entrée et à la sortie ou distingue ainsi :

a) Le réacteur illimité, ou ouvert à la dispersion : il n'y a aucune discontinuité du flux de dispersion à la l'entrée et à la sortie.

b) Le réacteur clos ou fermé à la dispersion : en amont et en aval, le fluide n'est transporté que par convection pure.

c) Le réacteur semi illimité ou semi ouvert à la dispersion soit vers l'amont, soit vers l'aval.

D'après villermaux [21], seulement pour le réacteur ouvert, la distribution des temps de séjour E(t) est obtenue analytiquement, par contre pour les autres types de réacteurs la solution mathématique est plus longue et n'aboutit pas toujours à une expression analytique, et puisque le répartiteur est un réacteur clos ou fermé donc il y a recours à la résolution par la voie de la transformée de Laplace.

NB : On note seulement que nous allons utiliser la DTS obtenue théoriquement sans rentrer dans les détails mathématiques.

II.8. Caractérisation de l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur de coulée continue :

II.8.1. Introduction :

L'importance du rôle que joue l'écoulement de l'acier liquide dans les répartiteurs de coulée continue sur la production d'un acier propre est devenu un objectif primordial à atteindre pour les deux acteurs : industriels et chercheurs.

Pour étudier l'écoulement ils ont utilisé la notion de DTS qui est par définition une courbe qui relie la concentration du traceur à la sortie avec le temps.

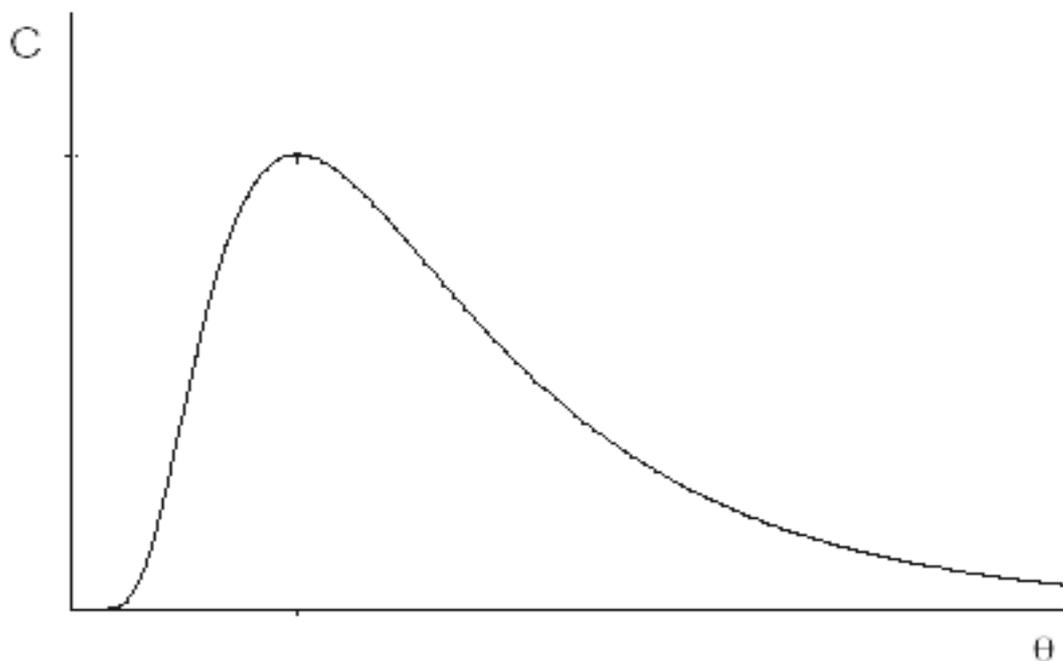


Figure II.7: Courbe de DTS

Pour exploiter et analyser cette courbe, elle est confrontée à un modèle mathématique.

Le modèle utilisé par les chercheurs métallurgistes est le **Modèle Mixte**. [2], [5], [11], [12], [13], [16],[18], [19].

II.8.2. Application du modèle mixte :

Dans ce modèle, le volume du répartiteur est divisé en trois régions différentes qui sont :

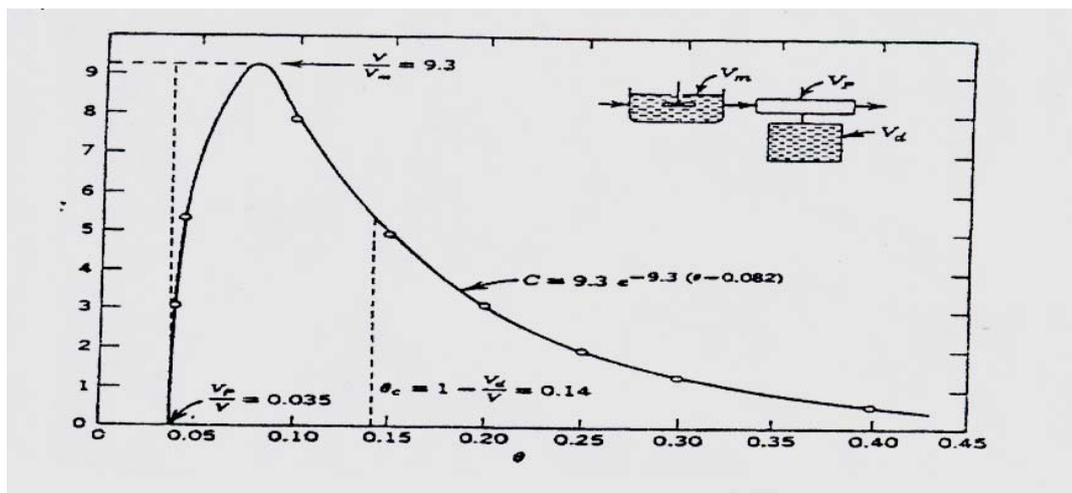


Figure II.8 : Model mixte

1. Volume piston : est un volume qui favorise la décantation des inclusions.
2. Volume parfaitement agité (mêlé) : il est caractérisé par une zone de brassage et de turbulence.
3. Volume mort (ou stagnant) : est caractérisé par des zones de recirculations et des coins du réacteur.
4. Volume active : est la somme des deux volumes (piston et mêlé), ce volume est par définition le volume de fluide participant à l'écoulement.

On observe que les deux premières régions (piston et mêlé) agissent en série et le troisième en parallèle.

II.8.3. Calcul des paramètres de la DTS :

II.8.3.1 Temps de la DTS :

A. Temps théorique :

On définit le temps théorique par la relation suivante :

$$t_{th} = \frac{\text{Volume du répartiteur}}{\text{Débit volumique}} = \frac{V}{Q} \quad (\text{II-21}).$$

B. Temps de séjour moyen :

D'après Levenspeil [22] le temps de séjour moyen s'obtient pendant une durée de deux fois le temps théorique ($2 \times t_{th}$) calculé par la relation suivante :

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{2t_{th}} t C(t) dt}{\int_0^{2t_{th}} C(t) dt} \quad (\text{II-22}).$$

Pour calculer l'intégral de la relation (II-29) on applique la règle des **trapèzes**, on obtient :

$$\bar{t} = \frac{\sum_0^{2t_{th}} t C(t) \Delta t}{\sum_0^{2t_{th}} C(t) \Delta t} \quad (\text{II-23}).$$

Si $\Delta t = \text{cte}$ La relation devient :

$$\bar{t} = \frac{\sum_0^{2t_{th}} t C(t)}{\sum_0^{2t_{th}} C(t)} \quad (\text{II-24}).$$

En pratique, le temps de séjour moyen est inférieur au temps théorique à cause des zones de recirculations du fluide dites mortes car elles ne participent pas à l'écoulement.

C. Temps minimum et maximum :

- Temps minimum t_{min} : temps de début de réponse sortie.
- Temps maximum t_{max} : temps ou la concentration atteint son maximum.

Ces deux temps sont obtenus à partir de la courbe de DTS.

II.8.3.2 Les volumes de la DTS :

A. Calcul du volume piston : Pour le calcul de ce volume deux approches ont été utilisées qui sont :

- Le modèle mixte théorique.
- Le modèle mixte modifié.

A.1. Le modèle mixte théorique :

Comme définit dans le chapitre I, le répartiteur est muni soit d'un tube submergé ou un tube non submergé, la courbe de DTS pour les deux configurations géométriques et pour ce modèle est la même ((Danckwerts).

Tube submergé : volume piston \longrightarrow volume mélangé.

Tube non submergé : volume mélangé \longrightarrow volume piston.

La DTS est définie par la figure suivante :

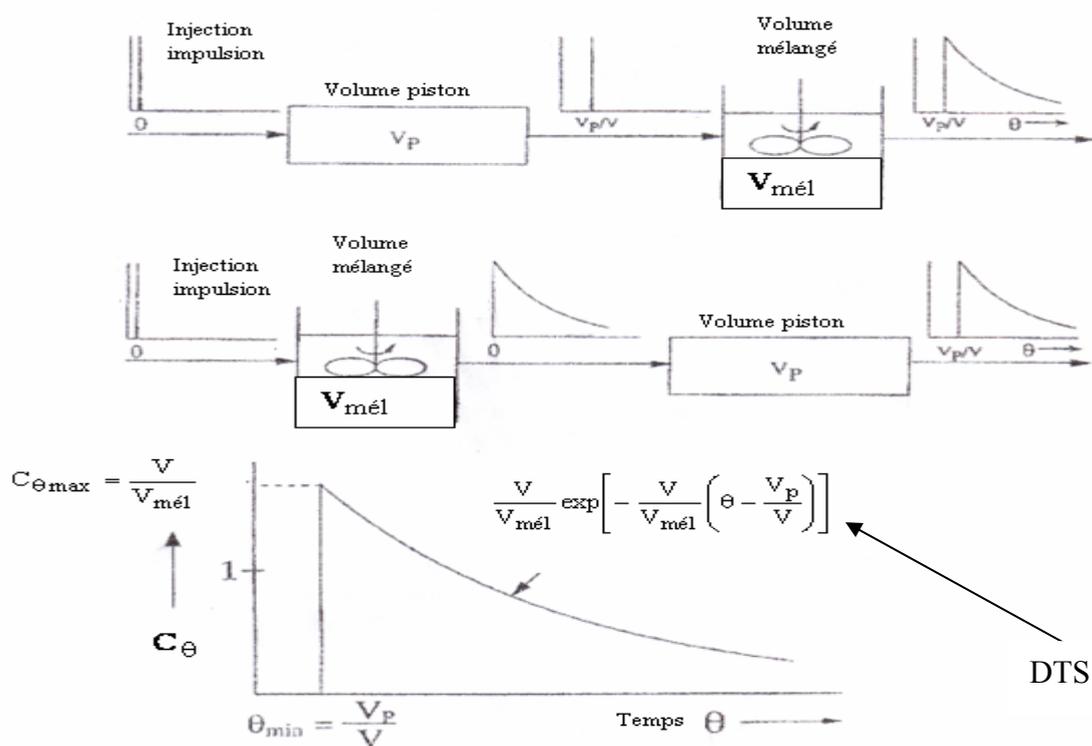


Figure II.9 : modèle mixte théorique

Ce modèle néglige la dispersion axiale ou longitudinale du traceur.

Se basant sur ce modèle, Kemeny et al [10] a proposé le calcul du volume piston par la

$$\text{formule suivante : } \frac{V_p}{V} = \theta_{\min} = \frac{t_{\min}}{t_{th}} \quad (\text{II-25}).$$

A.2. Le modèle mixte modifié :

Signalé par Sahai et Ahuja [18], le modèle mixte théorique présente deux défauts majeurs qui sont :

- La dispersion axiale ou longitudinale est présente dans le répartiteur et elle n'est pas négligeable causant la non égalité du $t_{\min} (\theta_{\min})$ et du $t_{\max} (\theta_{\max})$ ($t_{\min} \neq t_{\max}$ ou $\theta_{\min} \neq \theta_{\max}$), comme vu dans le modèle mixte théorique.

- La somme des différentes fractions volumiques n'est pas égale à l'unité.

Pour ces raisons, Sahai et Ahuja proposera un modèle mixte modifié pour le répartiteur. Au lieu de diviser le répartiteur en : un volume mort, volume piston et volume mélangé, ils ont définit dans le répartiteur : un volume mort, un volume piston dispersé et un volume mélangé c'est-à-dire le volume piston est remplacé par un volume piston dispersé calculé par la formule suivante :

$$V_{dp} = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2} = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2t_{th}} \quad (\text{II-26}).$$

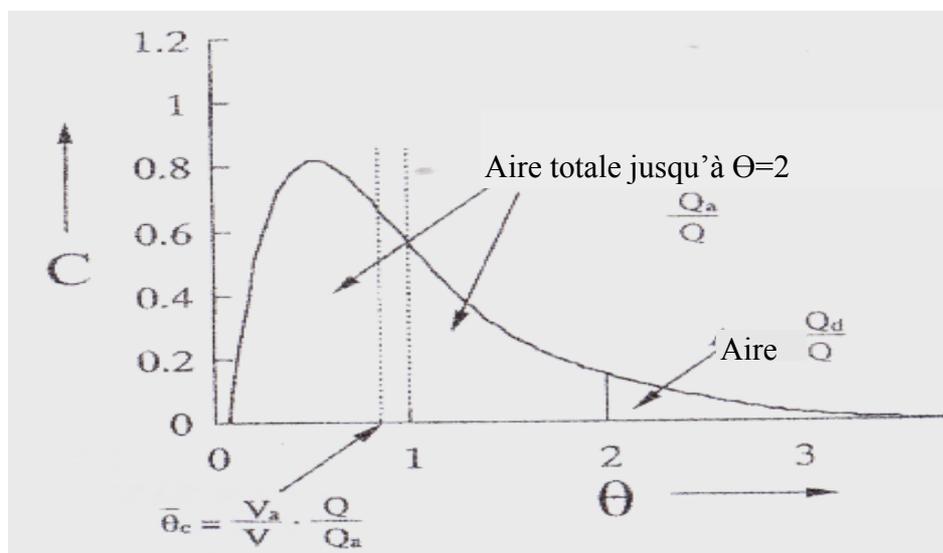


Figure II.10 : modèle mixte modifié

B. Calcul du volume mort :

D'après Levenspeil [22], le volume mort est obtenu après deux fois le temps théorique ($2 \times t_{th}$).

Il est plus convenable et pratique de mettre la courbe de réponse sous forme adimensionnelle de telle sorte que l'aire sous la courbe égale à l'unité.

$$\int_0^{\infty} C_{\theta} d\theta = 1 \tag{II-27}$$

D'où : $\theta = \frac{t}{t_{th}}$ (temps adimensionnel).

$$C_{\theta} = \frac{C}{C_0} \tag{II-28}$$

Ou

$$C_{\theta} = \frac{C t_{th}}{\int_0^{\infty} C dt} \tag{II-29}$$

D'où

$$C_0 = \frac{\text{Masse totale du traceur}}{\text{Volume du répartiteur}}$$

Pour le calcul de la fraction du volume mort trois approches ont été utilisés, les deux premières sont incorrectes et la dernière est correcte et qui sont :

1^{er} Approche : considère que le débit volumique dans le volume mort est nul ($Q_m = 0$).

C'est à dire l'aire sous la courbe de $\theta = 2$ à ∞ est égale à zéro, c'est-à-dire aussi qu'il n'y a pas d'échange du traceur entre la partie stagnante et l'écoulement principal, mais dans la réalité on observe une traînée de la courbe de DTS causée par cet échange, la formulation mathématique auquel est basée cette approche est la suivante :

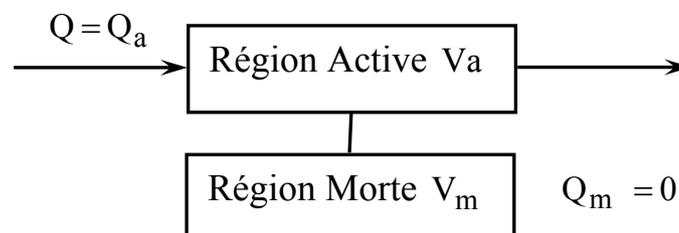


Figure II.11 : Débit traversant la région active et morte ($Q_m=0$) pour le modèle mixte

$$V = V_a + V_m \Rightarrow \frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_a}{V} \quad (\text{II-30}).$$

$$Q = Q_a + Q_m \quad (\text{II-31}).$$

$$\text{Puisque } Q_m = 0, \text{ la relation (II-31) devient : } Q = Q_a \quad (\text{II-32}).$$

$$\text{Sur cette courbe, on calcule tout d'abord : } \theta_c = \frac{\bar{t}}{t_{th}} = \frac{\frac{V_a}{Q_a}}{\frac{V}{Q}} = \frac{V_a}{V} \frac{Q}{Q_a}$$

Avec θ_c : temps de séjour moyen adimensionnel.

$$\Rightarrow \frac{V_a}{V} = \frac{Q_a}{Q} \theta_c \quad (\text{II-33}).$$

Avec \bar{t} : temps de séjour moyen.

$\frac{Q_a}{Q}$: est l'aire sous tendue par la courbe adimensionnelle jusqu'à $\theta=2$, représente la

fraction du débit volumique correspondant à la zone active. Substituant (II-32) dans (II-33), on aura :

$$\frac{V_a}{V} = \theta_c \quad (\text{II-34}).$$

Substituant (II-34) dans (II-30), on obtient :

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \theta_c \quad (\text{II-35}).$$

2^{ème} Approche : considère la fraction du volume mort égale à l'aire sous la courbe de $\theta = 2$ jusqu'à ∞ calculée par la formule suivante :

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} = 1 - \sum_{\theta=2}^{\infty} C_{\theta} \Delta\theta \quad (\text{II-36}).$$

On remarque que cette approche implique que :

$$\theta_c = 1 \Rightarrow \bar{t} = t_{th}, \text{ ce qui est incorrect.}$$

3^{ème} Approche : corrigé par Sahai et Emi [13] et qui rassemble les deux formules précédentes (II-35) et (36) en une seule formule qui prend en considération l'échange de traceur.

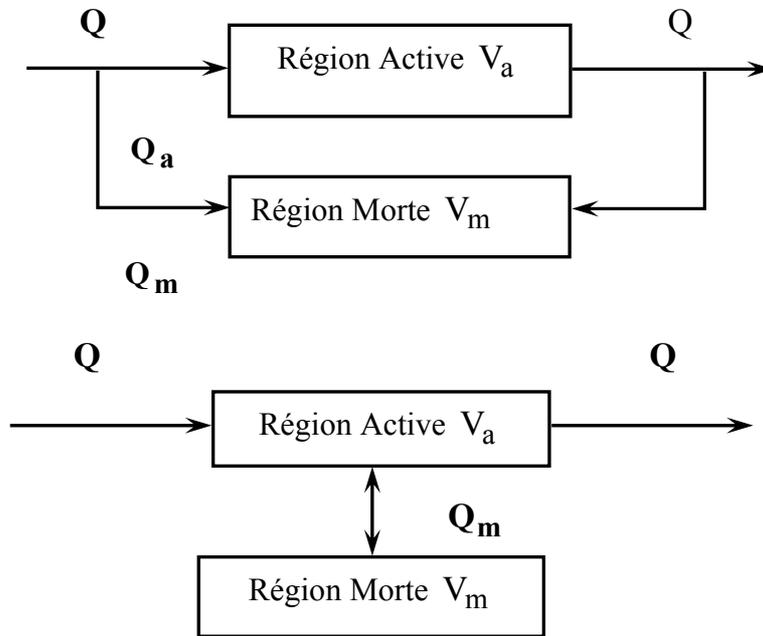


Figure II.12 : Débit traversant la région active et morte ($Q_m \neq 0$)

On obtient :

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \theta_c \tag{II-37}.$$

Avec : $\frac{Q_a}{Q} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_{\theta} \Delta\theta}{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_{\theta}}$

$$\theta_c = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} \theta C_{\theta}}{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_{\theta}}$$

C. Calcul du volume mélangé :

Le calcul de la fraction du volume mélangé se calcule de deux façons :

La première utilise le modèle mixte théorique :

$$V_{\text{mél}} = 1 - V_p - V_m \tag{II-38}$$

Ou :

$$V_{\text{mél}} = \frac{1}{C_{\text{max}}} \tag{II-39}$$

La deuxième utilise le modèle mixte modifié :

$$V_{\text{mél}} = 1 - V_{dp} - V_m \tag{II-40}$$

II.8.5. Résumé de la procédure de calcul des paramètres de la DTS :

1- $t_{th} = \frac{\text{Volume du répartiteur}}{\text{Débit volumique}} = \frac{V}{Q}$ (temps théorique)

2- $\bar{t} = \frac{\int_0^{2t_{th}} t C(t) dt}{\int_0^{2t_{th}} C(t) dt}$ (temps de séjour moyen)

3 - Temps minimum t_{\min} : temps de début de réponse sortie.

4 - Temps maximum t_{\max} : temps ou la concentration atteint son maximum.

5- $V_{dp} = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2} = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2t_{th}}$ (volume piston dispersé)

6- $\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \theta_c$, avec : $\frac{Q_a}{Q} = \sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_{\theta} \Delta\theta$ et $\theta_c = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} \theta C_{\theta}}{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_{\theta}}$ (volume mort)

7- $V_{\text{mél}} = 1 - V_{dp} - V_m$ (volume mélangé)

CHAPITRE III : FORMULATION MATHÉMATIQUE

L'écoulement tridimensionnel, permanent, isotherme et turbulent de l'acier liquide (ou de l'eau liquide choisit dans notre travail) est régi par l'équation de continuité et les équations de « Navier Stokes ».

Le modèle de turbulence choisie est le modèle k-ε.

III .1. Equation de continuité :

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III-1}).$$

III .2. Equations de transport de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (\text{III-2}).$$

D'où :

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (\text{III-3}).$$

III .3. Modèle de turbulence k-ε standard :

Il est basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds aux taux de déformations moyens.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (\text{III-4}).$$

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) et une distance (libre parcours moyen), la viscosité turbulente est caractérisée par une vitesse \sqrt{k}

et une distance $(l = \frac{k^2}{\varepsilon})$ D'où :

$$k = \frac{\overline{u'^2}}{2}$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

k et ε sont obtenus à partir de leurs équations de transports :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad \text{(III-5)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{(III-6)}$$

$$\text{Avec } G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]$$

Les différents coefficients : $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ sont déterminés empiriquement alors que :

σ_k , σ_ε Sont des nombres de Prandtl turbulents relatifs à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation.

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1	1.3

III .4. Equation de transport de l'espèce : (équation de la concentration du traceur) :

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad \text{(III-7)}$$

$$D'ou : D_{\text{eff}} = D + \frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho \text{sct}}$$

Avec un nombre de Schmidt turbulent : $\text{sct} = 1$

Cette équation est utilisée afin de déterminer la courbe de la distribution du temps de Séjour obtenue par la procédure suivante :

Après la simulation de l'écoulement de l'eau liquide dans le répartiteur, on crée une Perturbation sur l'écoulement par l'injection d'un traceur et on mesure la réponse du Système à la sortie dans le temps.

La courbe du (DTS) est une représentation statistique de la concentration adimensionnelle en fonction du temps adimensionnel, l'analyse de cette courbe nous permet de déterminer les trois volumes existants dans le système : Volume mélangé, volume piston, volume mort.

CHAPITRE IV : PROCEDURE DE RESOLUTION PAR FLUENT

IV.1. Présentation du code fluent :

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul commercial FLUENT que nous présentons dans cette partie.

Comme tout logiciel de CFD, il est composé de trois éléments : le **préprocesseur**, le **solveur** et le **postprocesseur**.

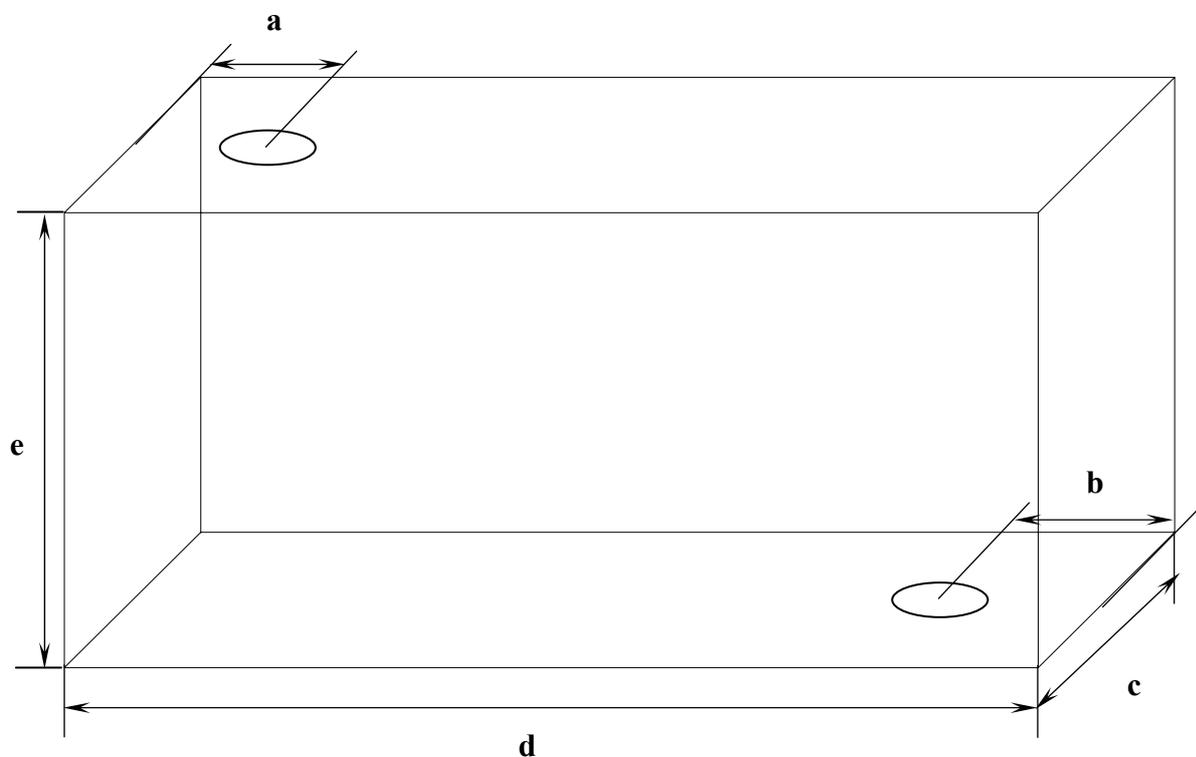
La définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du **préprocesseur** GAMBIT. Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du domaine, de spécifier le type de matériaux (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine, en proposant plusieurs algorithmes de maillage suivant sa géométrie.

Le **solveur** permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Enfin, il permet de choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression. Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

Le **postprocesseur** est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs du vecteur vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules.

Fluent, code largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile, offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Ces raisons ont motivé notre choix pour l'utilisation de ce logiciel.

IV.2. Géométrie : géométrie de Zhu Miaoyong et al (échelle 1/3)

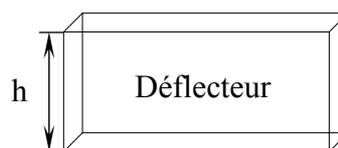
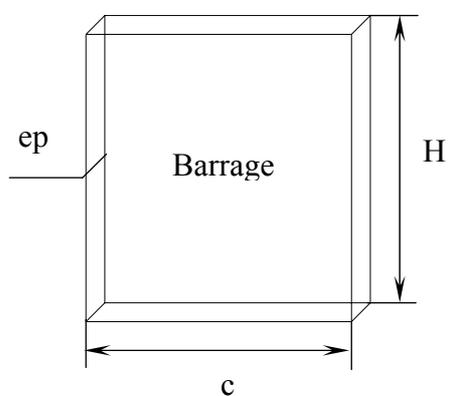


$a = 0,18 \text{ m.}$ $c = 0,316 \text{ m.}$ $e = 0,316 \text{ m.}$

$b = 0,11 \text{ m.}$ $d = 1,37 \text{ m.}$

$\varnothing \text{ entrée} = \varnothing \text{ sortie} = 0,0285 \text{ m.}$

Géométrie des dispositifs de contrôle :



$H = 0,316 \text{ m.}$ $ep = 0,028 \text{ m.}$ $h = 0,111 \text{ m.}$ $c = 0,316 \text{ m.}$

On note seulement que la moitié de la géométrie qui sera simulé à cause de la présence d'une symétrie dans le plan longitudinal.

IV.3. Maillage :

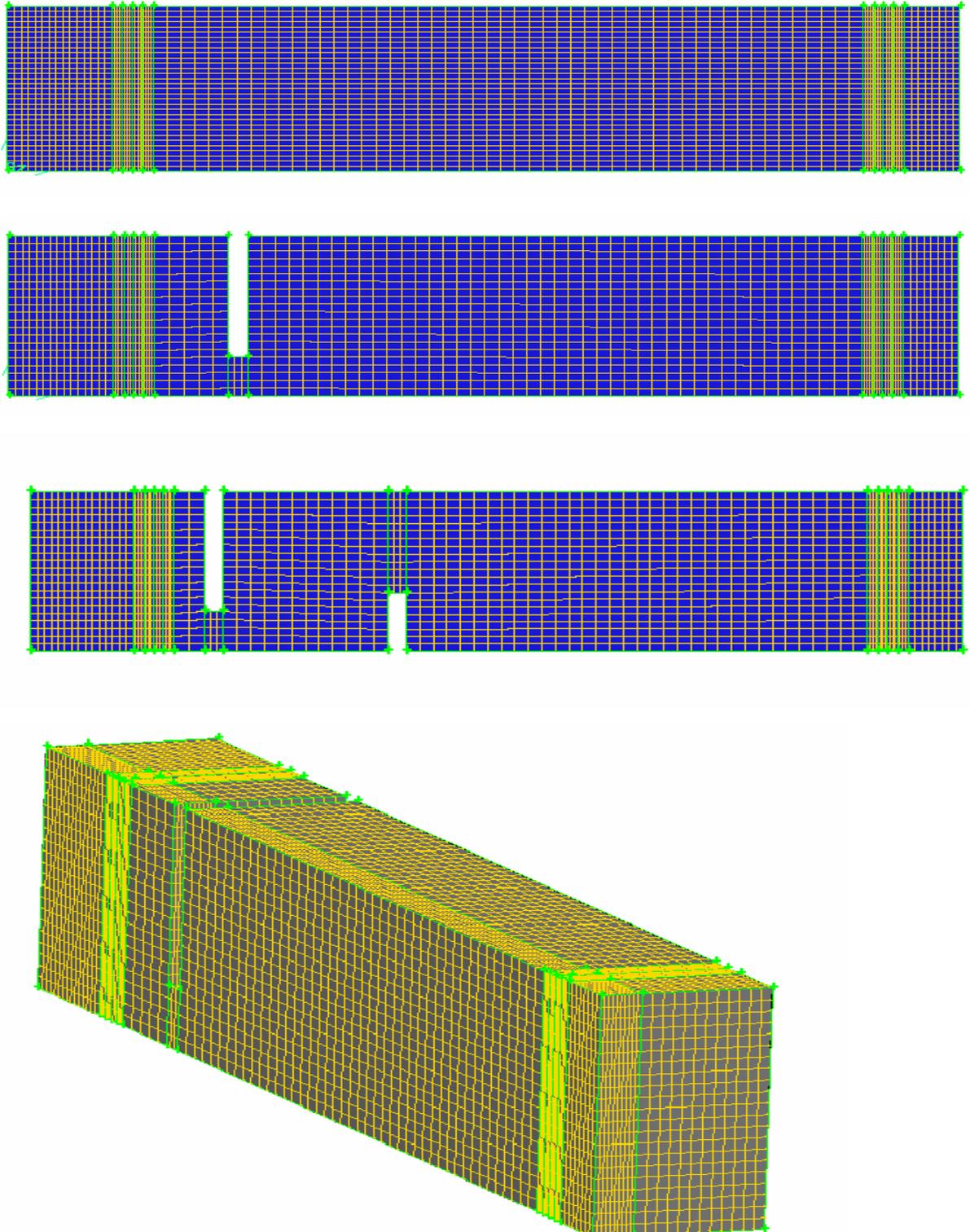


Figure IV-1 : Le maillage

IV.4. Conditions aux limites :

IV.4.1 entrée : Pour l'entrée c'est une condition de vitesse d'entrée « velocity inlet » pour le fluide (eau liquide) avec des paramètres de turbulences à l'entrée :

$$k_{in} = 0.01 U_{in}^2, \quad \epsilon_{in} = \frac{2k_{in}^{1.5}}{D_{in}} \quad [2], [3], [4], [19]$$

	Modèle $K - \epsilon$
Vitesse d'entrée (m/s)	0.545
Energie cinétique turbulente (m ² /s ²)	2.97 e-0.3
Taux de dissipation (m ² /s ³)	1.1359 e-0.2
Débit (l/h)	1251

Traceur : on a utilisé une substance qui a été employé expérimentalement par G. Solorio-Diaz et al [2]. cette substance a les mêmes propriétés physiques que l'eau liquide avec une concentration C= 35 g/l et une quantité de 20 cm³.

D'après villermaux [21] le traceur doit être injecté pendant un temps inférieur à 0.01* t_{th}.

Puisque t_{th} = 394 s ,donc le traceur sera injecté pendant une durée de 3 secondes.

IV.4.2 Sortie :

On a imposé seulement le rapport du débit entrant au débit sortant égal à 1

IV.4.3 Parois :

C'est une condition de non glissement, sans transfert de chaleur. Pour le traitement près des parois, on a utilisé « **la fonction de paroi standard** » (standard wall function).

IV.4.4 Plan de symétrie :

Le gradient de la variable suivant la direction perpendiculaire au plan de symétrie est nul.

IV.4.5 La surface libre : condition de cisaillement nul (zéro shear stress)

Le gradient de la variable suivant la direction perpendiculaire à la surface libre est nul.

IV.5. Conditions initiales :

A $t=0$, $C=0$

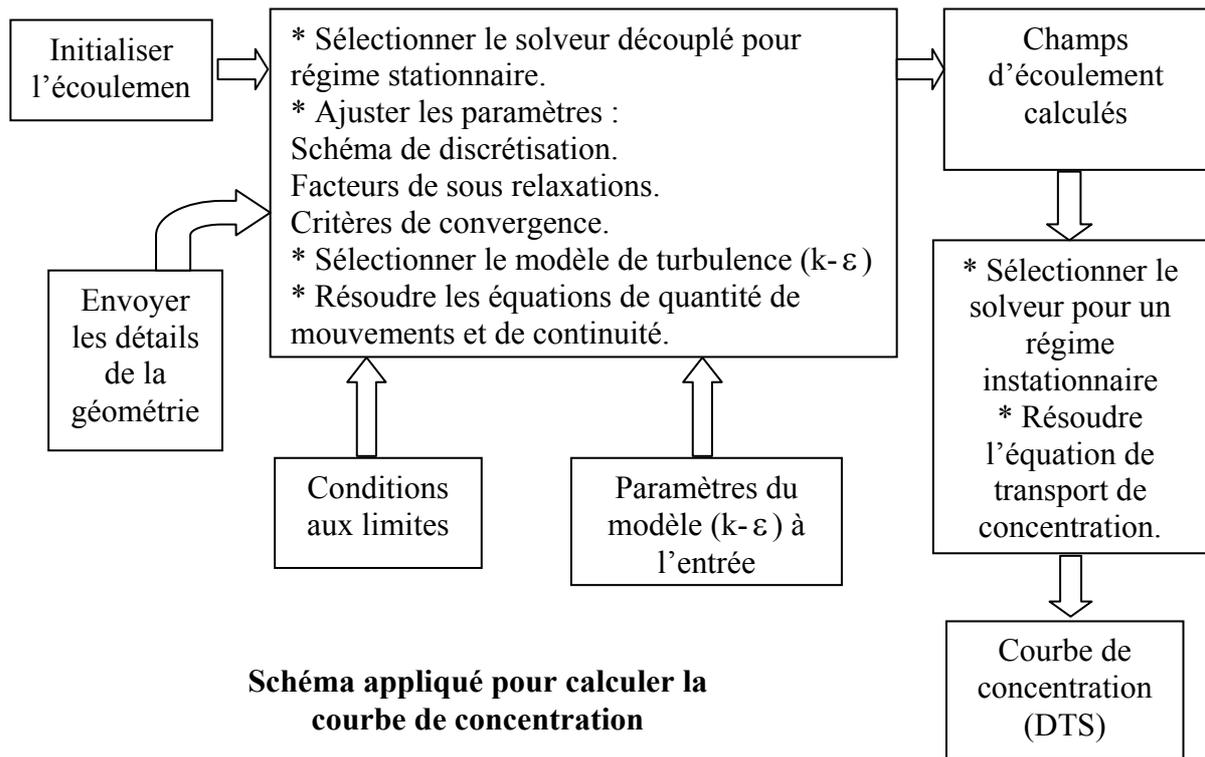
$$\text{A } t > 0, \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right)$$

IV.6. Schémas de discrétisation :

MODELE	K- ε
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Schémas 1 ^{er} ordre amont
Couplage vitesse - pression	Simple
Energie cinétique turbulente	Schémas 1 ^{er} ordre amont
Taux de dissipation	Schémas 1 ^{er} ordre amont
Concentration	Schémas 1 ^{er} ordre amont

IV.7. Procédure de résolution :

Pour étudier l'écoulement dans le répartiteur on a utilisé la notion de distribution des temps de séjour (DTS) c'est-à-dire obtenir la courbe de DTS afin de l'analyser et sortir avec des informations précieuses sur l'écoulement et pour cela on a opté pour le schéma suivant:



Explication du schéma :

- Faire le calcul de l'écoulement du fluide pour le cas stationnaire.
- Créer une injection impulsion du traceur pendant 3 secondes.
- Faire le calcul de la dispersion du traceur en régime instationnaire.
- Obtenir la courbe de distribution du temps de séjour (DTS).

IV.8. Étude paramétrique :

L'objectif principal des dispositifs de contrôle est de favoriser la décantation des inclusions non métalliques et cela est effectué en jouant sur un temps de séjour du traceur plus grand dans le répartiteur en diminuant la zone morte (zone de recirculation), d'une autre façon donner un temps suffisant pour que les inclusions se décantent. Leur donner aussi un bain calme car les inclusions ne peuvent pas se décanter dans une zone agitée ceci est assuré par la limitation de la zone de mélange tout en augmentant la zone piston.

L'influence des ces dispositifs de contrôle sur l'écoulement a été étudié comme suivant :

- Le barrage a pour rôle de limiter la zone de mélange, donc il doit être proche de l'entrée donc l'intervalle que doivent être les positions, c'est entre l'entrée et le milieu du barrage.
- Le déflecteur a pour rôle de diriger les inclusions vers la couche de laitier, c'est le même intervalle qui a été pris pour le barrage.
- Pour l'arrangement (barrage +déflecteur), le barrage est maintenue à sa position optimale, et le déflecteur doit être déplacé à des positions comprise dans l'intervalle : entre le barrage et le milieu du répartiteur.

CHAPITRE V:RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1 Validation de la procédure de calcul

V.1.1 Effet de maillage :

La figure (V.1) montre les profils de vitesse longitudinale en fonction de la position longitudinale (le long du répartiteur) dans le plan de symétrie ($z=0.158$ m) à $y=0.158$ m. Les trois courbes obtenues avec des maillages constitués de : **36928** ,**48468** et **73856** cellules hexaédriques .la différence entre les solutions n'est pas vraiment importante. Dans le présent travail et pour cette géométrie l'étude a été faite avec un maillage composé de 48468 cellules.

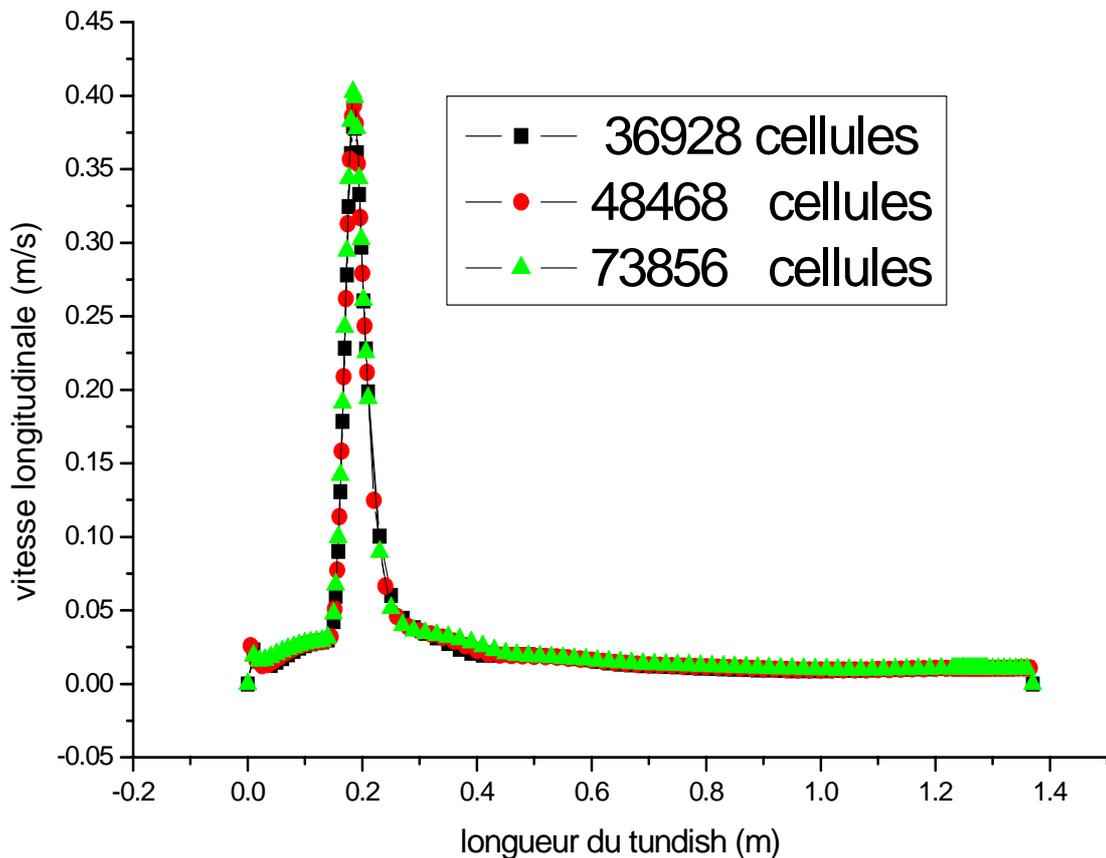


Figure V.1 : Test d'indépendance du maillage

V.1.2 Effet des critères de convergence :

La convergence sous fluent est principalement surveillé suivant la valeur des résidus des différents paramètres de l'écoulement .le logiciel cessera dès lors que tous les résidus calculés soient sous la valeur du critère de convergence entré par l'utilisateur .cette valeur est à fixer selon le degré de précision désiré de la solution approché par le code de calcul.

La figure (V.2) montre l'influence des critères de convergence sur le calcul de la vitesse longitudinale en fonction de la longueur du répartiteur (même position précédente).on remarque qu'il y a pour les deux critères de convergence ($R= 0.0001$ et $R=0.00001$) une superposition parfaite entre les deux graphes mais une légère déviation entre les derniers par rapport au graphe travaillant avec $R=0.001$. Dans le présent travail on prendra la valeur du critère de convergence égale à 0.00001 .

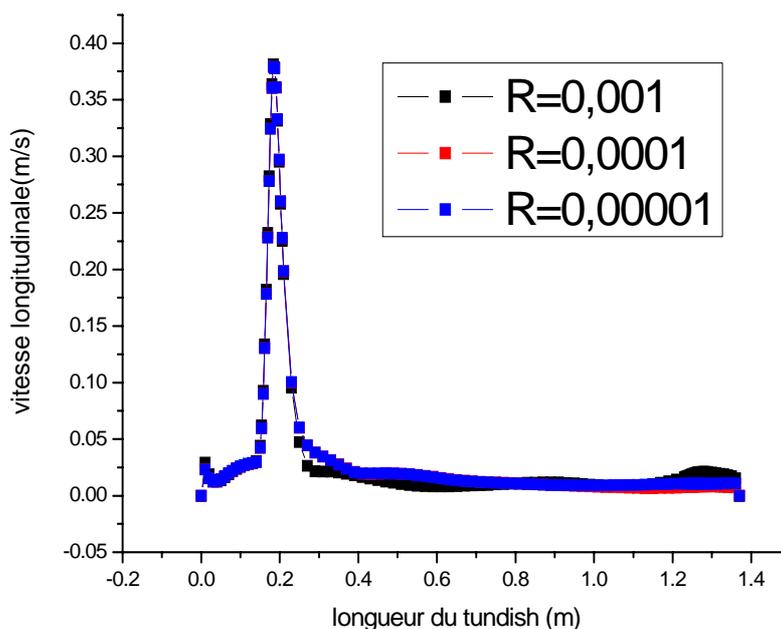


Figure V.2 : influence des critères de convergence sur la solution

V.1.3 Validation :

La validation de la procédure de simulation par le logiciel FLUENT a été examinée et vérifiée par deux manières :

V.1.3.1 Comparaison de l'évolution de la vitesse longitudinale en fonction de la longueur du répartiteur :

Lifeng Zhang a validé les résultats expérimentaux de Lee et al [16], il a travaillé avec un répartiteur type modèle à une sortie avec une géométrie similaire à notre présent travail mais avec des dimensions et des conditions d'entrée différentes (voir figure V.3). En comparant nos résultats avec ces résultats numériques, on a remarqué que l'allure de la vitesse longitudinale en fonction de la longueur du répartiteur dans la même position c'est-à-dire (plan de symétrie, et à $\frac{1}{2}$ de la hauteur du répartiteur) est presque la même, donc nous constatons un bon accord entre les deux résultats (voir figure V.4)

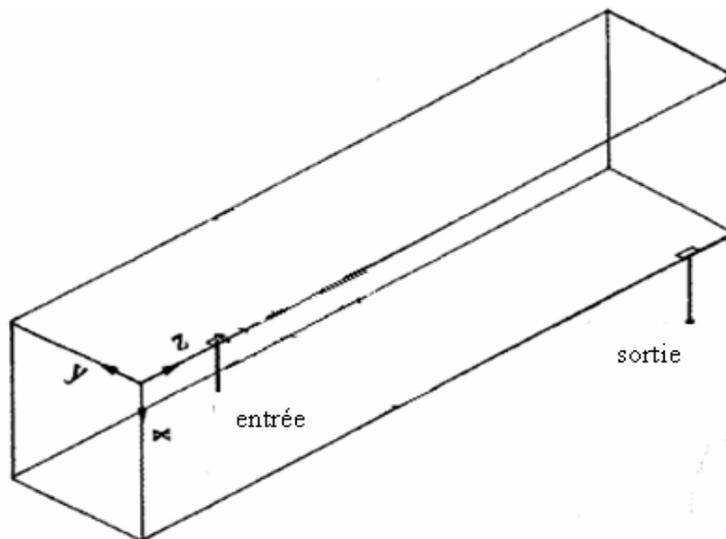


Figure V.3 : Géométrie de Lee et al

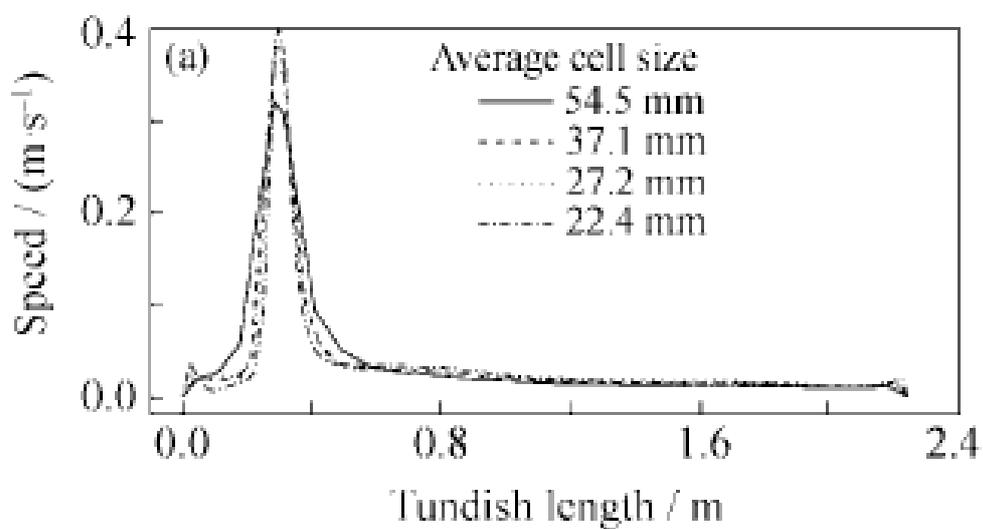
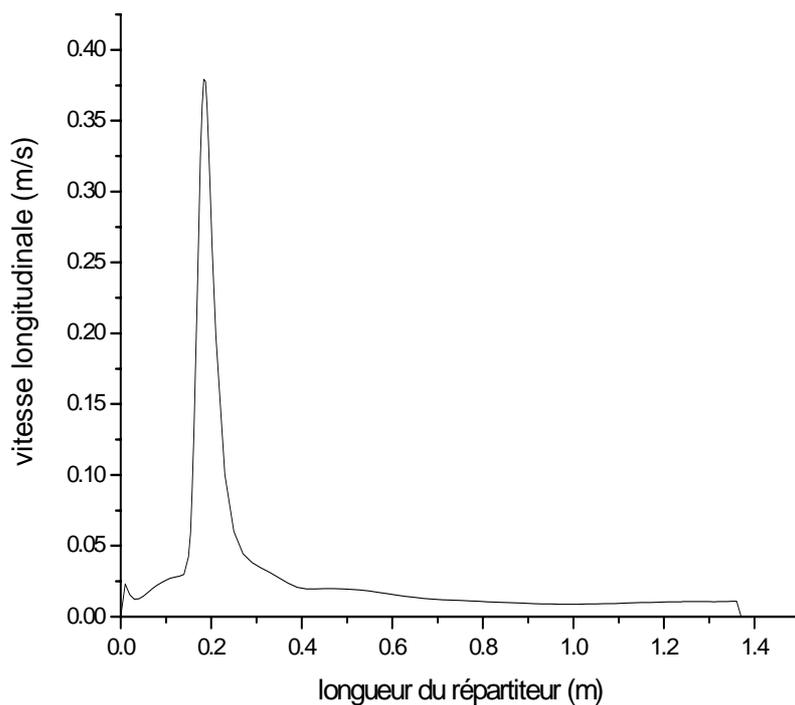


Figure V.4: Comparaison des résultats obtenus avec ceux de Lifeng Zhang (2005) [1]

V.1.3. 2 Comparaison des vecteurs de vitesse pour différents plans :

Plan de symétrie ($z=0.158$ m) :

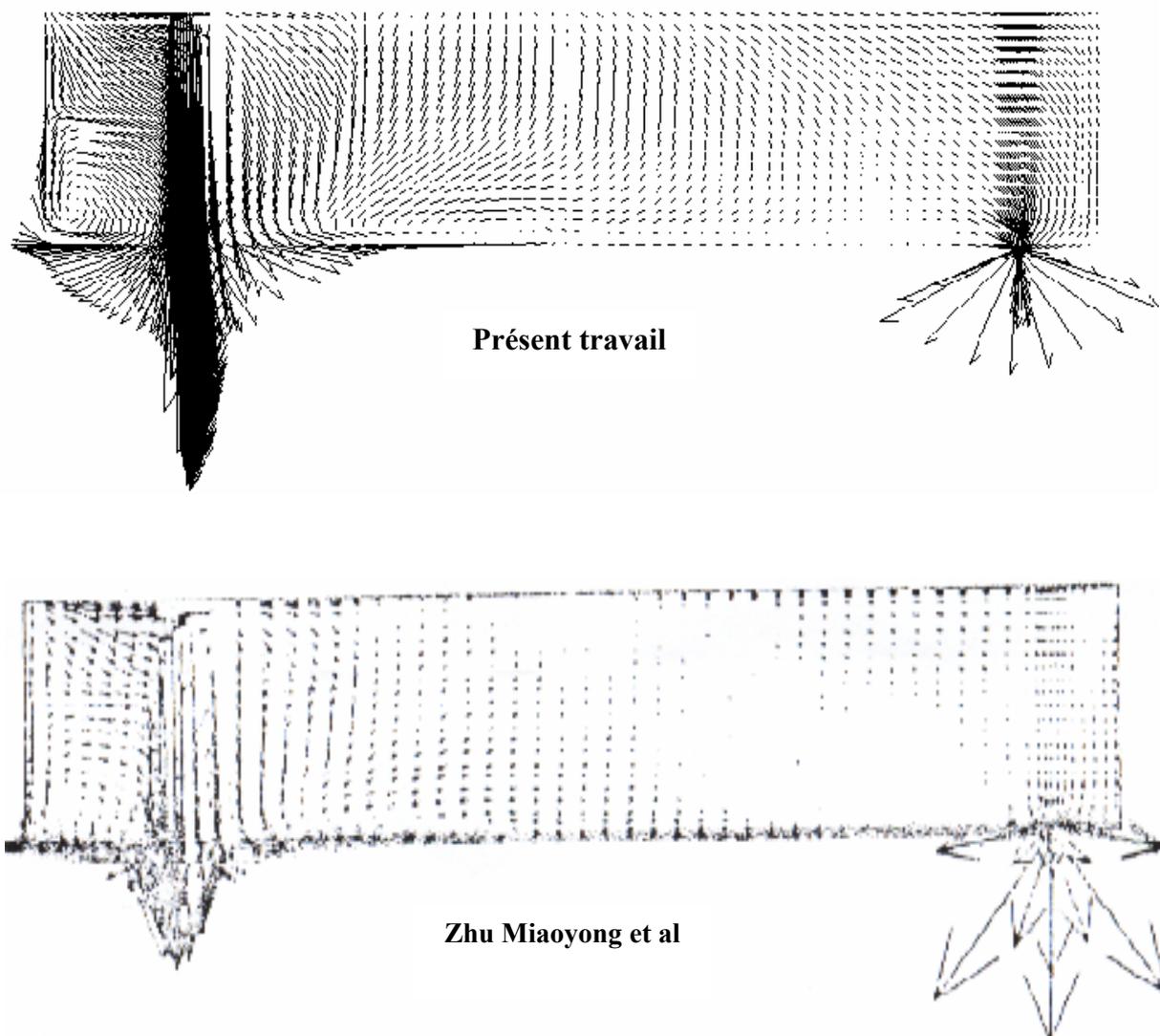
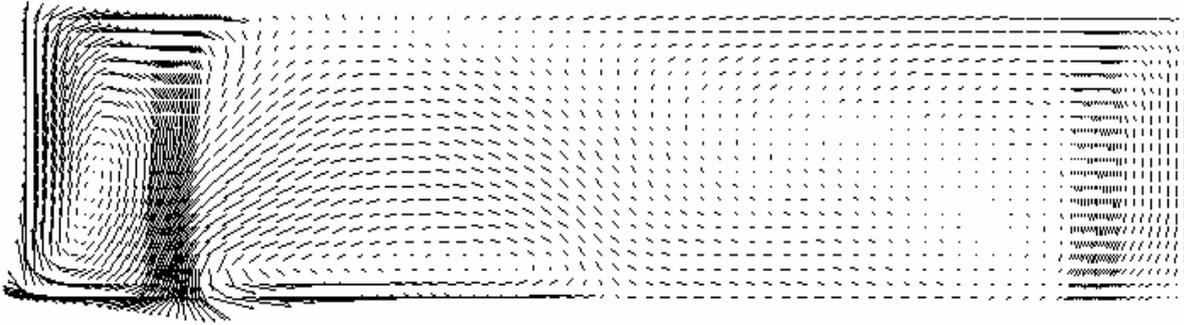
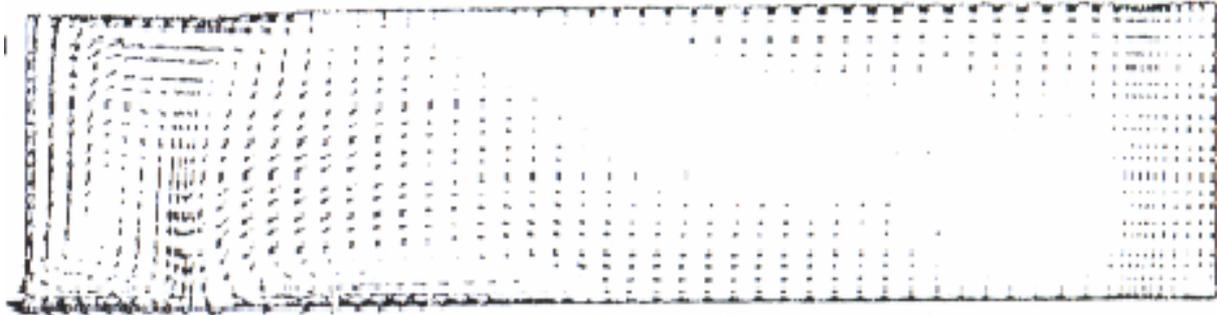


Figure V.5 : Comparaison de vecteurs de vitesse avec Zhu Miaoyong et al [19] dans le plan de symétrie

Plan $\frac{1}{4}$ ($z=0.079$ m) :



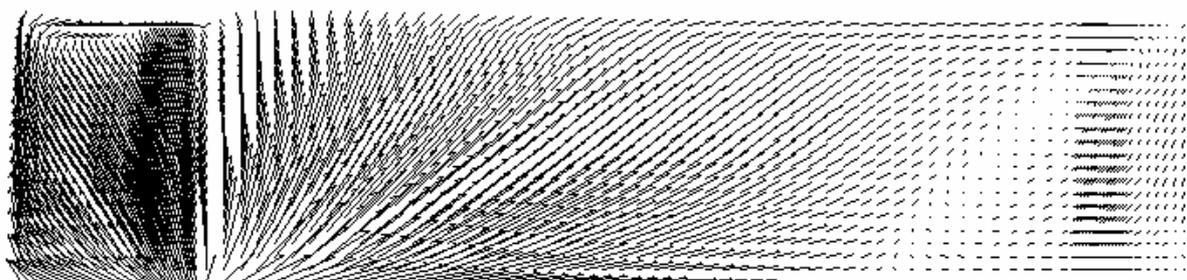
Présent travail



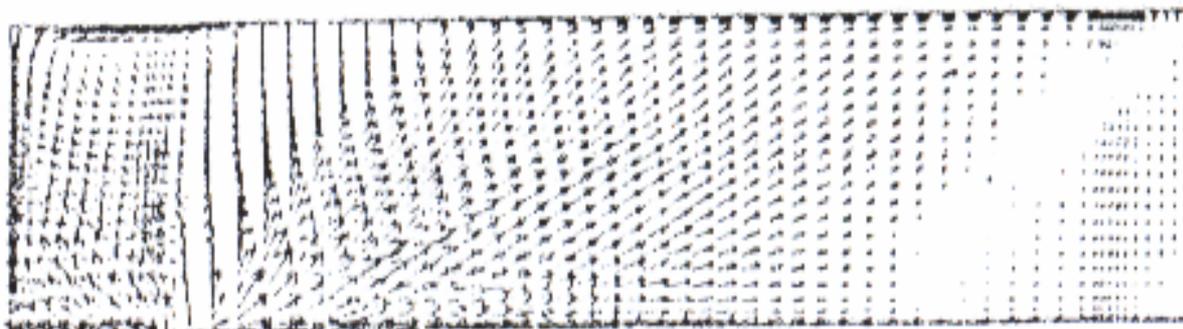
Zhu Miaoyong et al

Figure V.6 : Comparaison de vecteurs de vitesse avec Zhu Miaoyong et al [19]
Dans le plan $\frac{1}{4}$ ($z=0.079$)

Plan près de la paroi arrière ($z=0$ m) :



Présent travail



Zhu Miaoyong et al

Figure V.7 : Comparaison de vecteurs de vitesse avec Zhu Miaoyong et al [19] dans le plan près de la paroi arrière ($z=0$)

Les figures (V.5) et (V.6) et (V.7) montrent bien un bon accord sur les vecteurs de vitesses dans les trois plans entre le présent travail avec ceux de **Zhu Miaoyong et al**.

V.2 Calcul des performances des différentes configurations géométriques utilisant l'analyse de la distribution des temps de séjour (DTS) :(Etude paramétrique)

V.2.1 comportement de l'écoulement au sein du répartiteur sans dispositifs de contrôle :

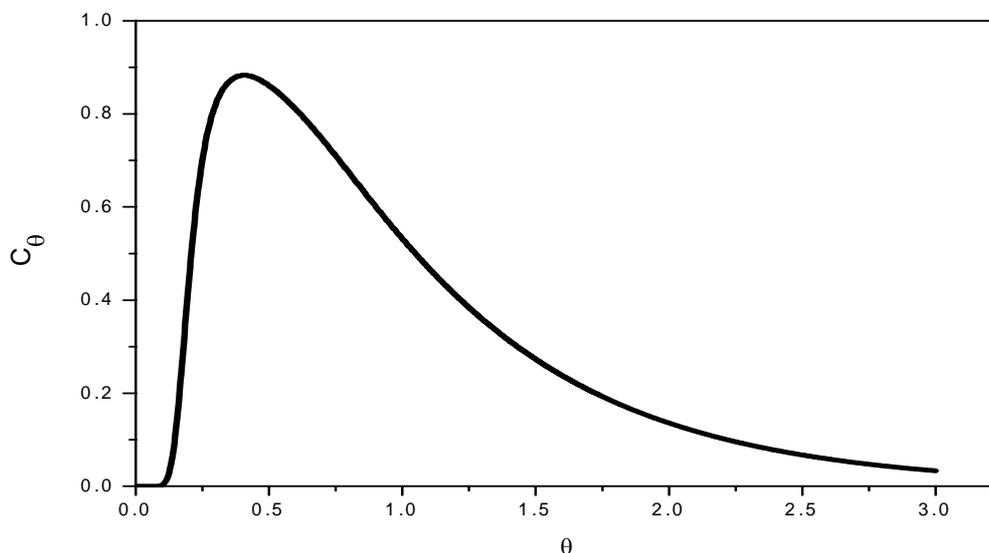


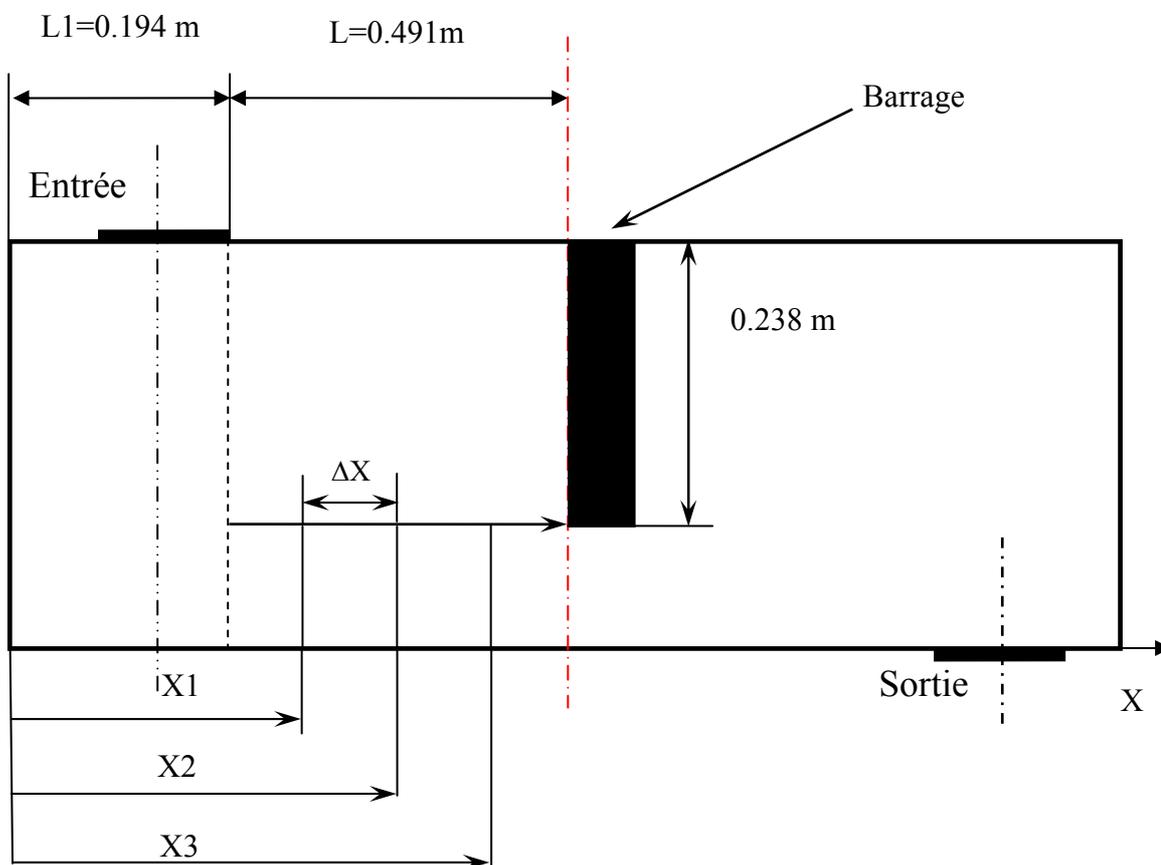
Figure V.8 : Courbe de DTS pour le répartiteur sans dispositifs de contrôle

t_{th}	(s)	394
t_{min}	(s)	40.2423
t_{max}	(s)	160
\bar{t}	(s)	328,915
V_{dp} / V	(%)	25.41146
V_m / V	(%)	24,54848
$V_{mél} / V$	(%)	50.04007

Tableau V.1 : Paramètres de la DTS pour le répartiteur sans dispositifs de contrôle

V.2.2 Comportement de l'écoulement au sein du répartiteur avec barrage :

V.2.2.1 Etude de l'influence du barrage avec optimisation de son emplacement:



Position 1 : $X_1=0.31675\text{ m}$.

Position 2 : $X_2=0.4395\text{ m}$.

Position 3 : $X_3=0.56225\text{ m}$.

$\Delta X=0.12275\text{ m}$

Figure V.9 : Différentes positions du barrage adoptés

L'influence du barrage sur l'écoulement du fluide dans le répartiteur sera **en premier lieu** examinée et investigué pour trois positions (X_1 , X_2 , X_3), et l'optimisation sera pour une position du barrage qui donnera un temps de séjour moyen supérieur ou tout simplement optimal en optant pour un système par élimination.

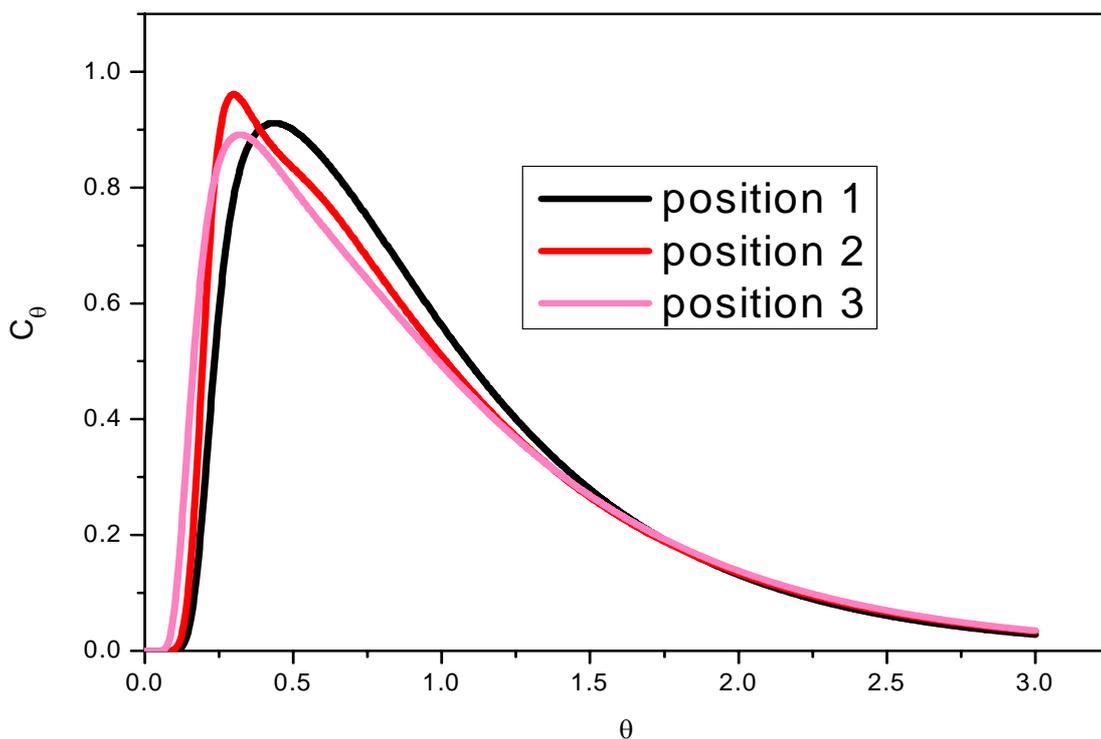


Figure V.10 : Courbe de DTS pour le répartiteur avec barrage en fonction des trois positions

	X=X1	X=X2	X=X3
t_{th} (s)	394	394	394
t_{min} (s)	44	38	25
t_{max} (s)	172	118	126
\bar{t} (s)	333.88	321.6155	318.1766
V_{dp}/V (%)	27.41117	19.79695	19.16244
V_m/V (%)	22.43	26.23761	27.34973
$V_{mél}/V$ (%)	50.15889	53.96543	53.48783

Tableau V.2 : Paramètres de la DTS pour le répartiteur avec barrage pour différentes positions

A. Analyses et discussions :

En examinant les deux tableaux (V.2) et (V.3) et en consultant les fractions de la zone de mélange pour les différentes positions, on confirme le rôle du barrage qui a pour but de limiter la zone de mélange car si on fait rapprocher le barrage de l'entrée, la zone de mélange diminue et le contraire si on le fait éloigner de l'entrée, la zone de mélange augmente.

D'après le tableau (V.2) et en comparant les paramètres de la DTS pour les trois positions on remarque une augmentation du temps de séjour si on fait rapprocher le barrage de l'entrée, ceci est expliqué d'une part par la diminution du volume mort et d'autre part par l'augmentation de la zone piston. Cette augmentation est causée par l'augmentation du terme $(t_{\min} + t_{\max})$ (voir formule : II.33) qui engendre une augmentation automatique du temps de séjour moyen.

La différence entre les trois positions du barrage en matière de temps de séjour peut être expliquée autrement par la différence dans l'éloignement de chaque courbe de l'axe de concentration par rapport à une autre, c'est-à-dire la courbe qui se décale bien de l'axe par rapport aux autres courbes c'est elle qui offre le meilleur temps de séjour car ce décalage se fait dans le temps. En se référant à la figure (V.10), on voit bien cette différence entre les trois courbes qui se manifeste par un décalage qui augmente, si on déplace le barrage de la position $X=X_3$ jusqu'à $X=X_1$.

Comme constat, on déduit que la meilleure position du barrage pour l'instant est située à $X=X_1$, car elle offre le meilleur temps de séjour par rapport aux autres positions.

Comme remarqué avant, un temps de séjour qui augmente si on rapproche le barrage de l'entrée donc la recherche sera lancée pour la position $X=X_1$ et des positions situées entre cette dernière et l'entrée, ces positions sont : $X=X_1 - \Delta X/2$ et $X_1 - 3\Delta X/4$.

B. Comparaison entre les positions : ($X=X1$), ($X=X1-\Delta X/2$) et ($X=X1-3\Delta X/4$):

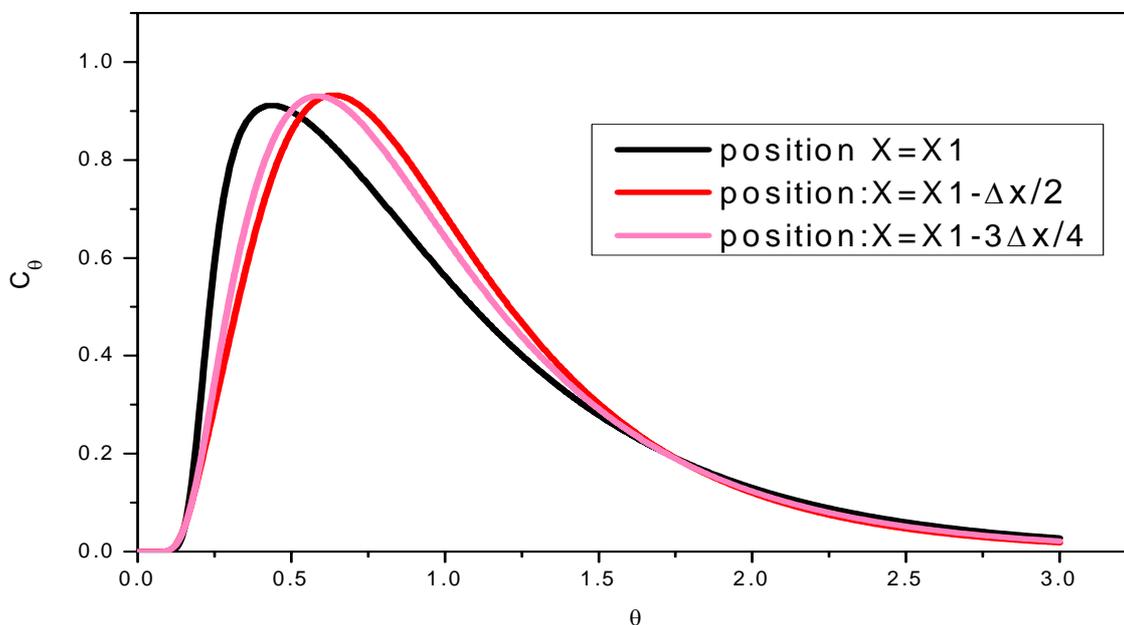


Figure V.11 : Courbe de DTS pour le répartiteur avec barrage en fonction des positions ($X=X1$, $X=X1-\Delta X/2$, $X=X1-3\Delta X/4$)

		$X=X1$	$X=X1-\Delta X/2$	$X1-3\Delta X/4$
t_{th}	(s)	394	394	394
t_{min}	(s)	44	38	39
t_{max}	(s)	172	251	230
\bar{t}	(s)	333.88	353.2724	346.7579
V_{dp}/V	(%)	27.41117	36.67513	34.13706
V_m/V	(%)	22.43	16.02903	18.22644
$V_{mél}/V$	(%)	50.15889	47.29584	47.6365

Tableau V.3 : Paramètres de la DTS pour le répartiteur avec barrage en fonction des positions ($X=X1$, $X=X1-\Delta X/2$, $X=X1-3\Delta X/4$)

C. Analyses et discussions :

Après examen du tableau (V.3) et en comparant les trois positions du barrage on remarque que le barrage à la position $X = X_1 - \Delta X/2$ est la meilleure position, car elle donne le temps de séjour le plus grand, ceci est confirmé et prouvé aussi par la figure (V.11) qui montre la différence entre les trois courbes par leur éloignement de l'axe de la concentration. En fin, puisque on a atteint la position critique situé à $X_1 - 3\Delta X/4$, où on constate une diminution du temps de séjour et puisque le temps séjour à $X = X_1$ est inférieur à $X = X_1 - \Delta X/2$, on confirme que la position du barrage à $X = X_1 - \Delta X/2$, est la position qui offre le meilleur temps de séjour.

Donc, on conclut en portant comme choix optimale de la position du barrage à $X = X_1 - \Delta X/2$.

V.2.3 Comportement de l'écoulement au sein du répartiteur avec déflecteur :

V.2.3.1 Etude de l'influence du déflecteur et l'optimisation de son emplacement :

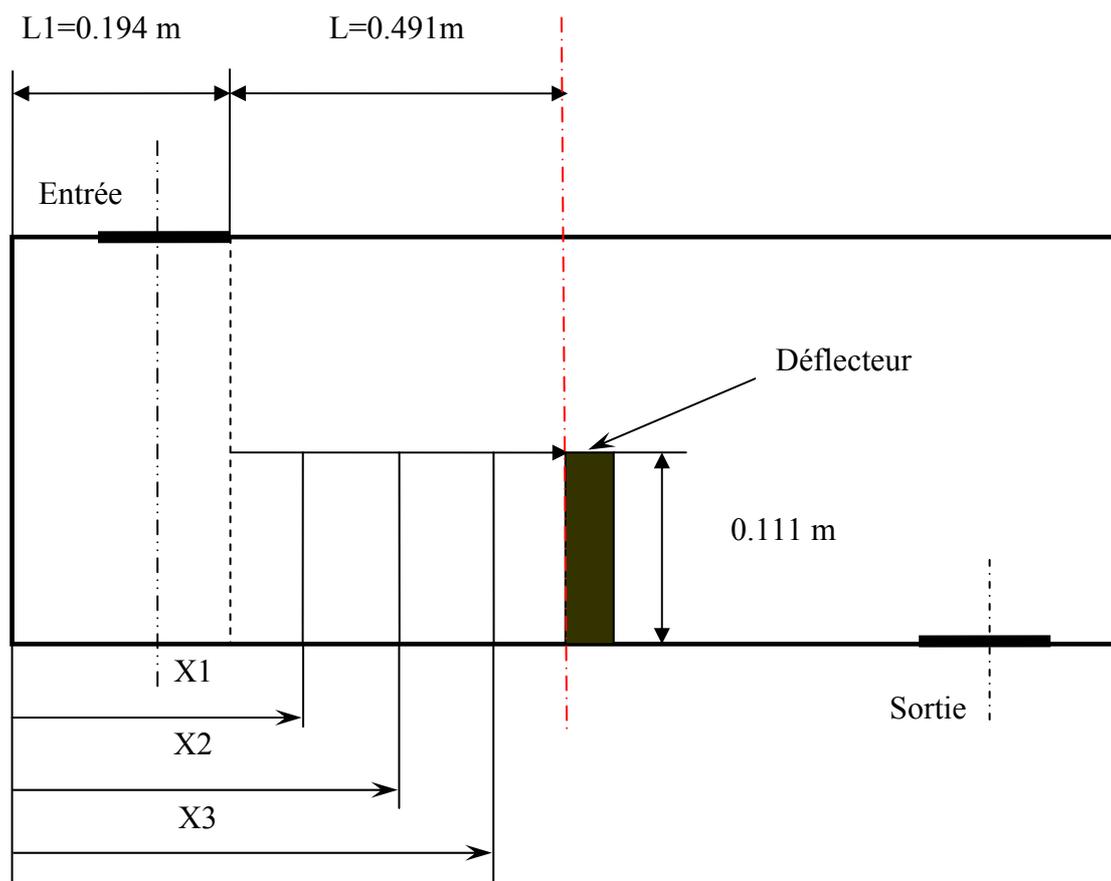
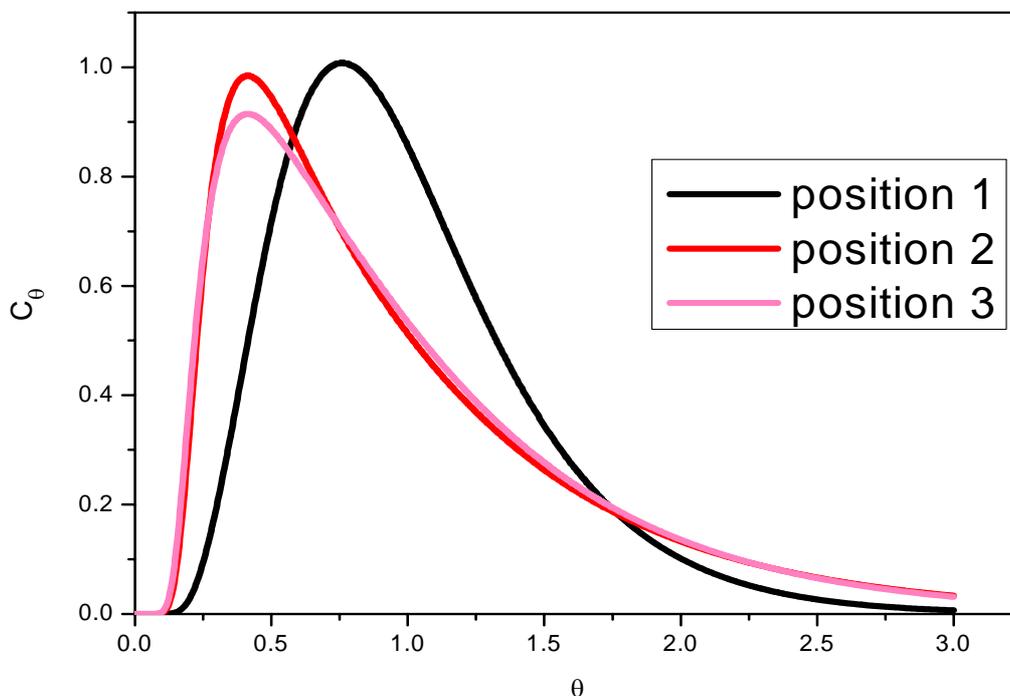


Figure V.12 : Différentes positions du déflecteur adoptés

L'étude de l'influence et l'optimisation du déflecteur ont été vérifiées en testant les mêmes positions du barrage.



**Figure V.13 : Courbe de DTS pour le répartiteur avec déflecteur
En fonction des trois positions**

		X=X1	X=X2	X=X3
t_{th}	(s)	394	394	394
t_{min}	(s)	57	39	37
t_{max}	(s)	299	163	163
\bar{t}	(s)	376.4917	325.4463	330.0909
V_{dp}/V	(%)	45.17767	25.63452	25.38071
V_m/V	(%)	8.04148	25.32167	23.9752
$V_{mél}/V$	(%)	46.78085	49.04381	50.64409

**Tableau V.4 : Paramètres de la DTS pour le répartiteur
avec déflecteur pour différentes positions**

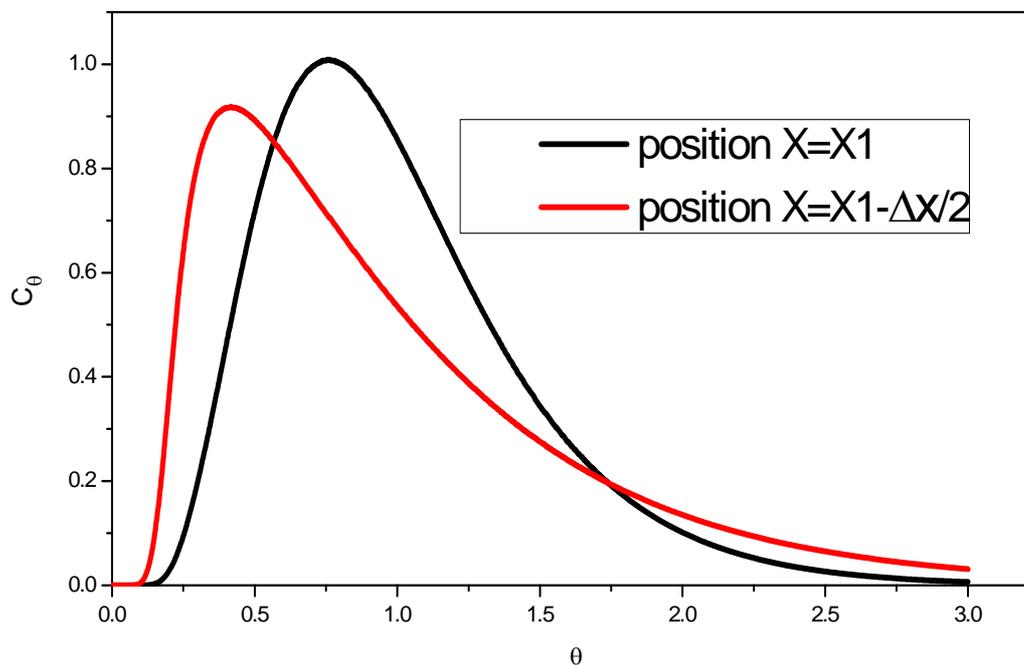
A. Comparaison entre les positions : $X=X1/2$ et $X= X1-\Delta X/2$:

Figure V.14 : Courbe de DTS pour le répartiteur avec déflecteur en fonction des positions ($X=X1$ et $X= X1-\Delta X/2$)

		$X=X1$	$X= X1-\Delta X/2$
t_{th}	(s)	394	394
t_{min}	(s)	57	37
t_{max}	(s)	299	164
\bar{t}	(s)	376.4917	330.3632
V_{dp}/V	(%)	45.17767	25.5076
V_m/V	(%)	8.04148	23.89686
$V_{mél}/V$	(%)	46.78085	50.59552

Tableau V.5 : Paramètres de la DTS pour les deux positions du déflecteur $X=X1$ et $X= X1-\Delta X/2$

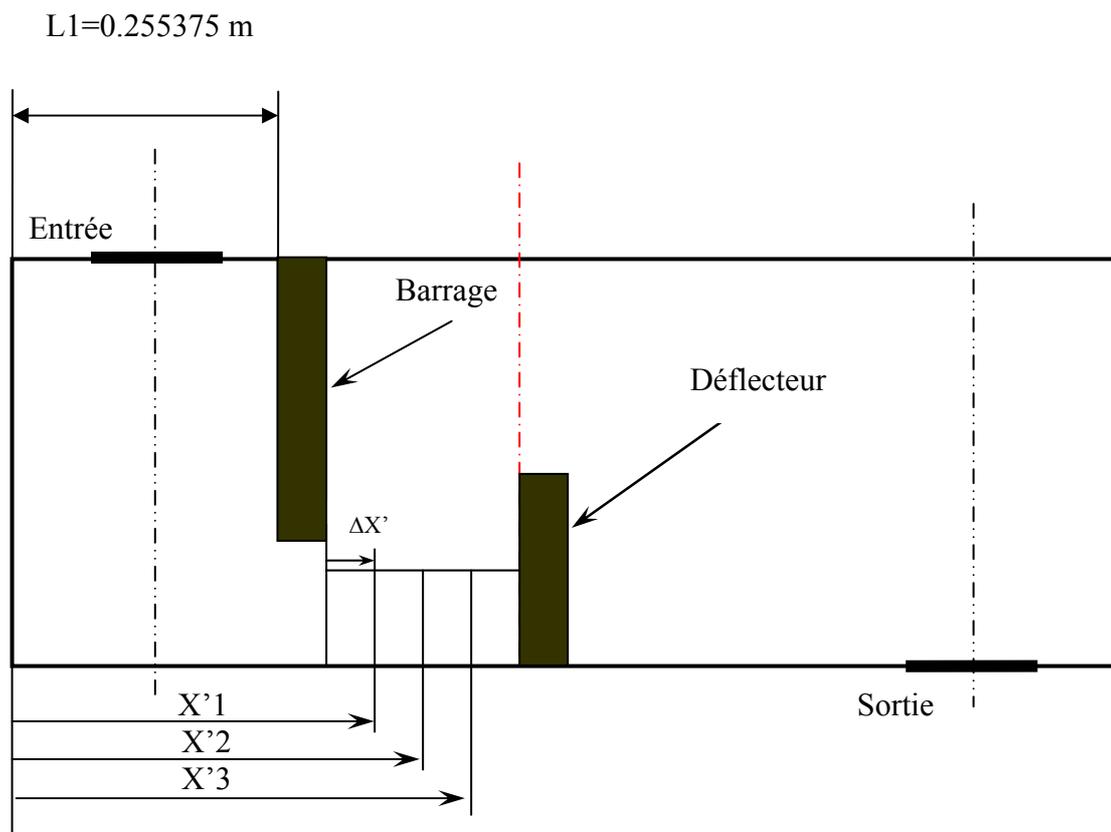
B. Analyses et discussions :

D'après Le tableau (V.4) et en comparant les positions $X=X1$ et $X=X2$ et $X=X3$ du déflecteur on constate que la meilleure position est situé à $X=X1$ qui peut être vérifié et expliqué comme avant (voir figure V.13).on observe aussi que si on fait approcher le déflecteur de l'entrée on constate une augmentation du temps de séjour ,ce qui nous pousse à déplacer le déflecteur encore de l'entrée c'est-à-dire à la position $X= X=X1-\Delta X/2$,on remarque une diminution du temps de séjour(voir tableau :V.5 et figure :V.14),donc la position à $X=X1$ est la position qui sera maintenue .

D'après cette analyse, on prend comme une meilleure et optimale position , la position $X=X1$ car elle offre le meilleur temps de séjour.

V.2.4 Comportement de l'écoulement au sein du répartiteur avec (barrage + déflecteur) :

V.2.4.1 Etude de l'influence du déflecteur et l'optimisation de son emplacement :



$$X'1 = 0.38378125 \text{ m}$$

$$\Delta X' = 0.100040625 \text{ m}$$

Figure V.15 : Différentes positions adoptées

L'étude de l'influence de l'ensemble (barrage +déflecteur) a été vérifié en maintenant le barrage à sa position optimale obtenue avant et jouer sur la position du déflecteur par rapport au barrage .dans notre travail on a seulement investigué trois positions (X'1, X'2, X'3) pour en déduire la position optimale et étudier l'effet de l'ensemble de ces dispositifs de contrôles.

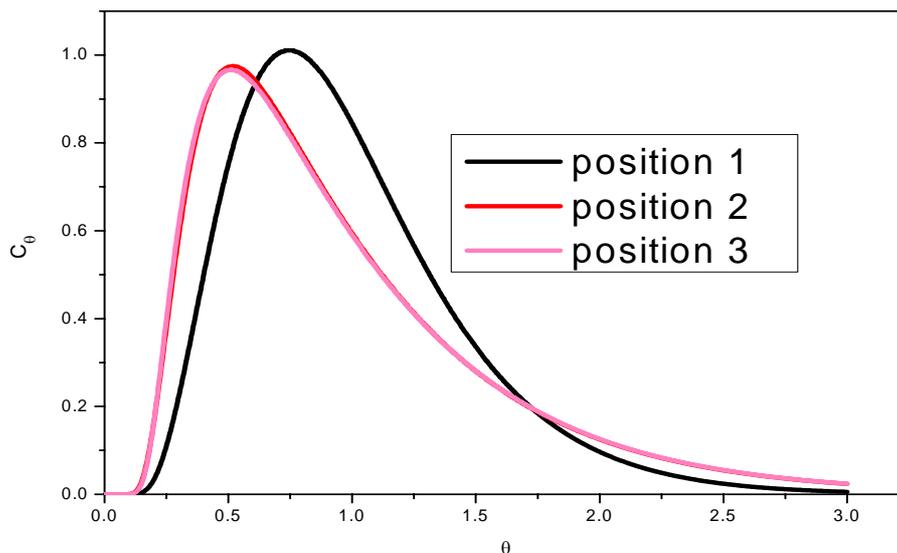
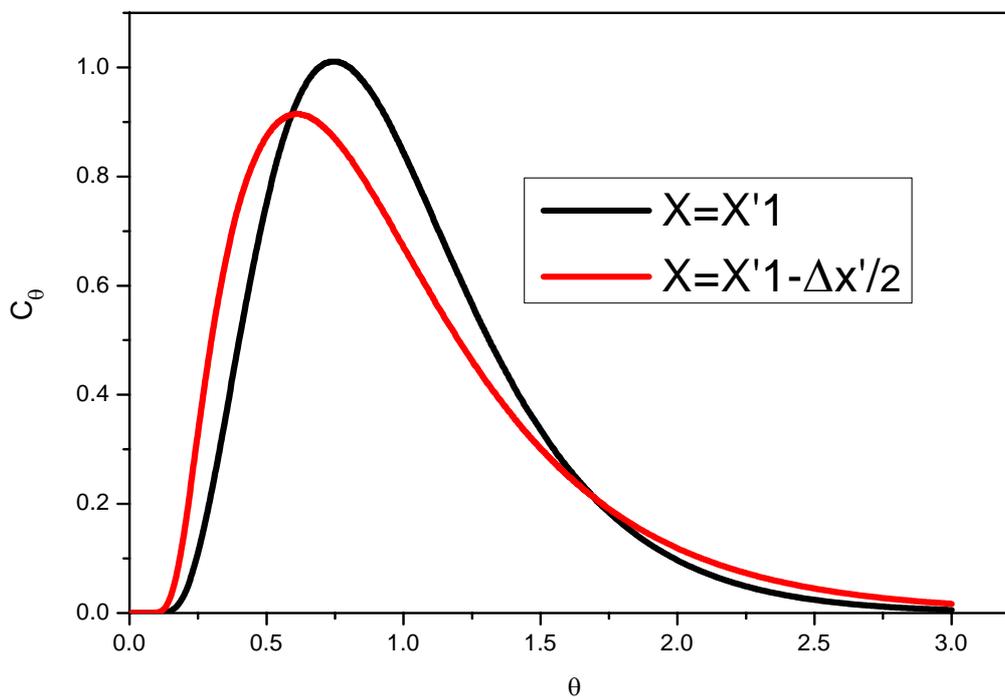


Figure V.16 : Courbe de DTS pour le répartiteur avec barrage Et déflecteur en fonction des trois positions

		X=X'1	X=X'2	X=X'3
t_{th}	(s)	394	394	394
t_{min}	(s)	55	45	47
t_{max}	(s)	294	204	201
\bar{t}	(s)	372	339.6707	339.2509
V_{dp}/V	(%)	44.28934	31.59899	31.47208
V_m/V	(%)	8.874651	20.44759	20.44759
$V_{mél}/V$	(%)	46.83601	48.08033	48.08033

Tableau V.6: Paramètres de la DTS pour le répartiteur avec un barrage et déflecteur en fonction des trois positions

A. Comparaison entre la position $X=X'1$ et $X= X'1-\Delta X/2$:



**Figure V.17: Courbe de DTS pour le répartiteur avec (barrage + déflecteur)
En fonction des positions ($X=X'1$ et $X= X'1-\Delta X/2$)**

		$X=X'1$	$X=X'1 -\Delta X/2$
t_{th}	(s)	394	394
t_{min}	(s)	55	43
t_{max}	(s)	294	241
\bar{t}	(s)	372	350.6729
V_{dp}/V	(%)	44.28934	36.04061
V_m/V	(%)	8.874651	16.68957
$V_{mél}/V$	(%)	46.83601	47.26982

**Tableau V.7 : paramètres de la DTS pour les positions.
 $X=X'1$ et $X= X= X'1 -\Delta X/2$**

B. Analyses et discussions : D'après Le tableau (V.6) et en comparant les positions $X=X'1$ et $X=X'2$ et $X=X'3$ du déflecteur , on constate que la meilleure position est située à $X=X'1$ qui peut être vérifié et expliqué comme avant (voir figure V.17).on observe aussi que si on fait approcher le déflecteur du barrage on constate une augmentation du temps de séjour ,ce qui nous pousse à déplacer le déflecteur encore du barrage c'est-à-dire à la position $X=X'1-\Delta X/2$,on remarque une diminution du temps de séjour(voir tableau:V.7 et figure : V.18), donc la position $X=X'1-\Delta X/2$ ne sera pas prise et la position $X=X'1$ sera gardée.

D'après cette analyse, on prend comme une meilleure et optimale position la position $X=X'1$ car elle offre le meilleur temps de séjour.

V.3. Comparaison entre les différentes configurations géométriques

COURBE DE DTS :

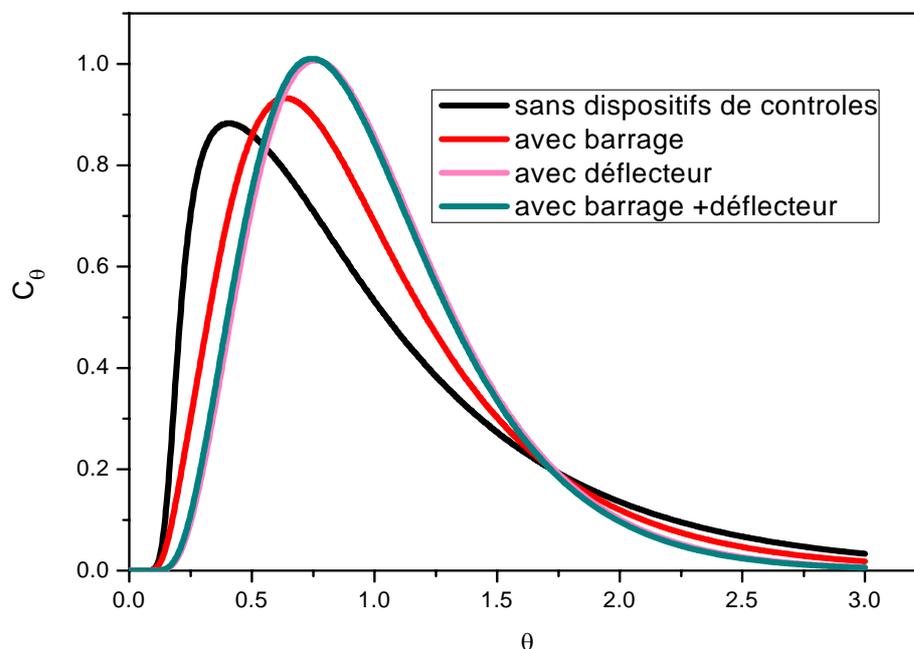


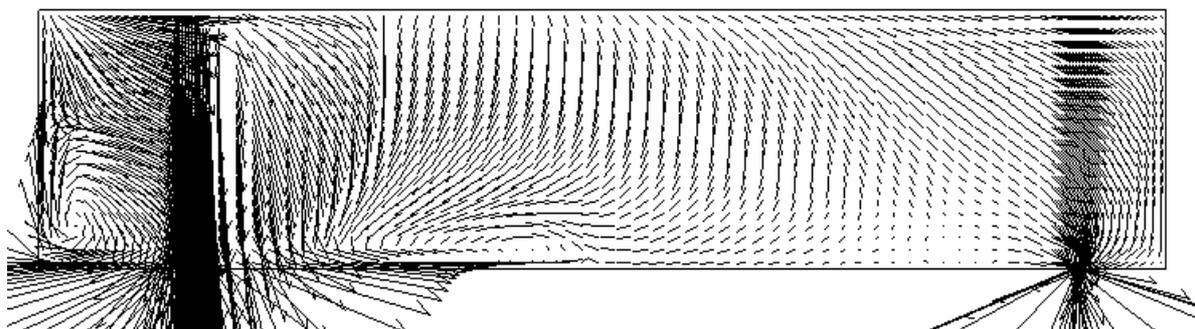
Figure V.18: Courbe de réponse pour les différentes configurations géométriques

PARAMETRES DE LA DTS :

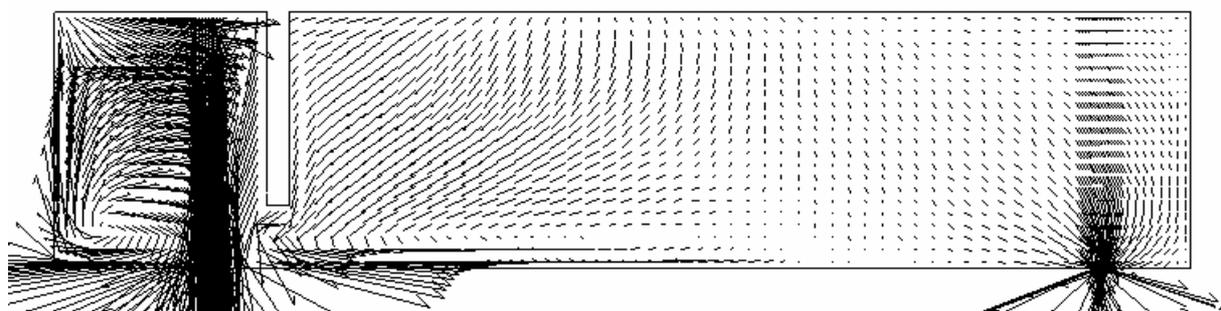
		Sans Dispositifs de contrôles	Avec barrage	Avec déflecteur	Avec Barrage+déflecteur
t_{th}	(s)	394	394	394	394
t_{min}	(s)	40.2423	38	57	55
t_{max}	(s)	160	251	299	294
\bar{t}	(s)	328.915	353.2724	376.4917	372
V_{dp}/V	(%)	25.54848	36.67513	45.17767	44.28934
V_m/V	(%)	24.54848	16.02903	8.04148	8.874651
$V_{mél}/V$	(%)	50.040007	47.29584	46.78085	46.83601

Tableau V.8 : Paramètres de la DTS pour les différentes configurations géométriques

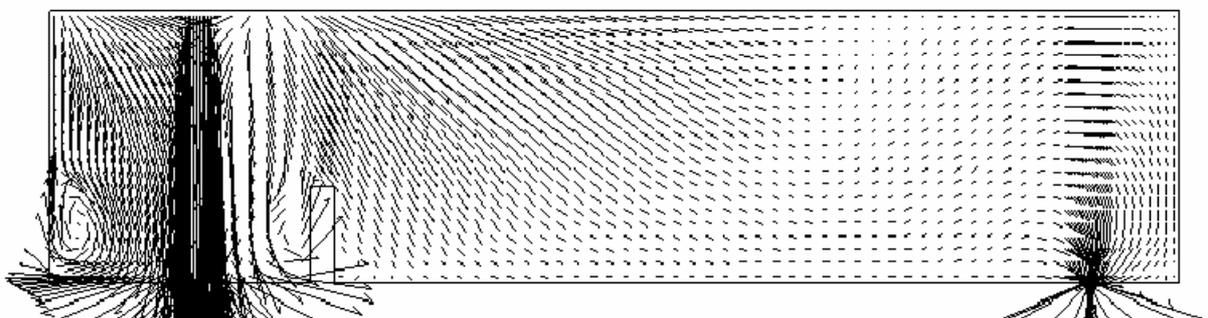
VECTEURS DE VITESSE DANS LE PLAN DE SYMETRIE



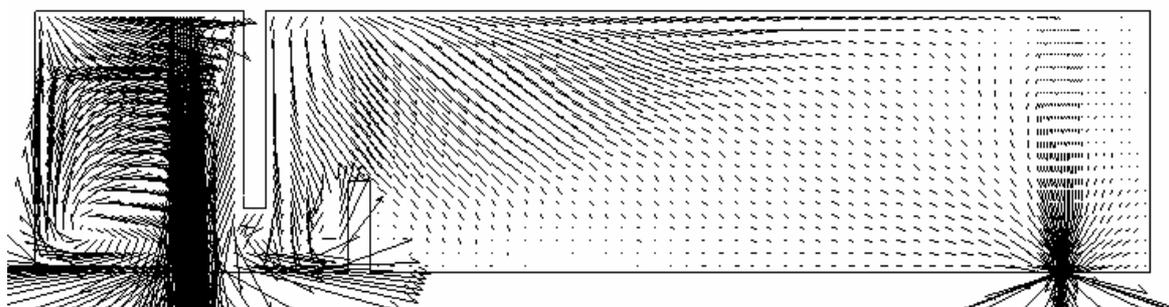
Sans dispositifs de contrôles



Avec barrage

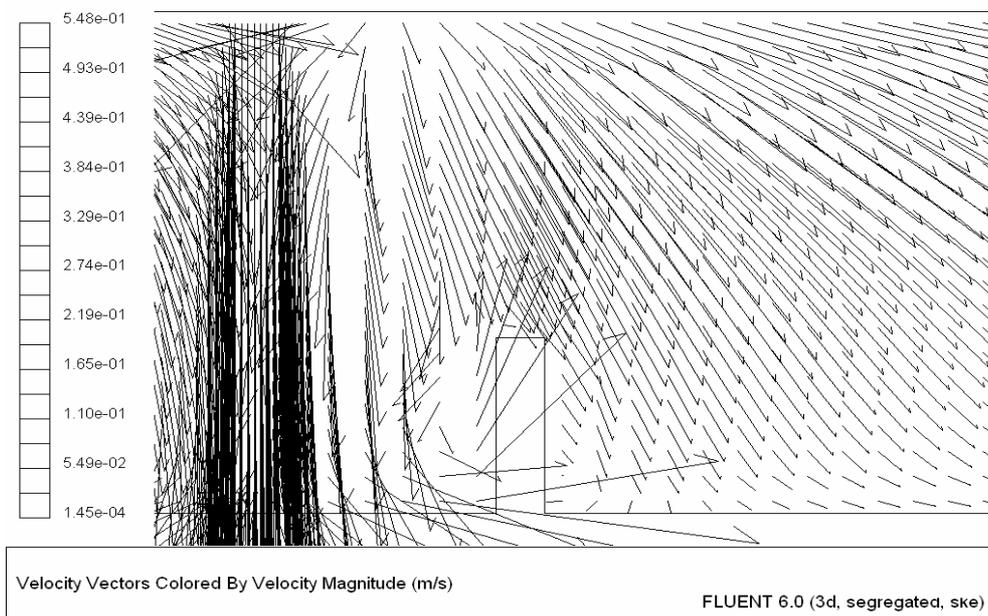


Avec déflecteur

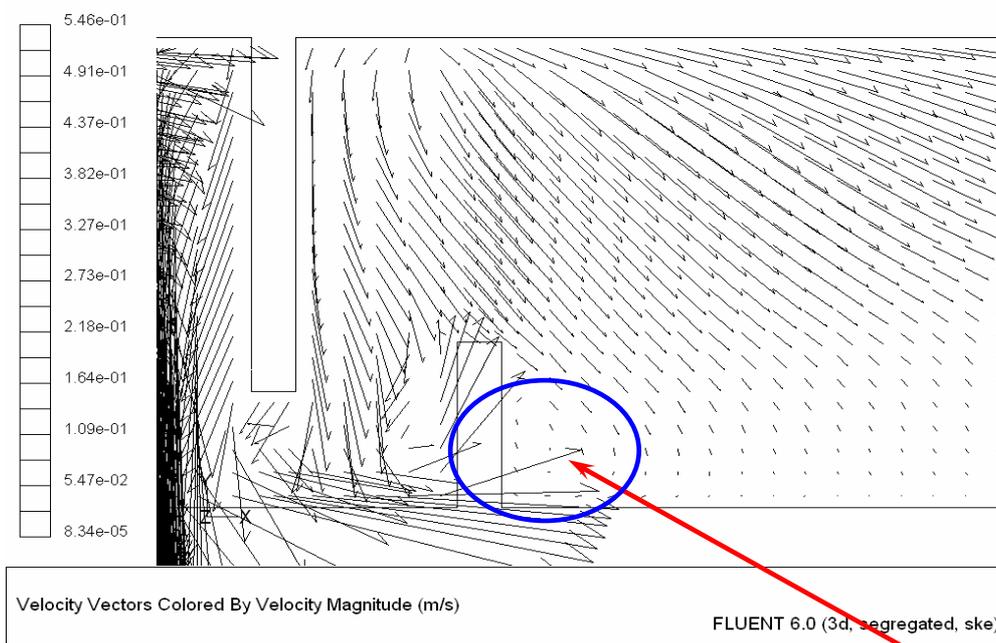


Avec barrage +déflecteur

Figure V.19 : Vecteurs de vitesses pour les différentes configurations géométriques



**Avec
déflecteur**



**Avec
barrage+Déflecteur**

**Zone de
recirculation**

Figure V.20 : Différence entre les deux configurations

V.3.1. Analyses et discussions :

En consultant le tableau (V.8) on remarque l'augmentation du temps de séjour, du volume piston et la diminution du volume mort dans les répartiteurs munis de dispositifs de contrôles. Par rapport au répartiteur sans dispositifs de contrôle, ce qui exprime et explique le rôle important de ces dispositifs dans la décantation des inclusions non métalliques.

En comparant les différentes configurations et en se basant sur les deux facteurs (temps de séjour et volume piston) on peut classer ces configurations selon un ordre décroissant en matière de recherche d'une bonne configuration :

- 1- avec déflecteur.
- 2- avec barrage +déflecteur.
- 3- Avec barrage.
- 4- Sans dispositifs de contrôles.

Ce classement peut être vérifié et expliqué par deux autres arguments :

1. la courbe de DTS.
2. les vecteurs de vitesses.

Pour le premier, la figure (V.19) illustre bien la différence entre les courbes de réponses, où on voit bien que la courbe de DTS pour le répartiteur muni du déflecteur seul se décale bien de l'axe de concentration par rapport aux autres courbes ce qui explique sa première place, en deuxième position vient la courbe pour la configuration (barrage +déflecteur), en troisième position la configuration (barrage) et en dernier la configuration (sans dispositifs de contrôles), sa dernière position qui est justifié par le rapprochement de sa courbe de réponse de l'axe de concentration.

Pour le deuxième, on voit dans le répartiteur sans dispositifs de contrôles, une création d'une zone de recirculation illustré dans le plan de symétrie.

Avec l'incorporation du barrage, on remarque que cette zone commence à disparaître, donc un volume mort amoindri, ce qui explique l'augmentation du temps de séjour.

Avec le déflecteur la zone de recirculation est écrasée et éliminée par ce dispositif de contrôle ce qui explique bien une autre augmentation du temps de séjour par rapport aux deux précédentes configurations par contre avec l'arrangement (barrage +déflecteur) et en se basant sur la même analyse, sa deuxième place est justifiée par la zone de recirculation créée derrière le déflecteur ce qui n'est pas dans le cas du déflecteur. (Voir figure V.20)

V.3.2. Détermination de la configuration optimale :

La compétition pour la détermination de configuration optimale sera lancée pour les deux meilleures configurations suivantes :

1-avec déflecteur.

2- avec barrage +déflecteur.

Car elles offrent les meilleurs temps de séjours.

En se référant au tableau (V.8) on constate une légère différence entre les deux configurations vu qu'il y a une différence de **5 seconde** en matière de temps de séjour, cette différence est due à la zone de recirculation créée derrière le déflecteur dans la configuration (barrage +déflecteur) voir figure (V.20).

La configuration avec déflecteur donne deux avantages de plus que la configuration (barrage+déflecteur) qui sont :

- a- pas besoin d'installer un barrage donc la non nécessité d'une installation d'un dispositif de contrôle de plus, donc éviter l'encombrement dans le répartiteur.
- b- Eviter le sur- coût de l'installation de ce barrage.

En résumé , et après cette analyse ,on peut conclure que la meilleure et optimale configuration est **la configuration du répartiteur muni d'un déflecteur** car elle offre le meilleur temps de séjour et un volume piston le plus grand ce qui favorise une meilleure décantation des inclusions.

CONCLUSION

La présente étude a pour but la modélisation numérique des écoulements dans un répartiteur métallurgique à différents obstacles utilisant l'analyse des courbes de distribution des temps de séjour (DTS). La modélisation numérique a permis d'obtenir des résultats qualitatifs par rapport à l'approche physique tels que : la possibilité de l'obtention des vecteurs de vitesses pour les différentes configurations géométriques, la possibilité de visualiser des zones de recirculations, ainsi l'obtention des résultats en temps court et optimal.

La génération du maillage a été élaborée sur Gambit, et la résolution numérique a été réalisée par le code de calcul FLUENT. Ce dernier nous a permis de comprendre l'écoulement et de l'optimiser dans le but d'obtenir une géométrie optimale qui favorise une meilleure décantation des inclusions non métalliques dans l'acier.

Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec d'autres résultats numériques. Les conclusions tirées de ce travail sont les suivantes :

- 1- le rôle important des dispositifs de contrôles dans l'augmentation du temps de séjour moyen.
- 2- la limiter de la zone de mélange fait augmenter la zone piston donc donner le bain calme aux inclusions pour leur décantage.
- 3- la DTS nous a permis de déterminer la configuration optimale et qui est le répartiteur avec déflecteur.
- 4- le rôle important que joue la DTS dans la compréhension du phénomène d'écoulement du fluide au sein du répartiteur.

L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail a fait l'objet d'une communication nationale qui a été présentée dans une conférence nationale à Boumerdes.

Comme perspectives, il serait très intéressant d'entamer une étude de l'écoulement de l'acier liquide dans le cas non isotherme et étudier l'injection de particules afin de déterminer avec précision l'efficacité et l'emplacement des différents dispositifs de contrôles.

Abstract:

The importance of the role that plays the flow in continuous casting tundish for the production of clean steel became a primordial objective for both actors:

Industrials and researchers, what pushed us to opt for the numerical modelling for steel flow in tundish model with and without flow controls devices (dam and weir) by using the residence distribution time (RTD) and working with Fluent CFD .well agreement between the obtained results and the others numerical results was found .Across this studies, we conclude that the flow controls devices play an important role to increase the average time residence and therefore a better efficiency of the floatation of non-metallic inclusions in steel.

:

:

()

.

.

Résumé :

L'importance du rôle que joue l'écoulement dans les répartiteurs de coulée continue sur la production d'un acier propre est devenu un objectif primordial pour les deux acteurs :

Industriels et chercheurs, ce qui nous a poussé à opter pour une modélisation numérique de l'écoulement de l'acier liquide dans un répartiteur à échelle réduite avec et sans dispositifs de contrôles (barrage et déflecteur), utilisant la notion de distribution des temps de séjour (DTS) et travaillant avec le code fluent .les résultats obtenus ont été en bon accord avec d'autres résultats numériques. A travers cette étude on conclut que les dispositifs de contrôles jouent un rôle important dans l'augmentation du temps de séjour moyen et donc une meilleure efficacité de décantation des inclusions non métalliques de l'acier liquide.