

## I. Introduction :

La technique d'augmentation du transfert de chaleur par des parois ondulées est une caractéristique très importante dans la conception des échangeurs de chaleurs compacts tel que le montre les nombreuses recherches empiriques et les études numériques rapportées par la littérature. Le processus physique d'augmentation du transfert de chaleur vient du fait que la forme ondulée de la surface détruit la couche limite formée et permet le remplacement continu du fluide près de la paroi solide. Par conséquent, le meilleur des solutions est de produire le minimum de perte de charge pour un maximum du transfert de chaleur [3].

### I.1-Définition (phénomène de la turbulence) :

La **turbulence** désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout Point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer. À l'inverse, on appelle laminaire le caractère d'un écoulement régulier. La découverte et l'étude des turbulences est très ancienne, elle a été par exemple faite par Léonard de Vinci<sup>1</sup>. Osborne Reynolds, qui a relancé à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle l'étude des turbulences

Le comportement complexe des écoulements turbulents est la plupart du temps abordé par la voie statistique. On peut ainsi considérer que l'étude de la turbulence fait partie de la physique statistique. Pour traduire le fait que, dans un écoulement, les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité, un nombre de Reynolds convenablement choisi doit être supérieur à un certain seuil. Pour l'étude des turbulences en milieu naturel, il est préférable d'utiliser le nombre de Richardson plutôt que celui de Reynolds, car ce dernier considère la densité du fluide comme constante, ce qui n'est pas vrai dans le cas des fluides compressibles.

Une propriété classiquement mise en avant d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé cascade d'énergie : la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet un transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites échelles. Ce processus est limité par l'effet de la dissipation moléculaire, qui empêche les variations de vitesse trop importantes. En pratique, ce transfert d'énergie n'est pas à sens unique, le phénomène d'appariement tourbillonnaire (en anglais *backscatter*) permettant le transfert ponctuel de petites structures tourbillonnaires (qui fusionnent) vers une ou plusieurs structures plus grandes.

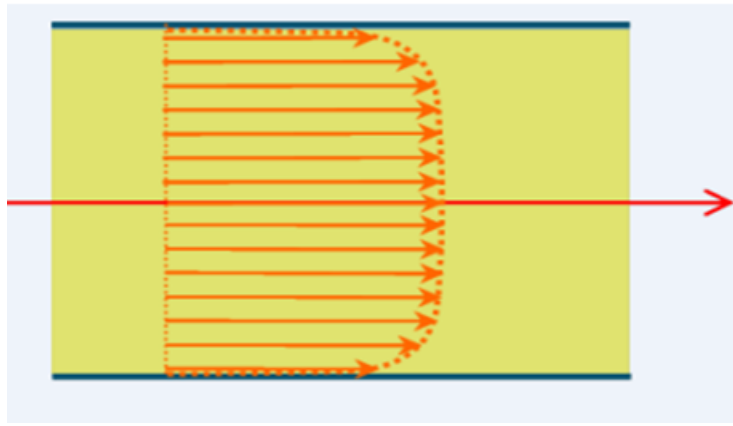


Figure I.1. profil d'écoulement turbulent

### I.2.1- caractéristiques générales de la turbulence :

Turbulence peut être caractérisée par les points suivants :

- Fluctuations temporelles et spatiales de grande amplitude de toutes les grandeurs physiques (composantes de vitesse, pression .... etc.).
- Structures tourbillonnaires de tailles caractéristiques fort différentes, imbriqués les uns dans les autres, et interagissant entre eux.
- Chaque grandeur physique a un spectre d'énergie (i.e., spectre du carré de la fluctuation) qui est continu et qui tend vers zéro aux grands nombres d'ondes (i.e., aux plus petites échelles spatiales).
- Persistance de la turbulence. Une fois amorcé, un écoulement turbulent a tendance à se maintenir : il continue à produire des tourbillons pour remplacer ceux dissipés. C'est particulièrement vrai pour les écoulements turbulents avec paroi et pour les couches de cisaillement cette persistance n'est en rien reliée aux mécanismes d'instabilité des ondes T-S en écoulement laminaire.
- Mélange : le mélange en écoulement turbulent est beaucoup plus efficace que le mélange en écoulement laminaire (i.e., par diffusion moléculaire) [5].

### I.3- écoulement turbulent dans un tube a paroi ondulée :

Les mécanismes fondamentaux de transport turbulent sont d'une grande importance à la fois des points scientifiques et d'ingénierie de vue. Les écoulements turbulents sur des géométries de paroi ondulées à différents nombres de Reynolds impliquant le transport de celui à, la masse et la dynamique sont contrôlés des mécanismes qui sont actifs dans de nombreuses situations d'écoulement perturbés. Les études de ces défis dynamiques de fluides contribuent à la

compréhension fondamentale des mécanismes qui déterminent les flux déformés et aident à répondre à des questions pratiques environnementales et d'ingénierie. Citez quelques exemples :

1 -Une amélioration significative du transfert de chaleur est générée dans les échangeurs de chaleur par des surfaces de forme sinusoïdale dues à des tourbillons longitudinaux par fractions autonomes. Ces tourbillons perturbent la croissance de la couche limite thermique et d'améliorer le transfert de chaleur entre le fluide et les parois du canal (Metwally et Manglik 2004).

2- Les flux atmosphériques sont considérablement accélérés sur sommets des collines, même lorsque les pentes maximales sont assez petites, de cisaillement dans le vent approchant amplifie cette accélération (Jackson & Hunt 1975). L'effet essentiel des flux sur les collines est d'augmenter la traînée de la surface sur le grand mouvement atmosphérique - échelle particulièrement important dans les prévisions météorologiques.

3- Certains de la moyenne rationalise dans le vent accélérant sur les collines approchent de la surface de la colline, tandis que d'autres peuvent circuler dans les régions de réveil .Turbulence dans le flux est grandement changé par des collines, en particulier dans le sillage. Ces changements à la moyenne de flux et les turbulences affectent le mélange et les processus d'échange. Les exemples incluent (a) le transfert de chaleur et de masse à la surface (Raupach et al. 1992).

4-Les modèles de recherche et de prévision des vagues de l'océan ont été guidés par les théories de la génération d'ondes par le vent et les théories de transfert faiblement non linéaire de l'énergie entre les ondes de longueur d'onde différente. (Miles 1957, Komen et al. 1994) [1].

### **I.3.1-influence de la Paroi sur la turbulence :**

Dans les sections suivantes l'influence de la forme de surface sur les structures de turbulence et cohérentes sont pris en compte. Après un bref résumé des phénomènes observés dans la couche limite turbulente sur des surfaces ondulées sont étudiées comme les surfaces avec une complexité accrue.

### **I.3.2-flux de convection mixte :**

Dans des études précédentes, les structures à grande échelle dans un écoulement turbulent sur une paroi ondulée pour les nombres de Reynolds  $Re_h$  dans une plage comprise entre 100 et 14600 ont été étudiés (Gunther (2001a) ; Gunther et Rudolf Von Rohr (2003)). Une paroi ondulée, caractérisé par le rapport entre l'amplitude à la longueur d'onde de  $\alpha = 0.1$  ( $A = 30mm$ ) a été utilisé.

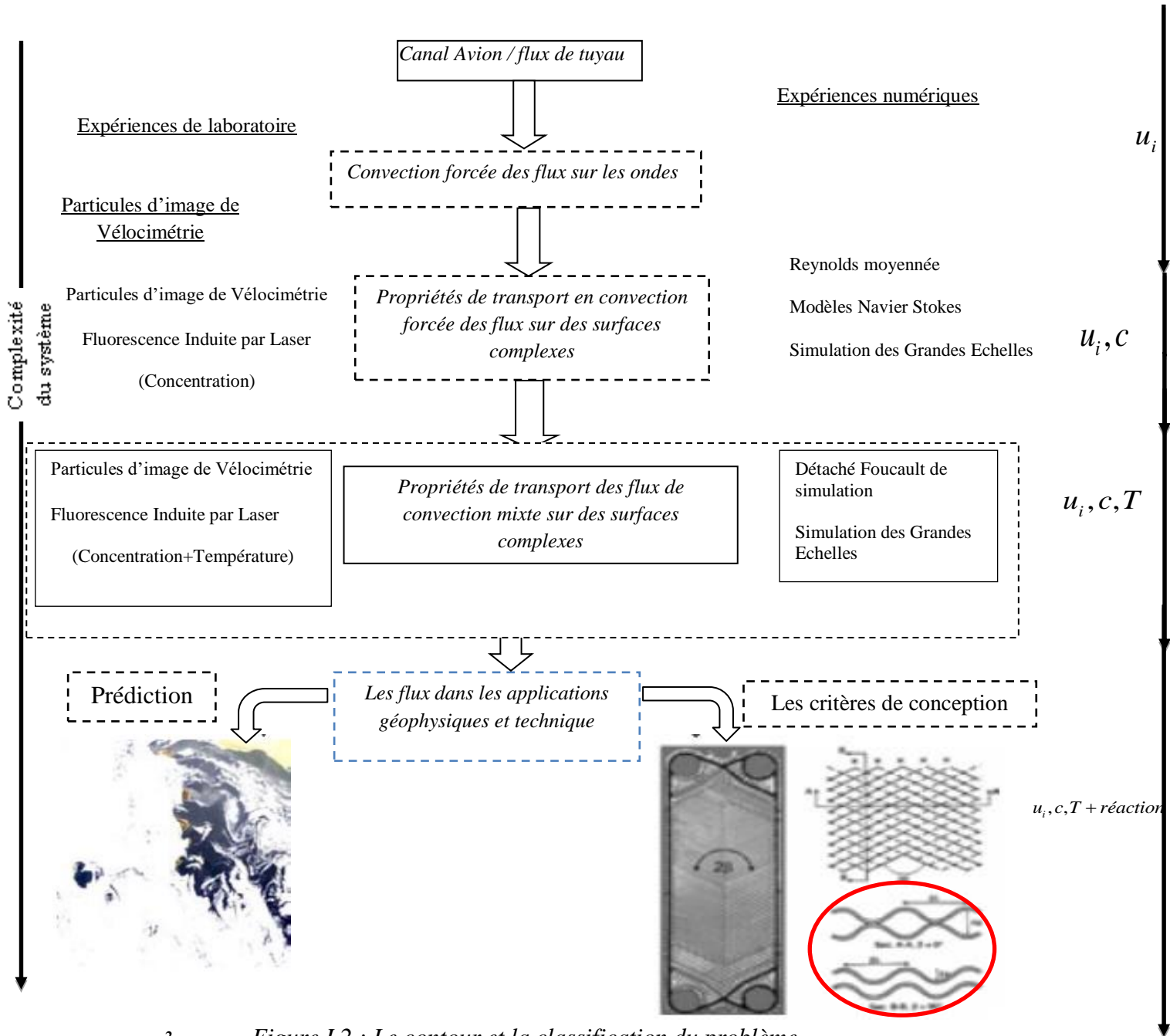
L'information structurale a été obtenue par le procédé de décomposition appropriée orthogonale (POD) et une échelle de caractéristique de l'envergure  $A_z$  dans les modes les plus dominants de  $\{O\}$ , de  $1,5H$  où  $H$  désigne la hauteur du canal, a été identifiée. Cette échelle de l'envergure caractéristique a été confirmée pour être presque identique pour les deux premières fonctions propres du champ d'écoulement décomposé à partir de mesures sur trois surfaces ondulées en deux dimensions différentes (Kruse et al. (2006)). Les quantités de turbulence et de grandes structures - échelle se sont révélés être indépendants du nombre de Reynolds dans la zone extérieure de l'écoulement, lorsque mis à l'échelle avec la graduation extérieure de vitesse,  $U_b$  (Kruse (2005)). En outre, Kruse et Rudolf Von Rohr(2006) a étudié le transport de la chaleur (Comme un scalaire passif) dans un écoulement turbulent sur une paroi ondulée chauffée. En utilisant une technique particule d'image thermométrie les champs de vitesse et de température ont été mesurés simultanément. Accord quantitatif entre les structures thermiques et de momentum à grande échelle a été trouvée. Dans une étude numérique, Wagner (2007) adressée propriétés de transport des isothermes non, forcé flux convectifs sur deux, et les murs ondulés en trois dimensions au moyen de simulation des grandes échelles, simulation de Foucault détaché et modèles de turbulence différents.

Le présent travail avance ces études en abordant les effets de flottabilité induits par la convection mixte à partir d'une surface ondulée sur les processus de transport en appliquant un numérique vélocimétrie par image de particules combiné laser et technique de fluorescence induite pour mesurer simultanément la vitesse, le champ de température, et le champ d'une concentration espèces traçantes. Les principaux aspects de ces situations de flux étudiés peuvent être résumés comme suit:

La séparation et l'écoulement recollement du fait de l'interaction du fluide avec les surfaces de délimitation complexes

- Les régions caractéristiques de contrainte de cisaillement positive et négative maximale
- nombres de Reynolds pour l'écoulement isotherme, des effets de flottabilité dans des conditions d'écoulement non-isothermes
- Déformation du profil de vitesse moyenne due à la flottabilité induite par des mouvements
- Transport d'une espèce introduite par une source ponctuelle comme scalaire passif
- Transport de chaleur comme un scalaire actif

Le contour et la classification du problème sont représentés dans la figure I.2. [2]



2 Figure I.2 : Le contour et la classification du problème

### I.3.3-paroi ondulée :

Une paroi ondulée délimitant un écoulement turbulent introduit des perturbations qui provoquent la variation spatiale du champ d'écoulement, la contrainte de cisaillement et de pression le long de la surface d'onde. Nous considérons l'écoulement sur une paroi de fond ondulé solide, caractérisé par le nombre de Reynolds.

$$Re_h = \frac{U_b \cdot h}{\nu} \quad (I.1)$$

Où  $\nu$  désigne la viscosité cinématique, et  $h$  est la de mi-hauteur du canal. La vitesse apparente  $U_b$  est définie comme :

$$U_b = \frac{1}{(2h - y_\omega)} \int_{y_\omega}^{2h} U(x_\xi, y) dy \quad (I.2)$$

Calculés à un emplacement arbitraire,  $x_\xi$ . La paroi ondulée est décrite par le rapport de l'amplitude,  $2a$ , à la longueur d'onde  $A$ ,  $\alpha = \frac{2a}{A}$  et son profil

$$y_\omega(x) = a \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{A}\right) \quad (I.3)$$

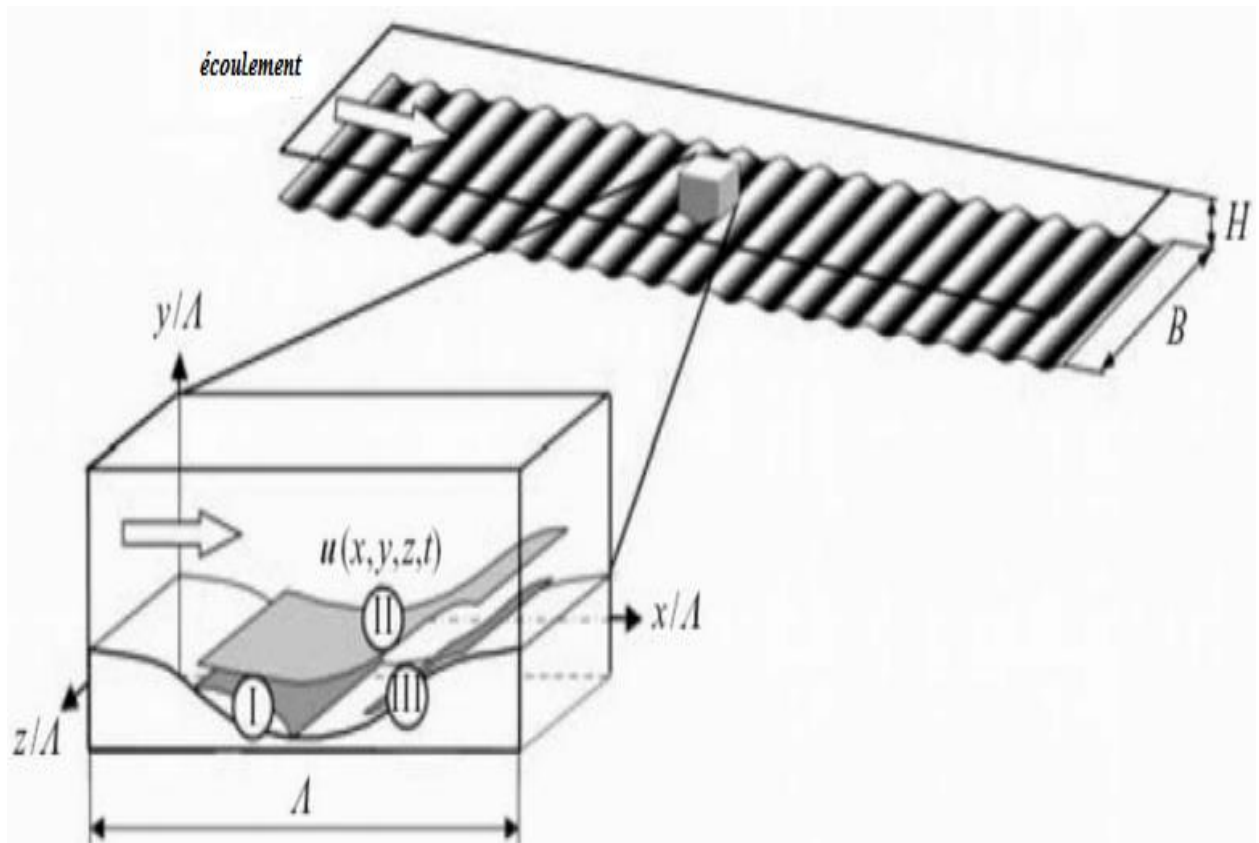


Figure. I.3 : système et schématique de Coordonner (I) la zone de séparation, et la zone (II) maximale positive et (III) contrainte de cisaillement négative de Reynolds (Gunther, 2001).

Où  $x$  désigne un  $x_\xi$  emplacement arbitraire et  $y_\omega$  décrit le profil de la surface complexe. La figure .I.3, montre le système de coordonnées et illustre les régions caractéristiques du champ d'écoulement au voisinage de la surface ondulée de façon schématique. La coordonnée  $x$  est dirigé parallèlement à l'écoulement moyen,  $y$  désigne la direction verticale de coordonnées, et  $z$  est la direction de coordonnées envergure. Les composantes de vitesse correspondantes sont désignées comme  $U$ ,  $v$  et  $\omega$ . Régions caractéristiques d'un flux sur les ondes avec une séparation, rapportée par Cherukat et al. (1998), et Henn et Sykes (1999), sont la zone de séparation (I), et les régions du maximum positif (II) et négative maximale (III) la contrainte de cisaillement Reynolds.

Leur emplacement par rapport à la surface ondulée est en outre esquissé sur la figure 3. La géométrie des surfaces ondulées peut être caractérisée par l'amplitude adimensionnelle ( $2a$ ) -à longueur d'onde  $A$ , rapport :  $\alpha = \frac{2a}{A}$

Les situations d'écoulement délimitées par des surfaces ondulées complexes présentent des caractéristiques d'écoulement telles que la périodicité du débit moyen partiel de séparation derrière les crêtes des vagues pour assez grandes, et une zone de séparation, parfois appelée la séparation bulle, situé dans la vague

Un résumé des études expérimentales sélectionnées concernant l'écoulement ondulé sur les surfaces indiquées dans le tableau I.1.

Le tableau I.2, résume numérique la sélectionné des études portant sur cette situation d'écoulement. Les résultats les plus importants et les ambiguïtés qui en découlent seront brièvement examinés dans le suivant. L'influence de la complexité de la paroi de délimitation sur la rugosité de la paroi, sur les écoulements turbulents et les structures d'écoulement turbulente st encore un domaine actif de la recherche et des enquêtes.

L'influence de l'amplitude de l'onde sur les flux séparés turbulents a partiellement été abordée dans des études antérieures (par exemple **Zilker et al** (1977), **Zilker et Hanratty** (1979)). **Raupach et al.** (1991) ont émis l'hypothèse que l'écoulement externe a un caractère universel et est indépendant de l'interaction avec la paroi.

**Nakagawa et al** (2003) et **Nakagawa et Hanratty** (2003) ont trouvé pour l'écoulement sur les ondes sinusoïdales que la turbulence des propriétés dans la partie extérieure d'écoulement sont similaires pour les surfaces planes et rugueuses, lorsque mis à l'échelle avec le frottement et la

rapidité. **Krogstad et al** (1992), **Krogstad et Antonia** (1994), ainsi comme **Krogstad et Antonia** (1999) fait état d'une influence de la rugosité de la paroi prolongeant jusqu'à la région extérieure de la couche limitent. Les résultats de ces études ont suggéré que le degré d'interaction entre le mur et la zone extérieure peut ne pas être négligeable. Mais, comme il est indiqué dans un examen par **Jim'enez** (2004), il a été difficile pour les autres chercheurs à reproduire ces conclusions. **Krogstad et al** (1992) ont également constaté que une fois le point de corrélation pour toutes les composantes de la vitesse sont environ deux fois plus courte pour rugueuse que pour les couches limites lisses. **Krogstad et Antonia** (1994) ont déterminé l'angle d'inclinaison des deux points de corrélation en fonction de la composante de vitesse longitudinale ( $u$ ) entre les deux emplacements ( $38^\circ$  pour la surface rugueuse contre  $10^\circ$  pour la douceur). Comme il est indiqué dans **Jim'enez** (2004), Nakagawa et Hanratty trouvé aucun changement dans cette quantité.

Ils ont suggéré que cela est dû à l'ambiguïté de l'advection vitesse, résultant de l'utilisation des images de particules (PIV), qui est une procédure purement spatiale. **Krogstad et Antonia** (1999) indiquent que caractériser l'influence de la rugosité de la paroi en évaluant exclusivement l'effet sur les profils de vitesse moyenne est insuffisante. En comparant des mesures sur deux parois rugueuses avec des mesures d'une bonne couche limite de paroi, ils ont constaté que les caractéristiques de flux turbulent sont significativement affectées par la géométrie de surface.

La recherche présentée dans cette thèse est motivée par le but d'identifier l'influence des surfaces complexes sur le flux et le transport turbulent procédés, tant pour les isothermes et des situations d'écoulement non isothermes.

En outre, nous sommes intéressés par les structures cohérentes formées dans le voisinage de la paroi complexe. Ces structures cohérentes, ou à grande échelle observé dans un écoulement de cisaillement sur une paroi ondulée sont identifiés comme des tourbillons envergures longitudinaux orienté par fractions périodiques. L'influence de la surfaces ondulées sur cette envergure périodicité et leur rôle dans le transport scalaire, le processus est également abordé dans cette thèse. Il existe deux théories décrire ce phénomène de turbulence provoquée par le profil de la paroi ondulée, à savoir le mécanisme Görtler et le mécanisme de type Lang mur qui seront examinés brièvement [4].



Référence	$Re_h$	A	Configuration	Dimension
Zilker et al. (1977)	7000	0.0125	CF	1D
	6000-32000	0.0312	CF	1D
	7000-32000	0.050	CF	1D
	7000-32000	0.125	CF	1D
	7000-24000	0.200	CF	1D
Thorsness et al. (1978)	5400-30000	0.013	CF	1D
Buckles et al. (1984)	12000	0.200	CF	1D
	12000	0.125	CF	1D
Abrams et Hanratty (1985)	6000-12300	0.014	CF	1D
Frederick et Hanratty (1988)	6400	0.031	CF	1D
	38800	0.050	CF	1D
Kuzan et al. (1989)	48000	0.125	CF	1D
	33000	0.125	CF	1D
	4100	0.200	CF	1D
Hudson et al. (1996)	>3400	0.100	CF	1D
Gong et al. (1996)	3800	0.158	WT	1D
Nakagawa et Hanratty (2001)	46000	0.100	CF	2D
Nakagawa et al. (2003)	46000	0.100	CF	2D
Nakagawa et Hanratty (2003)	3200	0.100	CF	2D
	11000			

Gunther et Rudolf vonRohr (2003)	500-7300	0.100	CF	2D
Kruse et al. (2003)	4500	0.100	CF	2D
Song et Eaton (2004)	1100-20100	Ramp	WT	2D
Kruse et al. (2006)	11200	0.1 ; 0.2	CF	2D
Poggi et al. (2007)	150000	0.025	CF	2D
Kuhn et al. (2007)	11200	0.1 ; 0.2	CF	2D
Wagner et al. (2007)	2300-11200	0.100	CF	2D

**Tableau I.1:** Résumé des études expérimentales sélectionnées concernant l'écoulement sur vagues.

Configuration: = flux de canal CF, avec = soufflerie.

$$\alpha = \frac{2a}{A}$$

Référence	Re <sub>h</sub>	$\alpha$	Méthode
Cherukat et al. (1998)	3460	0.100	DNS
Henn et Sykes (1999)	6560-20060	0.031-0.2	LES
Niceno et Nobile (2001)	175-200	0.25	CV
Stalio et Nobile (2003)	180	Riblets	DNS
Dellil et al. (2004)	6760	0.0-0.1	DNS/K - $\varepsilon$
Tseng et Ferziger (2004)	2400	0.05	LES

**Tableau I.2:** Résumé des études numériques sélectionnées concernant l'écoulement sur vagues.

Méthode: DNS = simulation numérique directe, LES = grand tourbillon simulation, CV = contrôle

$$\text{approche volume } \alpha = \frac{2a}{A}$$

### I.3.4-Échelles des turbulences de mouvement :

Cette section présente un bref mode deux caractéristiques des écoulements turbulents, à savoir la cascade d'énergie et les plus petites échelles de mouvement turbulent. L'idée de la cascade de l'énergie est que l'énergie cinétique est introduite dans la turbulence dans les plus grandes échelles de mouvement. Cette énergie est ensuite transférée à des échelles successivement plus petites et plus petites. A la portée des plus petites échelles de l'écoulement turbulent de l'énergie est ensuite dissipée par l'action visqueuse.

Un schéma de la cascade de l'énergie et les échelles de mouvement turbulent est représenté à la figure .I.4

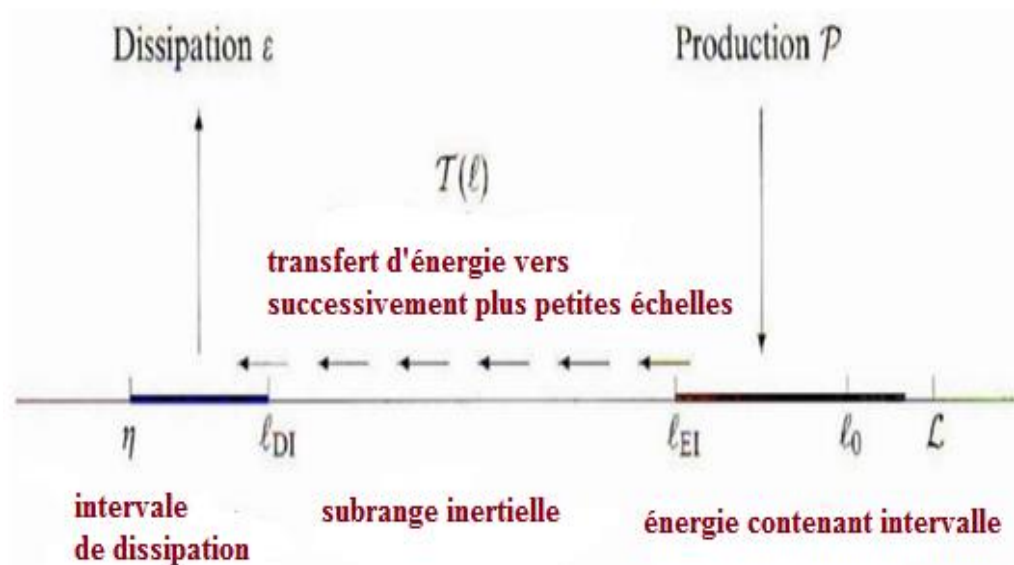


Figure I.4 Schéma des échelles de mouvement turbulent et de la cascade de l'énergie

Figure I.4 : Schéma des échelles de mouvement turbulent et de la cascade de l'énergie à un très grand nombre de Reynolds.  $\eta$  désigne l'échelle de Kolmogorov,  $l_0$  l'échelle de longueur des plus grands tourbillons, et  $\mathcal{L}$  l'échelle de longueur caractéristique de l'écoulement.  $L_{DI}$  et  $L_{EI}$  marquent les frontières entre la dissipation (D) et d'inertie (I) subranges, respectivement entre l'énergie (E) et d'inertie (I) se situe (Pope ; 2000).

Ar conséquent, les petites échelles en un écoulement turbulent sont reliées à la dissipation turbulente,  $\varepsilon$ . Ils peuvent être caractérisés en utilisant les échelles de Kolmogorov (Kolmogorov (1991)), qui sont les  $\eta$  d'échelle de longueur [6].

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (\text{I.4})$$

L'échelle de temps  $\mathcal{T}_\eta$

$$\mathcal{T}_\eta = \left( \frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{I.5})$$

Et l'échelle de vitesse  $u_\eta$

$$u_\eta = (\varepsilon \nu)^{\frac{1}{4}}, \quad (\text{I.6})$$

#### **I.4-Influence de l'amplitude de l'onde :**

Une étude paramétrique géométrique a été réalisée en modifiant le rapport entre l'amplitude à la longueur d'onde. Comparaison des résultats prévus d'une paroi ondulée avec celle d'un canal droit indique que le nombre de Nusselt augmente en moyenne jusqu'à ce qu'une valeur critique soit atteinte lorsque la vague d'amplitude est augmentée. Toutefois, cette amélioration du transfert de chaleur est accompagnée par une augmentation de la chute de pression [7].