

SFT 16 mars 2011 - Echangeurs thermiques et multifonctionnels :
enjeux, applications et axes de recherche



Simulation numérique directe d'un écoulement turbulent fortement anisotherme dans un récepteur-échangeur solaire

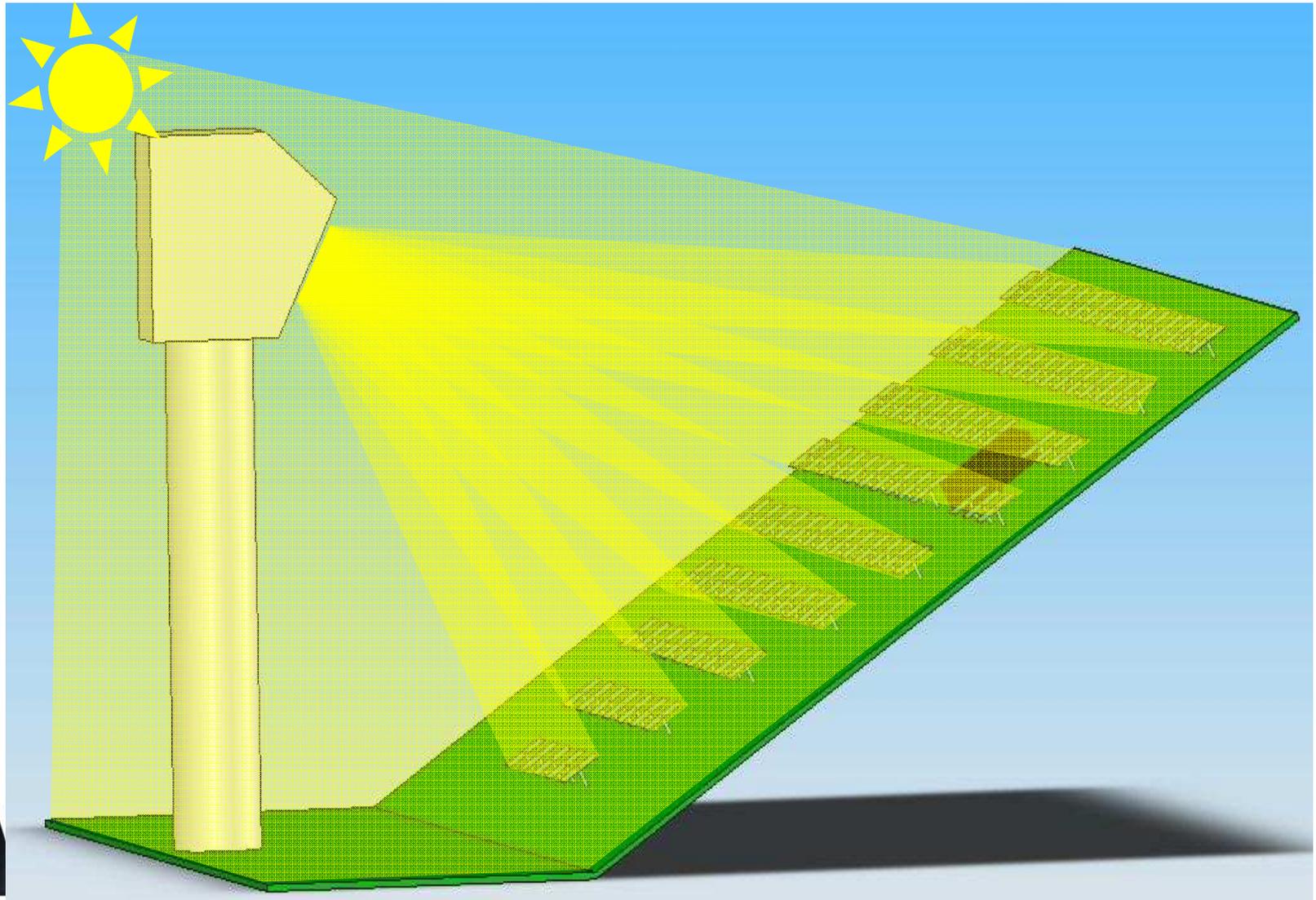
LABORATOIRE
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX
et ENERGIE SOLAIRE
UPR 8521 du CNRS,
conventionnée avec
l'université de Perpignan
PROCESSES, MATERIALS
and SOLAR ENERGY
LABORATORY

Adrien Toutant
Françoise Bataille



Le projet PEGASE

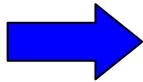
(Production of Electricity using GAs turbine and Solar Energy)



L'étude numérique

Les récepteurs des centrales solaires thermodynamiques ont deux caractéristiques :

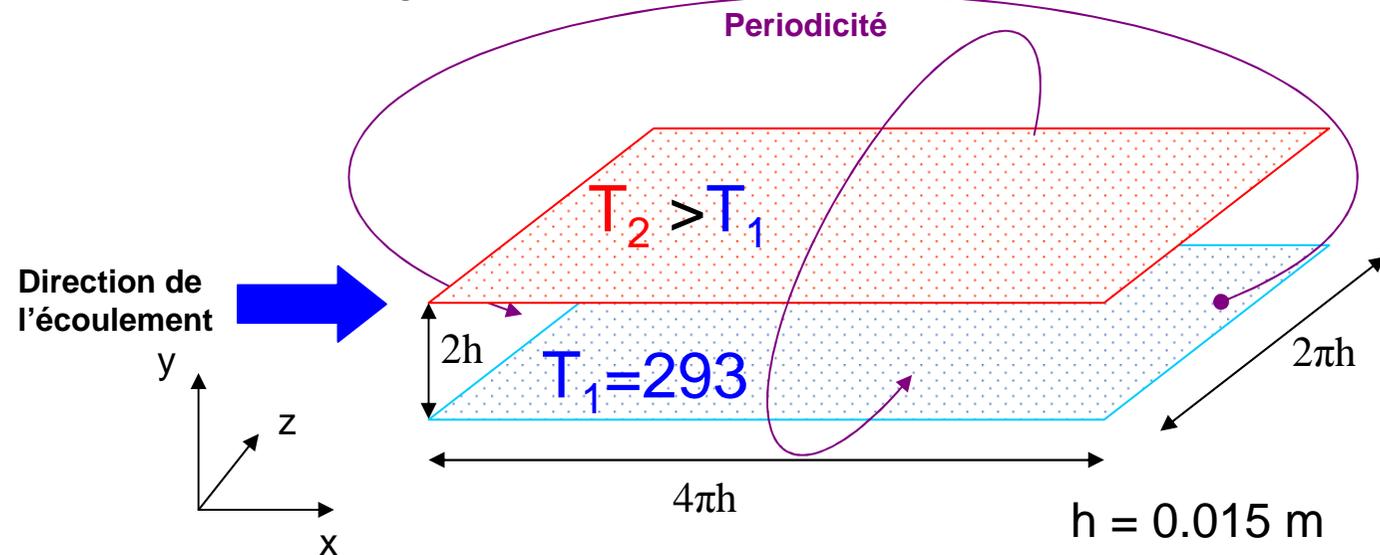
- Chauffage **asymétrique**,
- Ecoulements **turbulents**.



Etude du **couplage** entre un fort **gradient de température** et la **turbulence**.

Choix d'une géométrie académique pour :

- Comparer avec la littérature,
- Diminuer le temps de calcul,
- Eviter des erreurs dues à la géométrie.



Etudes dans la littérature

Gradient thermique T_2/T_1	$Re\tau$	180 (Rec = 3300)	395 (Rec = 6400)	Intensité de la turbulence
1		Kim (1987)	<ul style="list-style-type: none"> Moser (1999) Kawamura (1999,2000) 	RET : nb de Reynolds basé sur la vitesse de frottement Rec : nb de Reynolds basé sur la vitesse au centre
1.01		<ul style="list-style-type: none"> Debusschere (2004) Nicoud (1998) 	SGE réalisées	
2		Nicoud (1998)	SGE et SND réalisées	
		SGE réalisées		
5		SGE réalisées	SGE réalisées	

 Données de la littérature (validation des simulations)

 Calcul présenté

(SGE : simulation des grandes échelles
 SND : simulation numérique directe).

Objectifs

- **Simuler toutes les échelles de l'écoulement avec un fort **couplage** entre **turbulence** et **gradient de température****
- **Réaliser une **SND de référence** avec**
 $T_2/T_1=2$,
 $Re_T=400$ (nombre de Reynolds basé sur la vitesse de frottement),
 $Re_c=6400$ (nombre de Reynolds basé sur la vitesse au centre).

Plan

1. L'outil numérique et sa parallélisation
2. Taille du domaine et convergence en maillage
3. Statistiques de la turbulence

1. Outil numérique et parallélisation

Equations résolues :

- Approximation des **faibles** nombres de **Mach** pour un **gaz parfait**
- Permet de tenir compte des effets de compressibilité liés à la température sans résoudre l'acoustique

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j)}{\partial x_j} = 0$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P_{dyn}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial P_{thermo}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

$$P_{thermo} = r \rho T$$

$$\frac{\partial P_{thermo}}{\partial x_i} = 0$$

Propriétés du fluide fonction de la température

$$\mu(T) = 1.461 \cdot 10^{-6} \frac{T^{1.5}}{T + 111}$$

$$\lambda(T) = \frac{\mu C_p}{Pr} = \frac{1.468 \cdot 10^{-3}}{Pr} \frac{T^{1.5}}{T + 111}$$

1. Outil numérique et parallélisation

Code de CFD ***Trio_U*** développé au CEA-Grenoble.

Trio_U : code objet (C++) adapté au calcul massivement **parallèle**.

Algorithme :

1. Calcul du champ de **température** à partir de l'**équation** de bilan d'**énergie**,
2. Calcul de la **pression thermodynamique** en imposant la **conservation globale de la masse** (domaine fermé),
3. Calcul de la **masse volumique** à partir de l'**équation d'état**,
4. Calcul du champ de **vitesse** à partir de l'équation de bilan de **quantité de mouvement** et de la **pression dynamique** à partir de la **conservation locale de la masse**.

1. Outil numérique et parallélisation

Discretisation : Volumes Différence Fini (VDF)

- Maillage structuré
- Scalaire (pression et température) au centre des mailles
- Vitesse normale aux faces

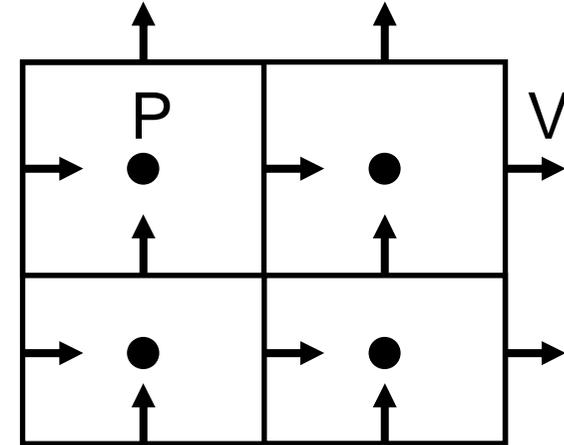


Schéma en temps : explicite

- schéma Runge-Kutta d'ordre trois

Schéma convectif :

- vitesse : schéma centré d'ordre deux
- température : schéma Quick d'ordre trois

1. Outil numérique et parallélisation

Maillage : 1536x396x768 = 470 millions d'éléments

Raffiné dans la direction perpendiculaire aux parois (y) :

$$y_k = h \left\{ 1 + \frac{1}{a} \tanh \left[\left(-1 + 2 \frac{k-1}{N_y-1} \right) a \tanh(a) \right] \right\}, k \in [1, N_y]$$

Pas du maillage adimensionnés :

$$\Delta x^+ = \Delta z^+ = 4.5$$

A la paroi : $\Delta y^+ = 0.5$ **et au centre du canal** $\Delta y^+ = 4.2$

Machine utilisée : **SGI** (Jade) au **CINES** (Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur) via les projets **GENCI**

1. Outil numérique et parallélisation

Maillage 1536x396x768 = 470 millions d'éléments (raffiné suivant y)
Découpage 3D en **32x8x16 sous-domaines** (115 000 éléments/coeur)
Parallélisation "flat-mpi" (4096 processus MPI)

Mailleur parallèle

Méthode de projection : **solveur multigrille géométrique**
5 niveaux de grille (4 agglomérations : 2 en y puis 2 isotropes)
Niveau grossier : 384x42x192 = 3 millions d'éléments

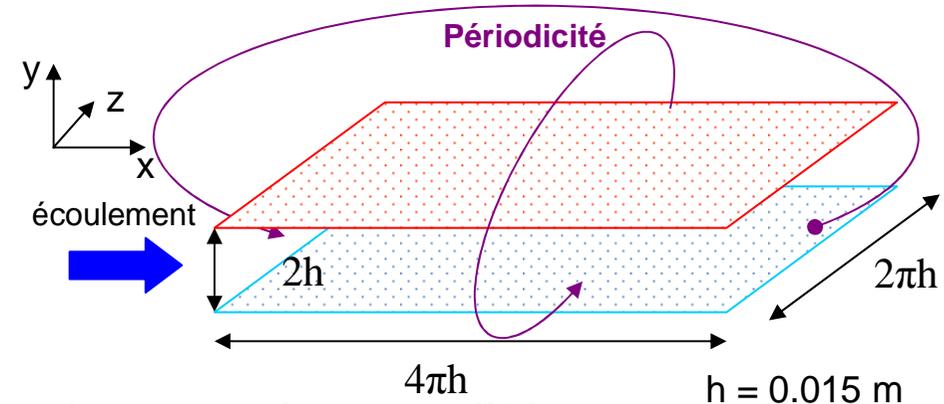
7 itérations multigrille de type V-cycle (résidu divisé par 10^{10})
lisseur Jacobi (12 pre-smoothing it., 12 post-smoothing it.)
solveur GCP+SSOR sur grille grossière (40% du temps CPU du solveur Poisson)

1.12 secondes par résolution du problème de Poisson, dont :

- **0.3 secondes** dans les échanges **MPI**
- **0.42 secondes** dans le solveur GCP+SSOR sur **grille grossière**
- débit MPI total : 520 Go/s, soit 1 Go/s/noeud ou 130 Mo/coeur
- taille moyenne des messages: 6.9 ko

2. Taille du domaine et convergence en maillage

Domaine périodique doit être suffisamment grand pour que les grandeurs ne soient plus corrélées.



On se place sur une droite dans un plan parallèle au paroi et on calcule les moyennes :

$$R11(x) = \frac{\langle u(x_0, y_0, z_0) u(x, y_0, z_0) \rangle}{\langle u(x_0, y_0, z_0) u(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

$$R22(x) = \frac{\langle v(x_0, y_0, z_0) v(x, y_0, z_0) \rangle}{\langle v(x_0, y_0, z_0) v(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

$$R33(x) = \frac{\langle w(x_0, y_0, z_0) w(x, y_0, z_0) \rangle}{\langle w(x_0, y_0, z_0) w(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

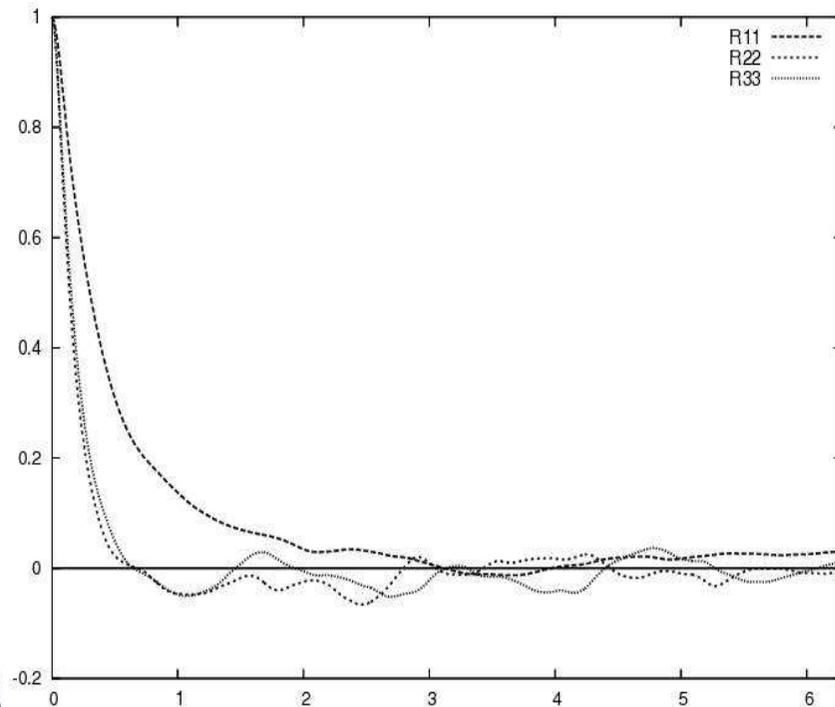
$$R11(z) = \frac{\langle u(x_0, y_0, z_0) u(x_0, y_0, z) \rangle}{\langle u(x_0, y_0, z_0) u(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

$$R22(z) = \frac{\langle v(x_0, y_0, z_0) v(x_0, y_0, z) \rangle}{\langle v(x_0, y_0, z_0) v(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

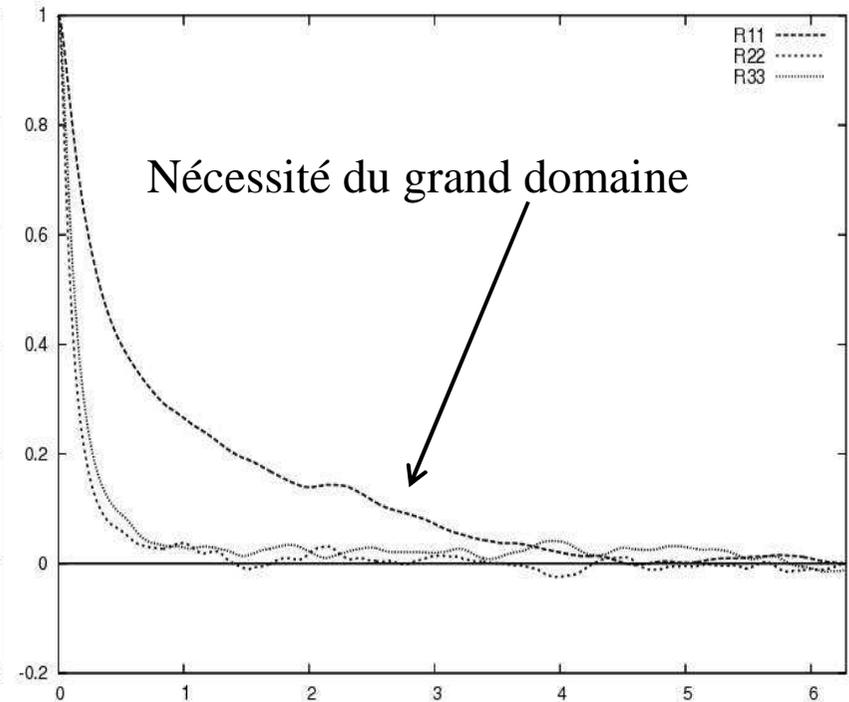
$$R33(z) = \frac{\langle w(x_0, y_0, z_0) w(x_0, y_0, z) \rangle}{\langle w(x_0, y_0, z_0) w(x_0, y_0, z_0) \rangle}$$

pour différents y_0 (i.e. à différentes distances des parois).

2. Taille du domaine et convergence en maillage



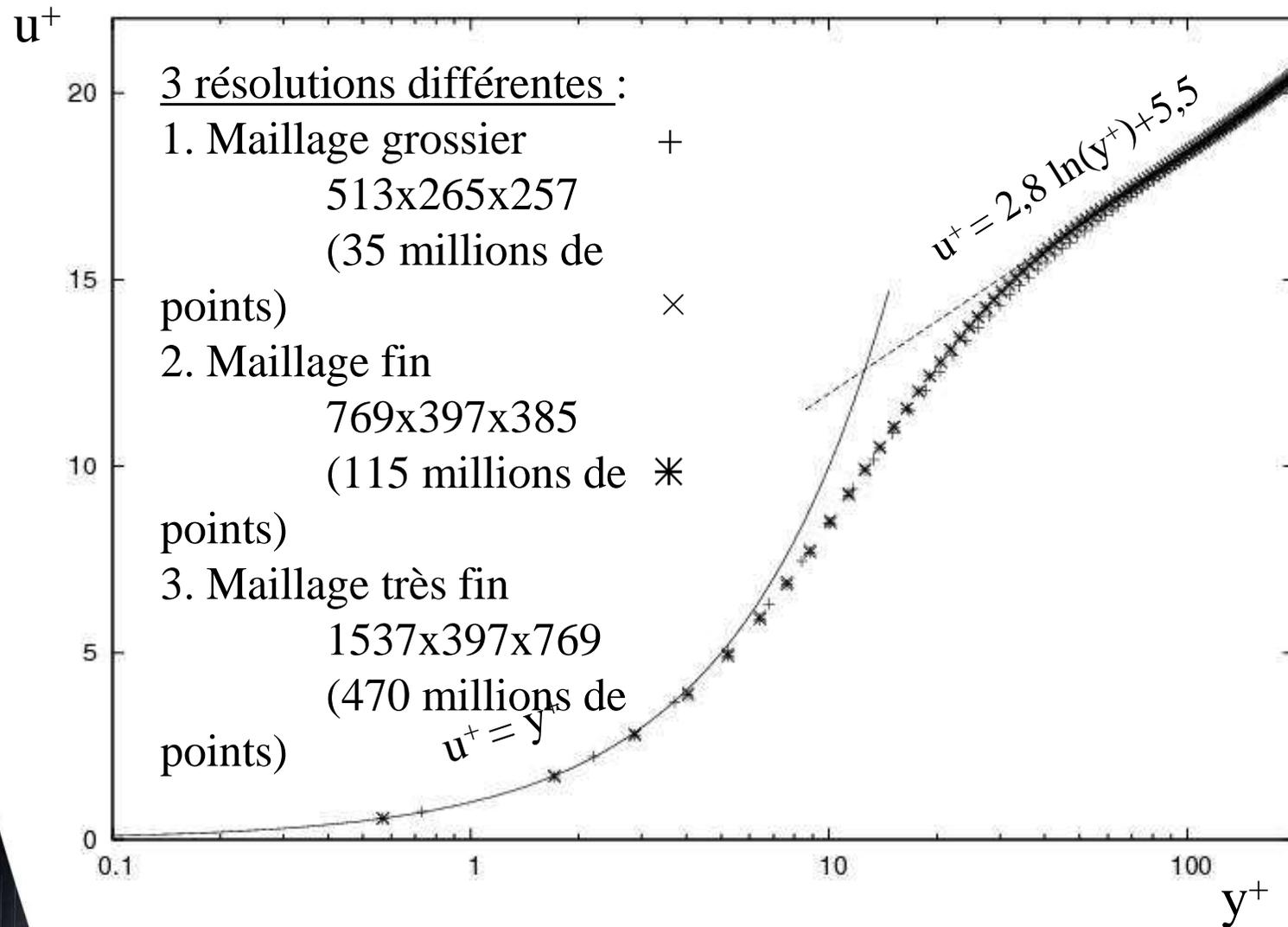
Direction de l'écoulement à 15 mm



Direction de l'écoulement à 1,25 mm

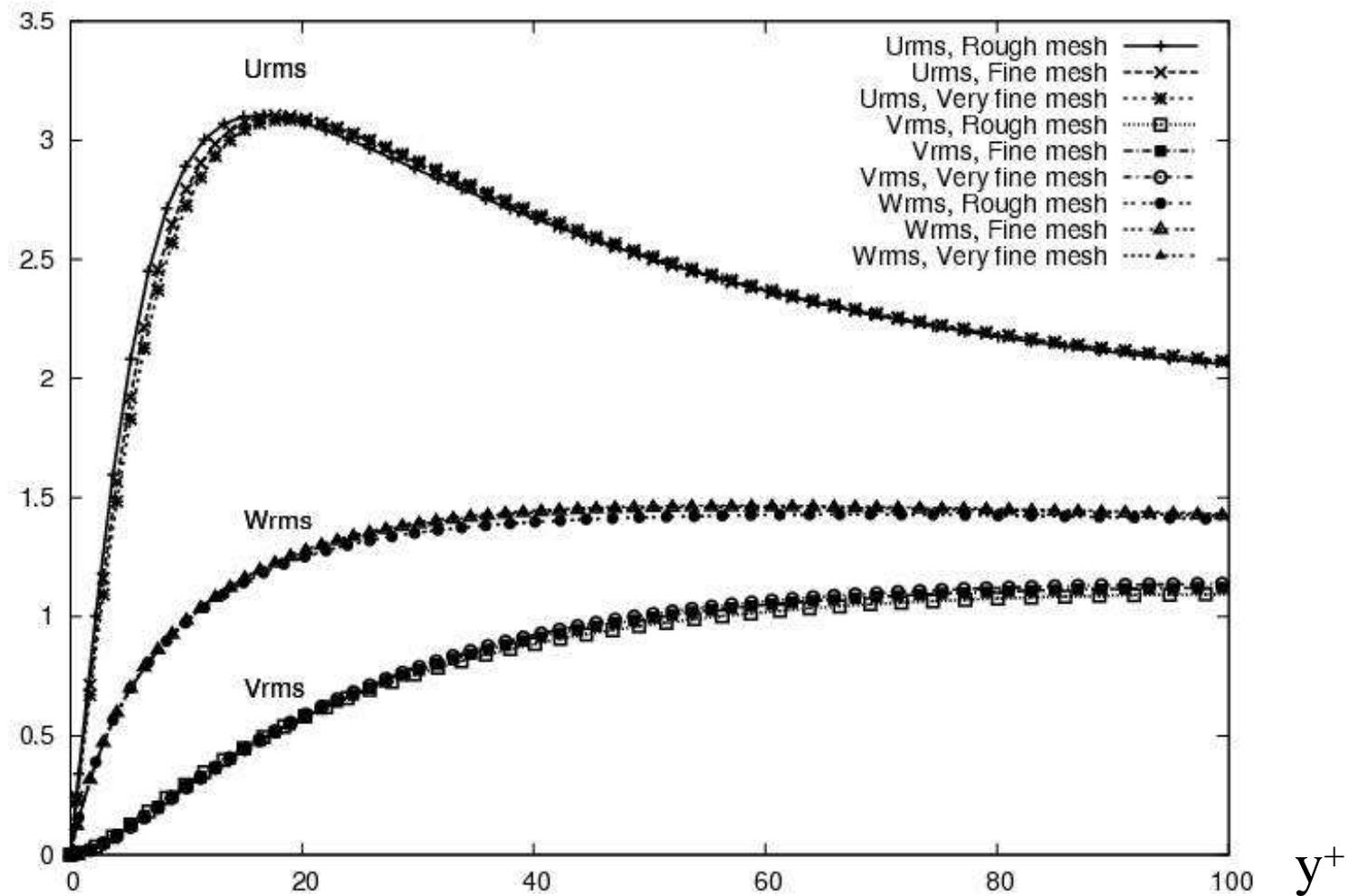
Résultats similaires au cas isotherme mais
les corrélations diminuent moins vite
⇒ impact du gradient de température
sur la taille des structures turbulentes

2. Taille du domaine et convergence en maillage



2. Taille du domaine et convergence en maillage

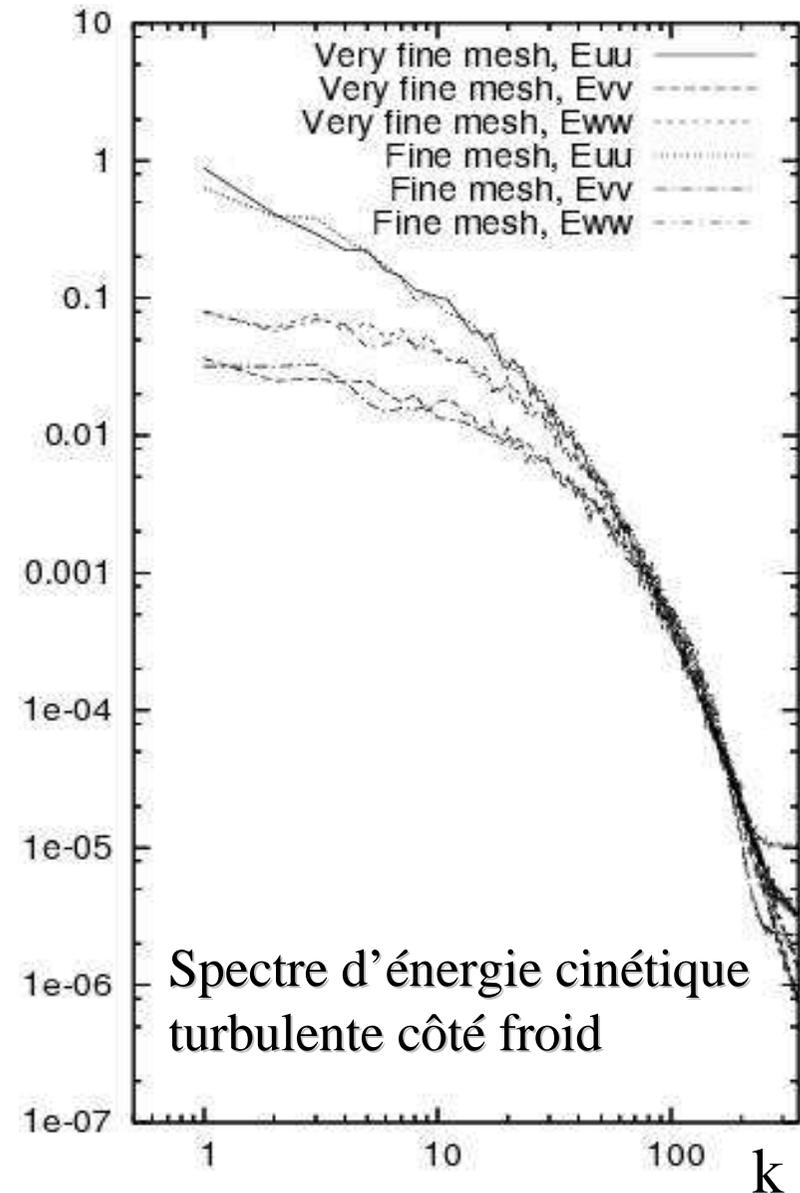
Fluctuations turbulentes adimensionnées de la vitesse



2. Taille du domaine et convergence en maillage

Toutes les échelles dont l'énergie est supérieure à $10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ sont **capturées**.

Convergence en maillage : les échelles de moindre énergie n'ont pas d'impact.

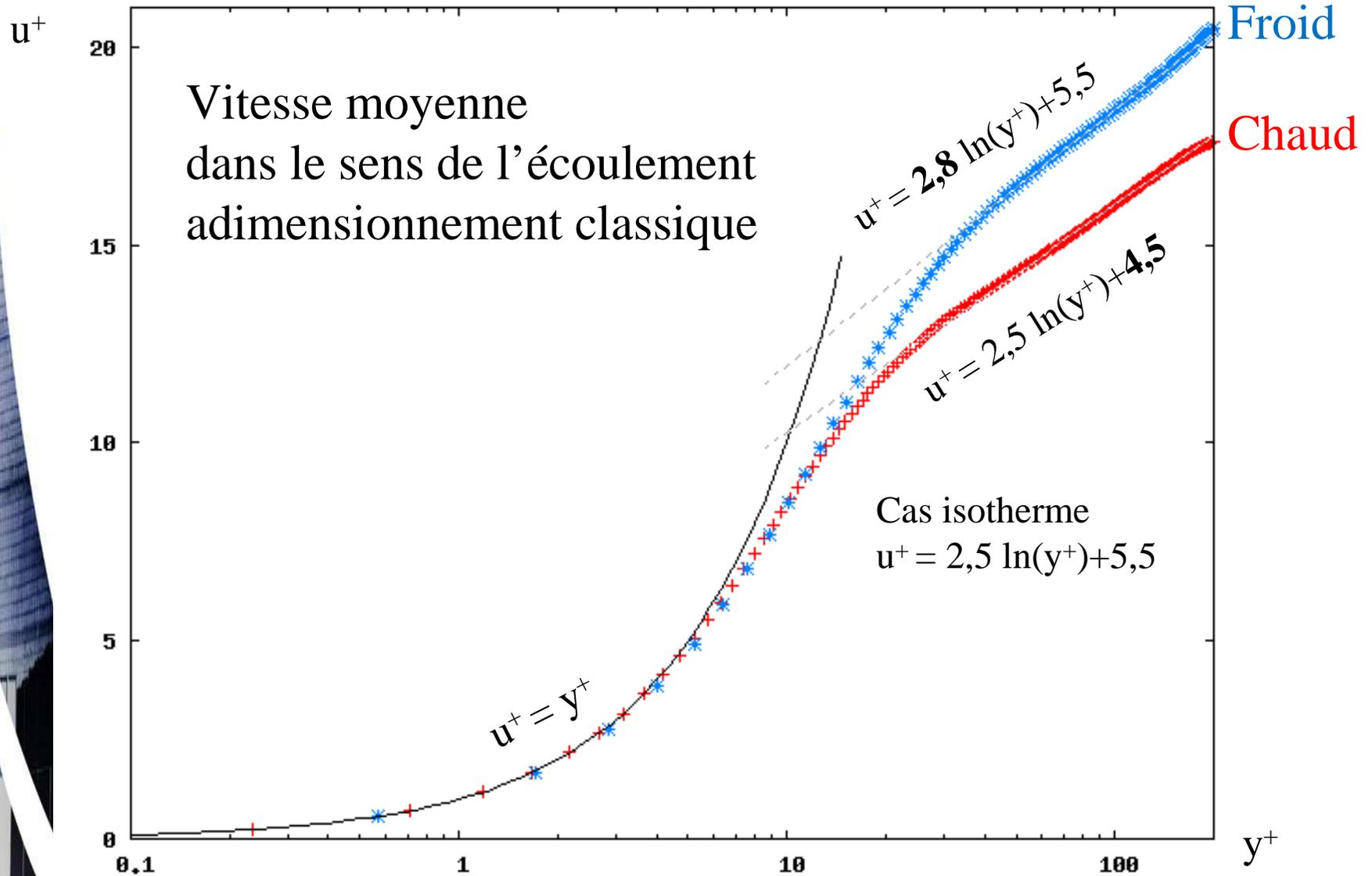


2. Taille du domaine et convergence en maillage

Conclusion partielle :

- Taille du domaine **suffisante**
- **Convergence en maillage**

3. Statistiques de la turbulence



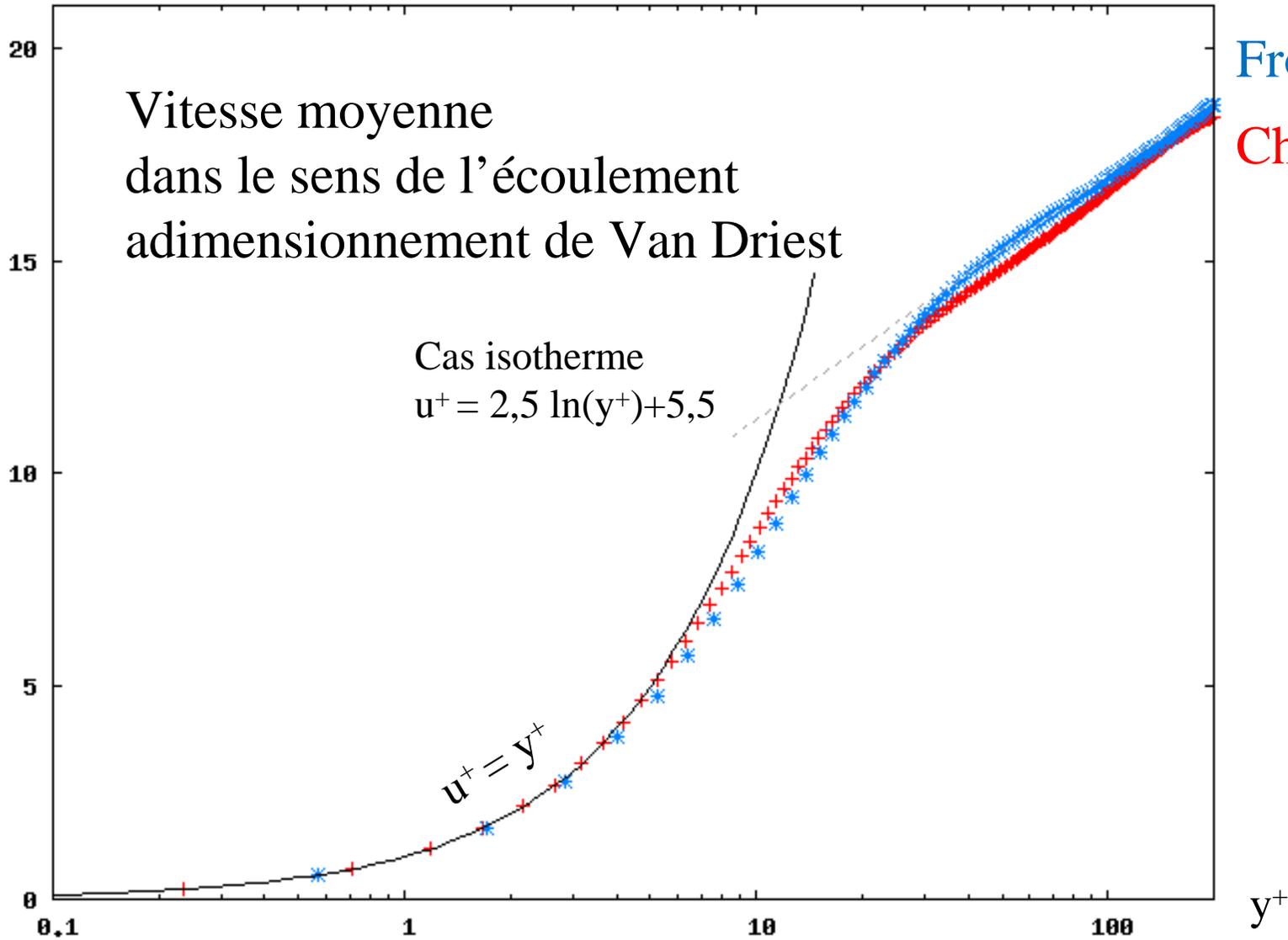
3. Statistiques de la turbulence

u^+

Vitesse moyenne
dans le sens de l'écoulement
adimensionnement de Van Driest

Cas isotherme
 $u^+ = 2,5 \ln(y^+) + 5,5$

$$u^+ = y^+$$

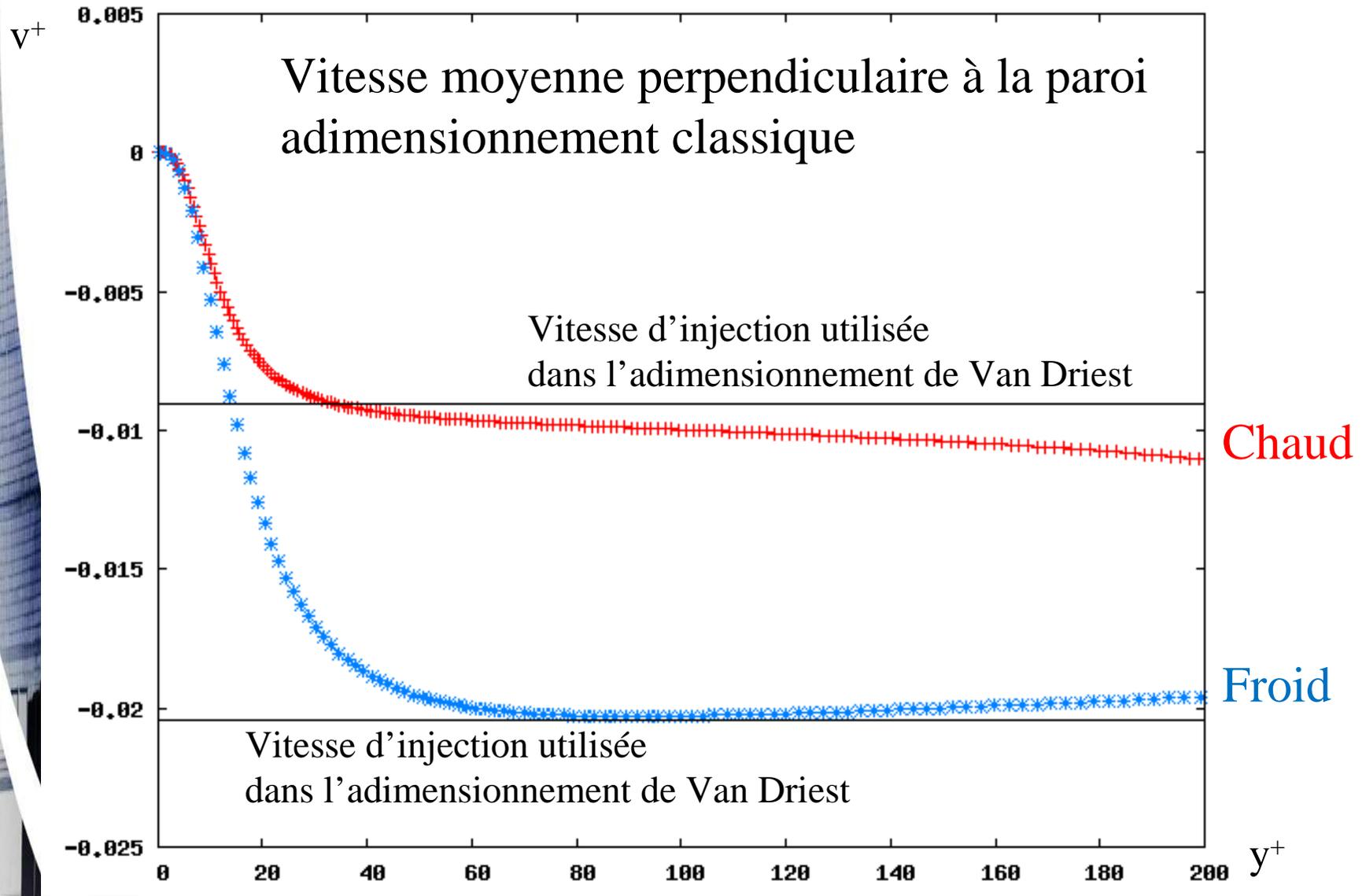


Froid

Chaud

y^+

3. Statistiques de la turbulence



3. Statistiques de la turbulence

Vitesse moyenne perpendiculaire à la paroi = 0 dans le cas **isotherme**

Cette **vitesse** est liée au gradient de **température** qui crée un gradient de **masse volumique** qui génère la vitesse moyenne perpendiculaire au paroi.

Cette vitesse est négative (du chaud vers le froid) :

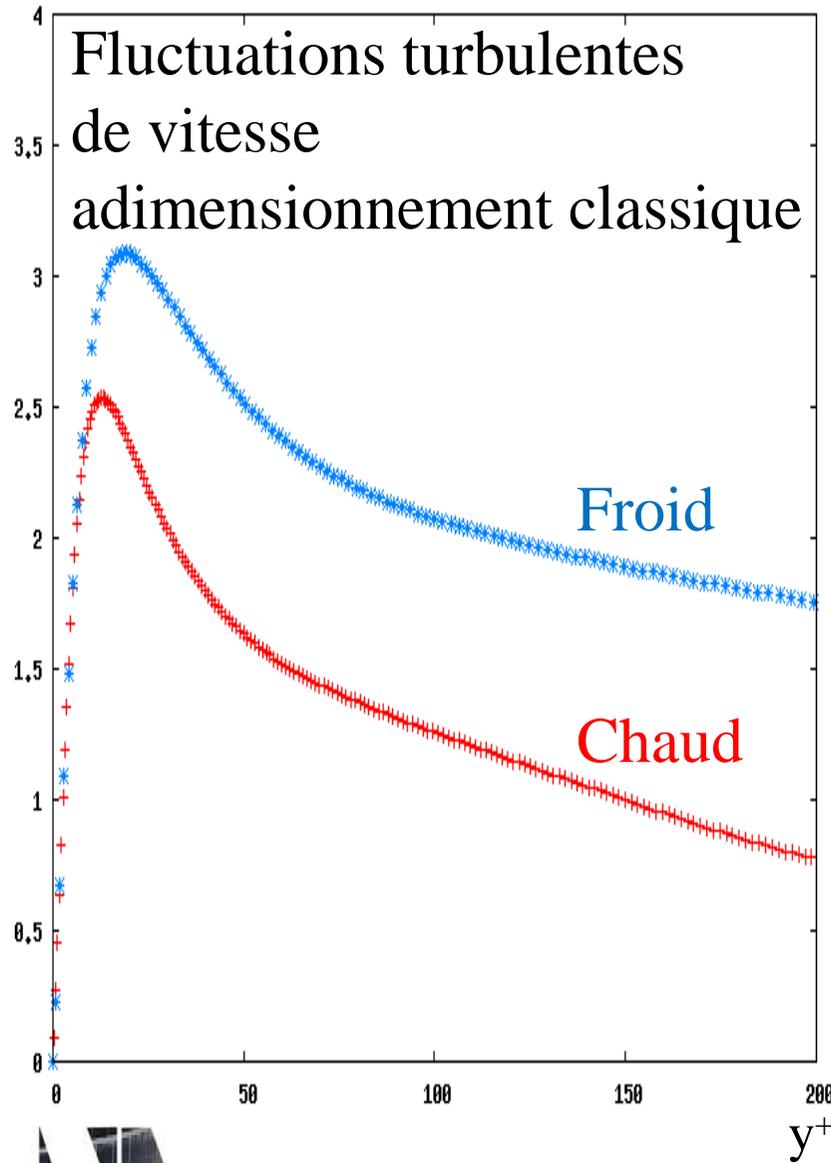
- elle éloigne les structures turbulentes de la paroi chaude,
- elle les rapproche de la paroi froide.

Analogie avec les parois poreuses où on injecte du fluide.
Adimensionnement équivalent à celui de Van Driest.

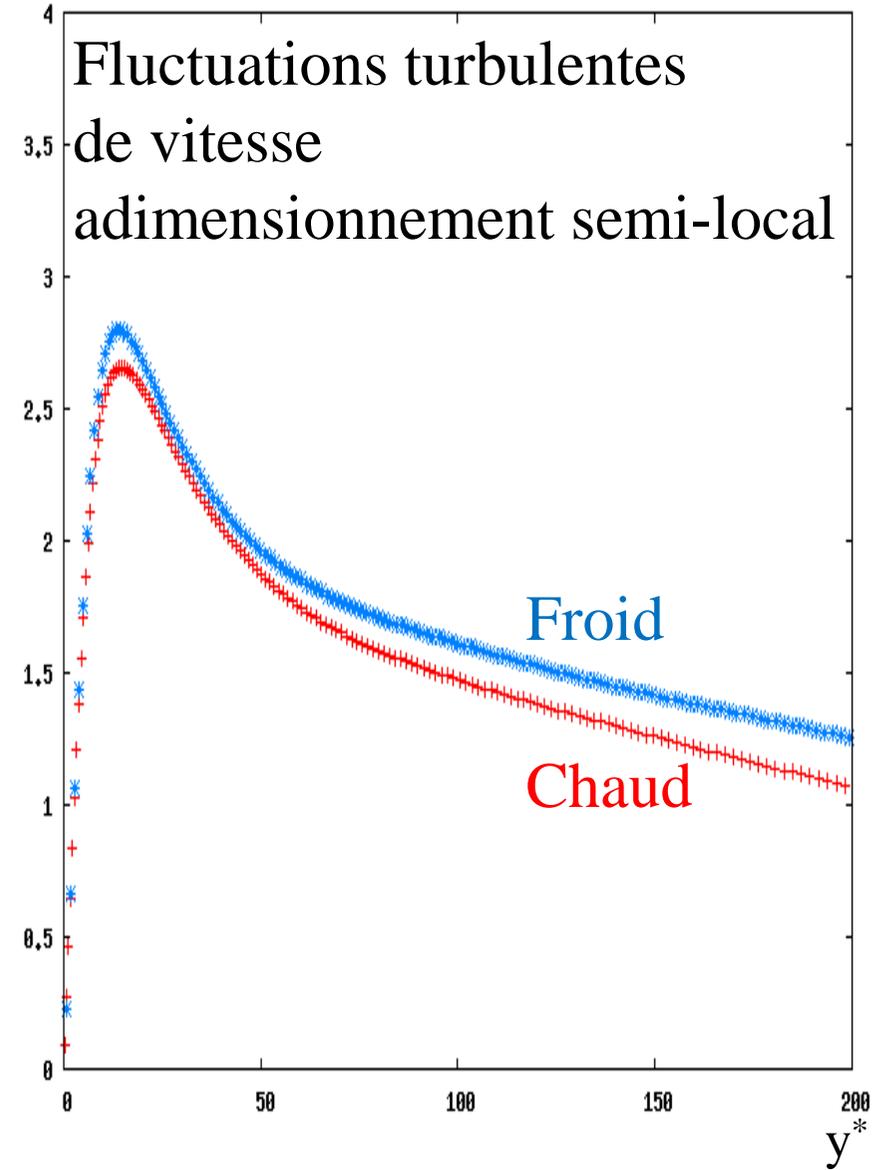
On peut donc interpréter l'adimensionnement de Van Driest comme la prise en compte d'une vitesse perpendiculaire à la paroi créée par le gradient de température.

3. Statistiques de la turbulence

$Urms^+$

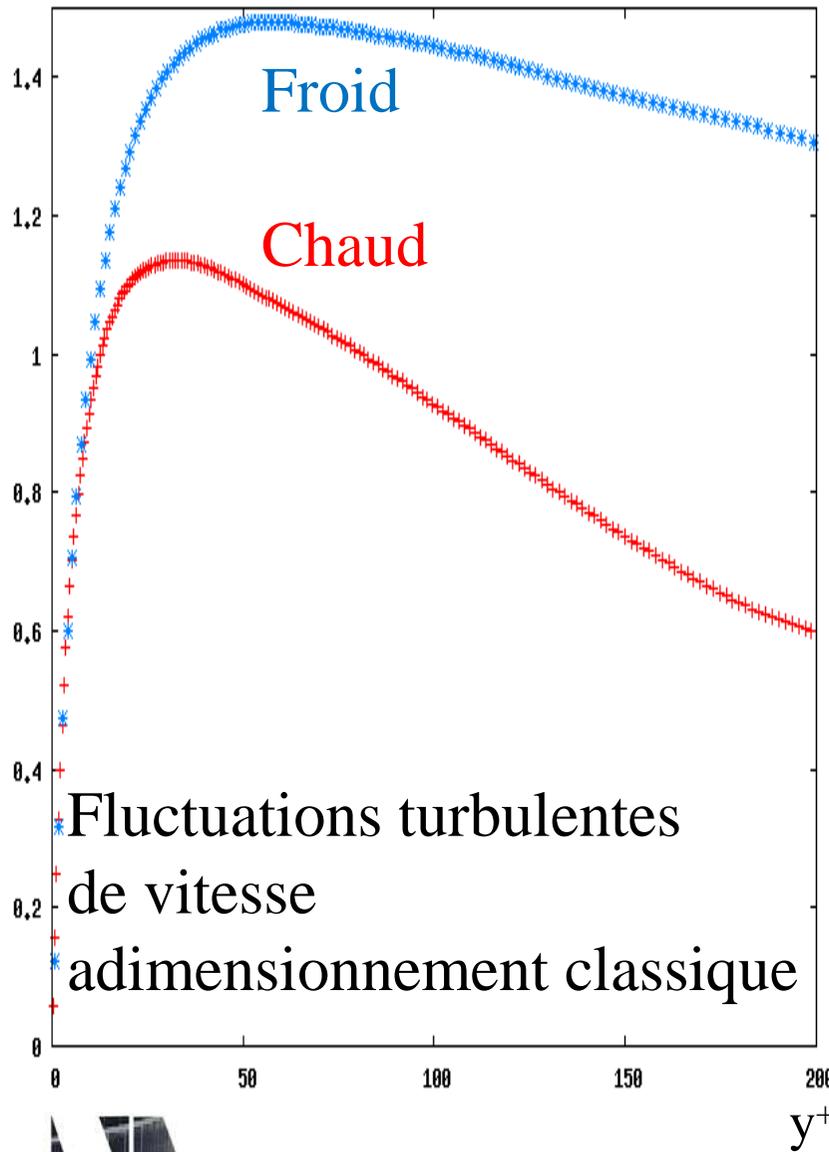


$Urms^*$

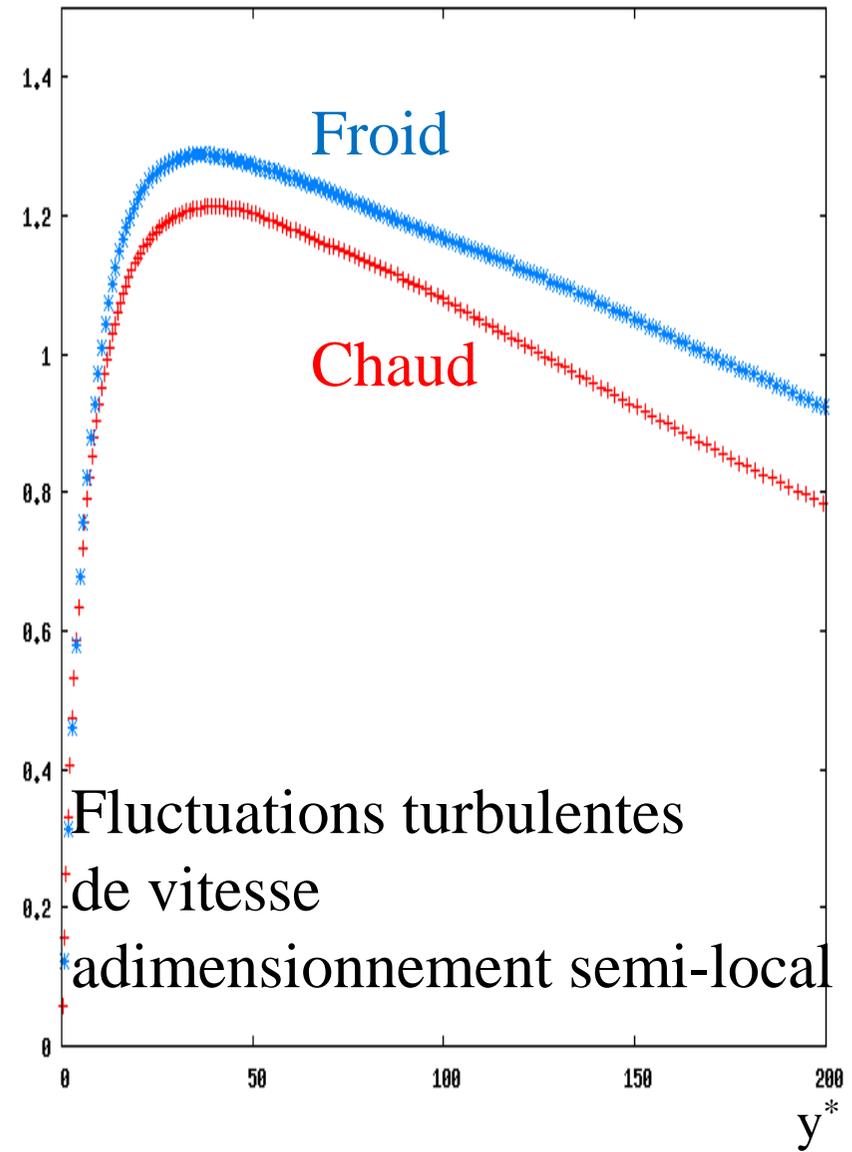


3. Statistiques de la turbulence

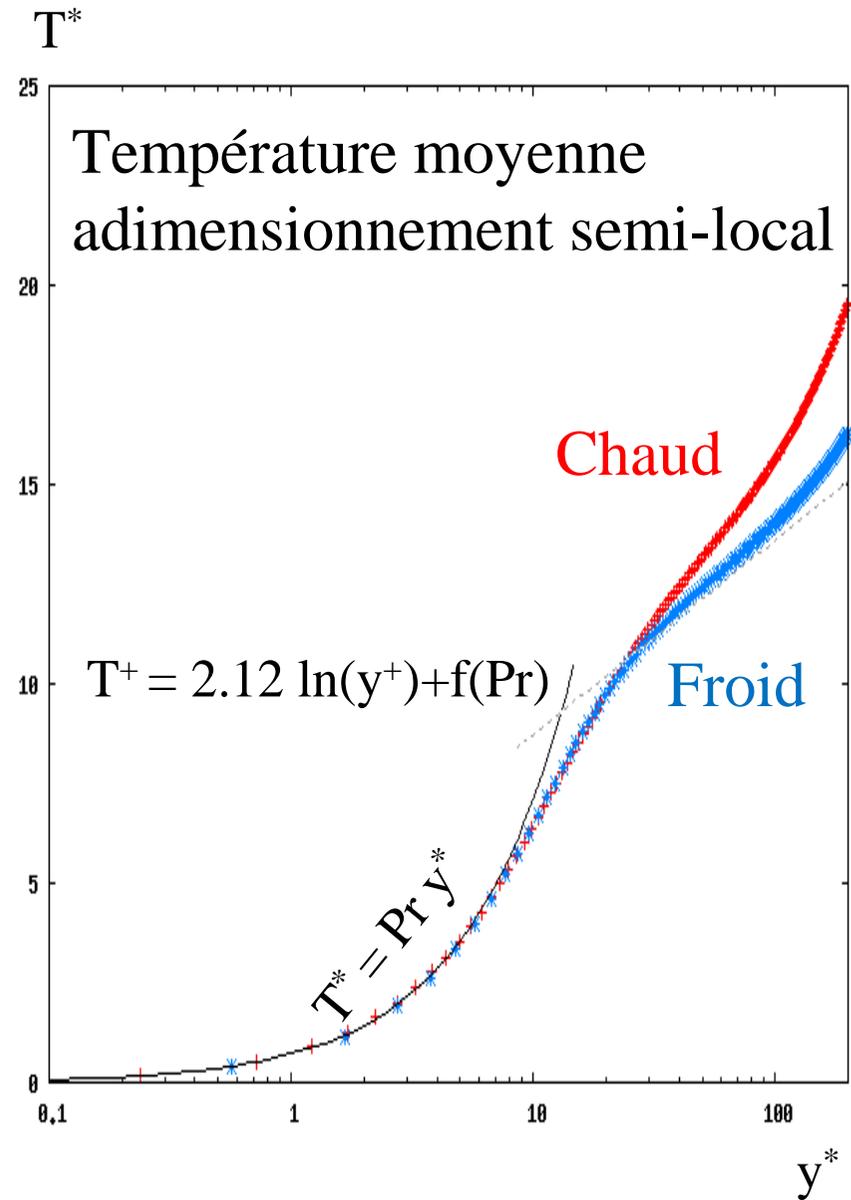
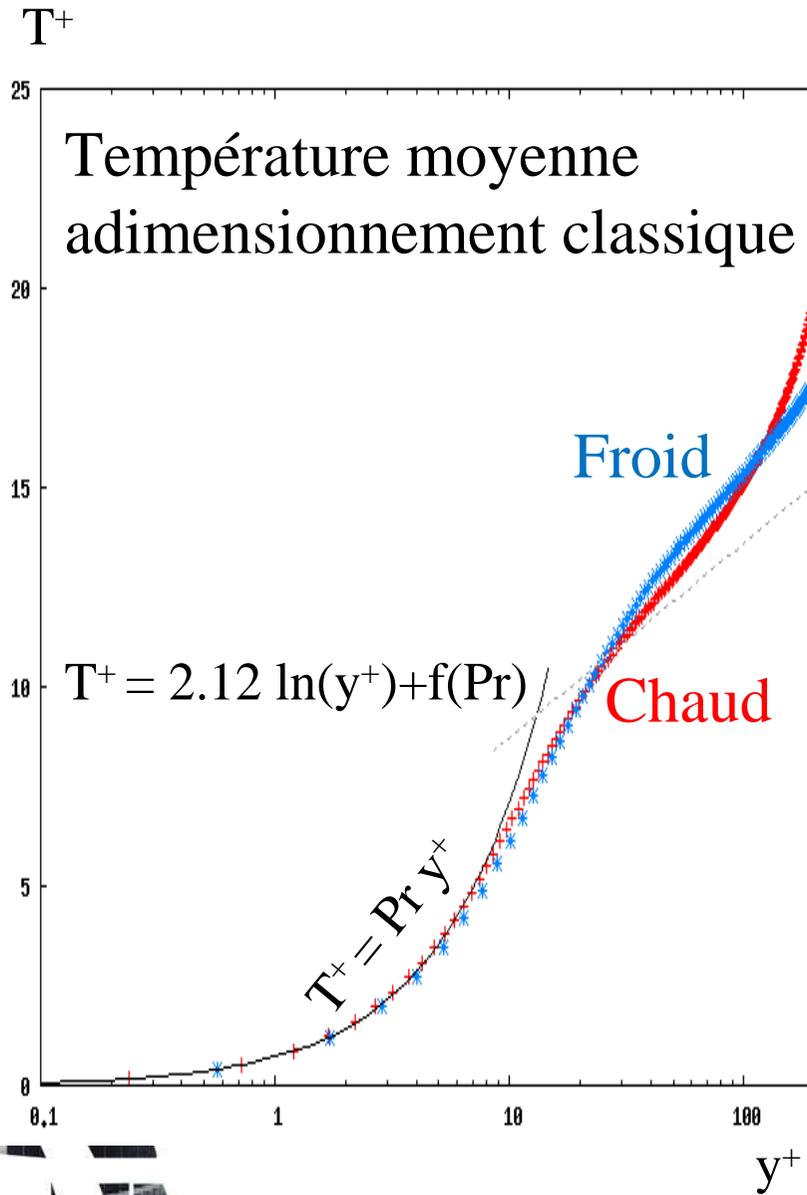
W_{rms}^+



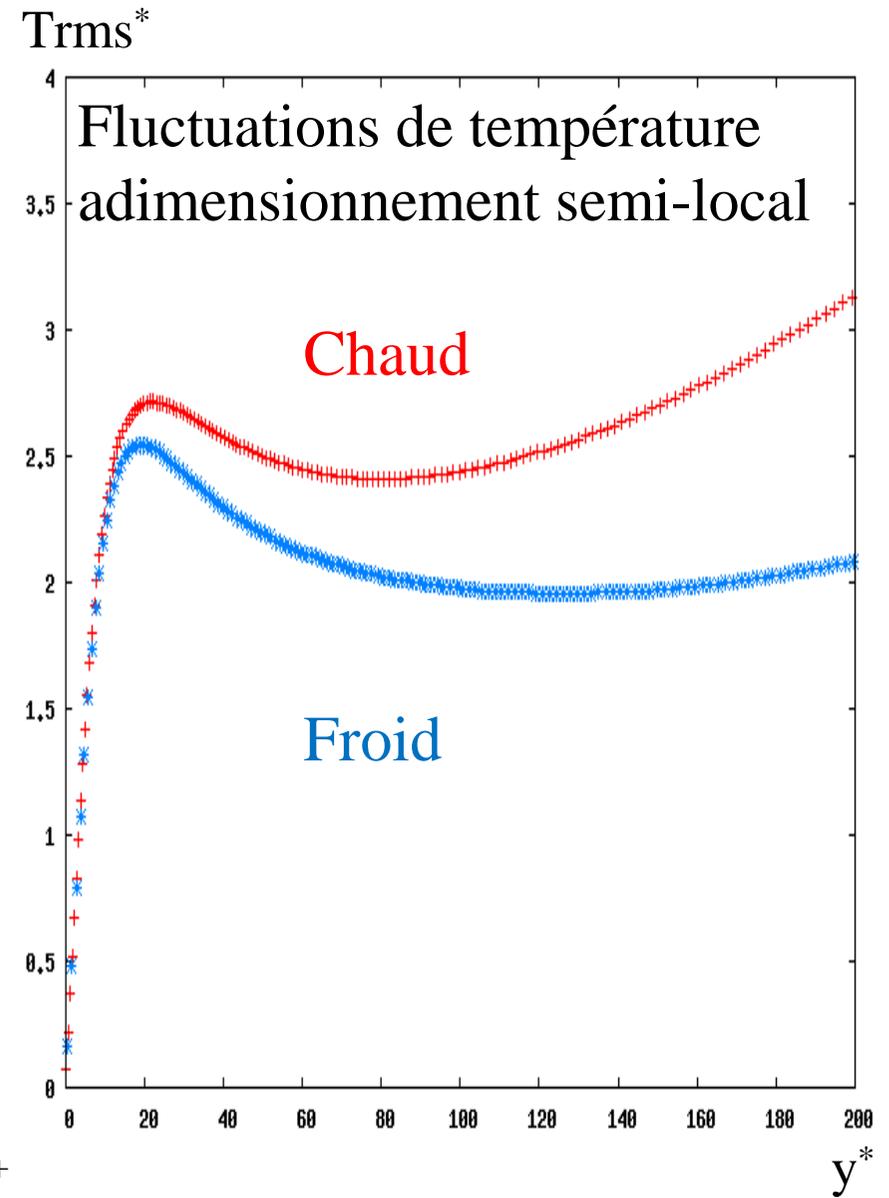
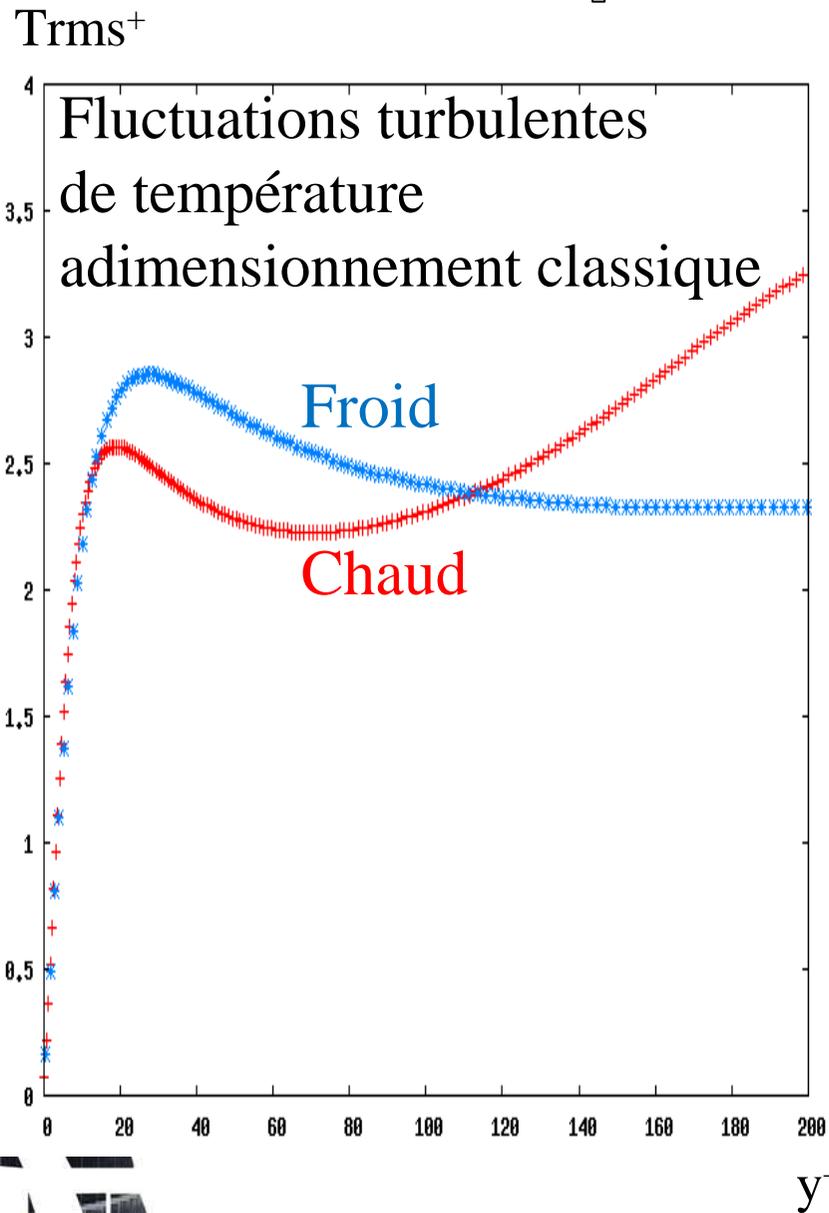
W_{rms}^*



3. Statistiques de la turbulence



3. Statistiques de la turbulence



3. Statistiques de la turbulence

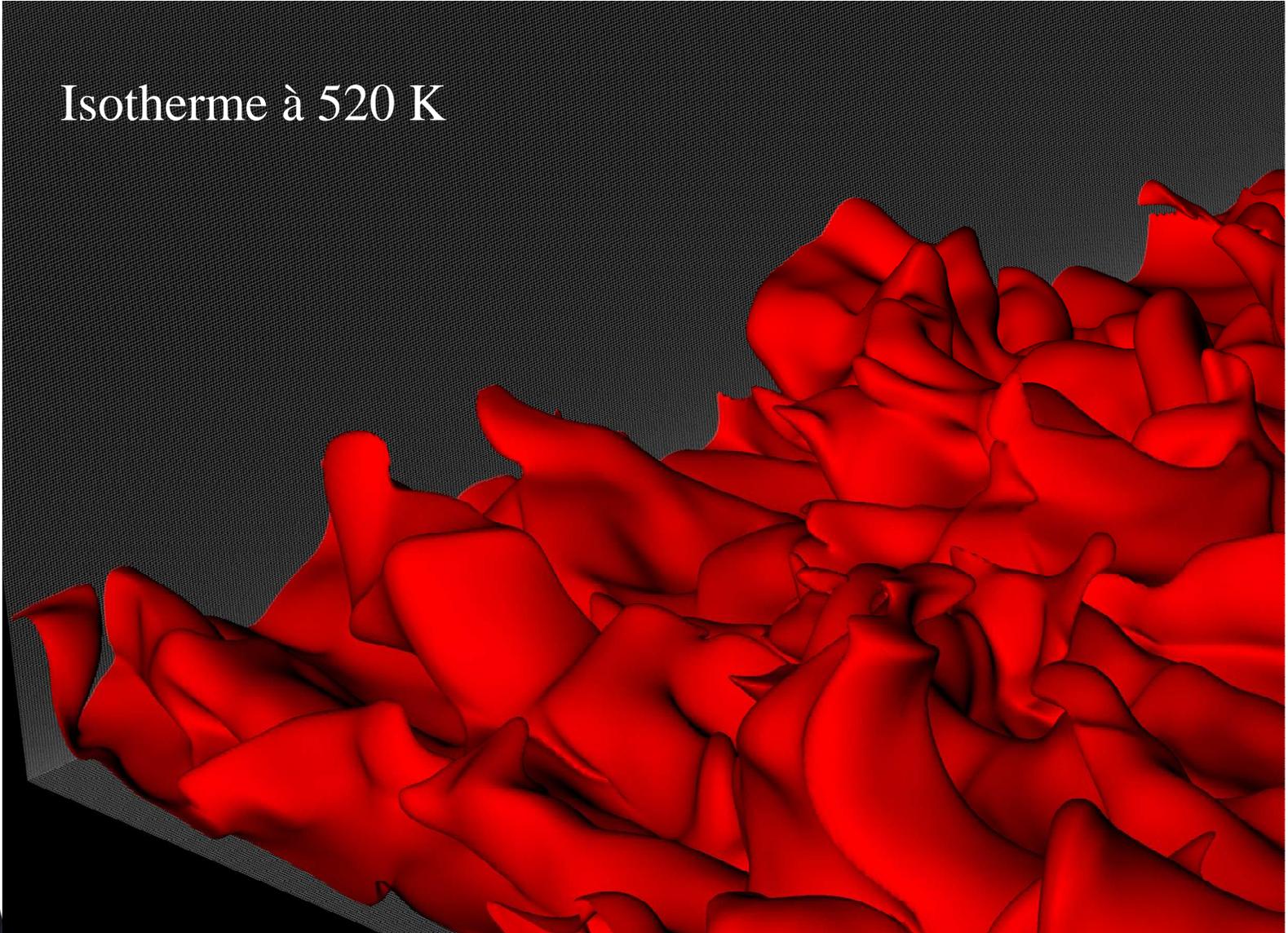
L'adimensionnement semi-local qui tient compte de la **variation des propriétés** du fluide dans la direction perpendiculaire aux parois **ne suffit pas** à faire se superposer les profils des côtés chaud et froid.

Les différences entre les écoulements isotherme et chauffé asymétriquement ne s'expliquent donc pas par la simple variation moyenne des propriétés du fluide (masse volumique).

Le **couplage turbulence et température** est plus **complexe**.

C'est la première fois que ceci est **montré par SND dans un cas pleinement turbulent** (sans effet bas Reynolds).

Isotherme à 520 K



Conclusions et perspectives

Conclusions :

Nous avons réalisé

1. des optimisations de la **parallélisation** du code Trio_U (mailleur parallèle et méthode multigrille),
2. une **simulation numérique directe de référence**,
3. les **statistiques** de la turbulence,
4. une étude **spectrale**.

Perspectives :

Nous prévoyons de

1. réaliser des **SND** et **SGE** d'écoulements turbulents très anisothermes,
2. mieux comprendre les **interactions** entre **turbulence** et **thermique**,
3. développer de **nouveaux modèles SGE** adaptés aux écoulements dans les **récepteurs-échangeurs solaires**.

Remerciements :
calcul,

CINES et GENCI pour les ressources de

CEA –Grenoble pour Trio_U.

Merci pour votre attention

