

Ecoulements turbulents fortement anisothermes et/ou diphasiques au sein des procédés solaires

LABORATOIRE
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX
et ENERGIE SOLAIRE

UPR 8521 du CNRS,
conventionnée avec
l'université de Perpignan

PROCESSES, MATERIALS
and SOLAR ENERGY
LABORATORY

Adrien Toutant





Activités de recherche

- ❑ Maître de conférence à l'UPVD et PROMES depuis 2007
- ❑ Encadrements
 - 6 thèses soutenues
 - 3 thèses en cours
 - 2 postdoctorants
 - 12 stages de master
- ❑ Production scientifique
 - 17 publications internationales
 - 17 conférences internationales
 - 13 conférences nationales, 2 brevets, 8 séminaires
- ❑ Prix de thèse Leopold Escande 2007
- ❑ Titulaire de la PES depuis 2010



Responsabilités administratives

- ❑ Directeur des études du département Polytech EnR : 3 promotions de 45 étudiants soit 135 étudiants au total
- ❑ Responsable de la thématique Ecoulements et transferts au sein de l'équipe Thermophysique et écoulement
- ❑ Responsable scientifique de contrats de recherche

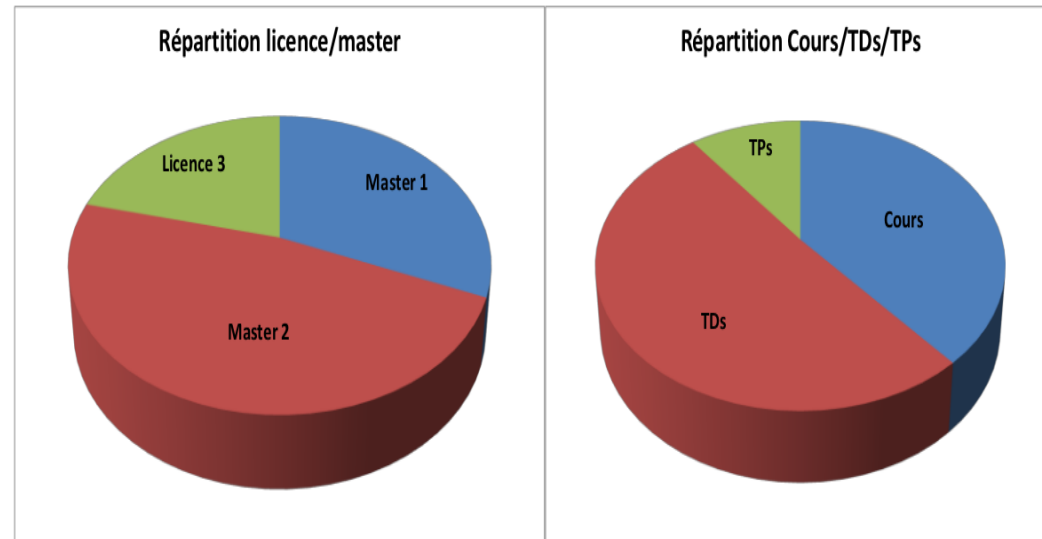
Activités d'enseignements

❑ Enseignements au master Energie Solaire et au département Polytech EnR

- Mécanique des fluides
- Transferts thermiques
- Outils numériques (méthodes et logiciels)
- Echangeurs

❑ Volumes de 230 heures

- 50 heures en licence 3
- 180 heures en master
- 90 heures de cours
- 140 heures de TDs ou TP



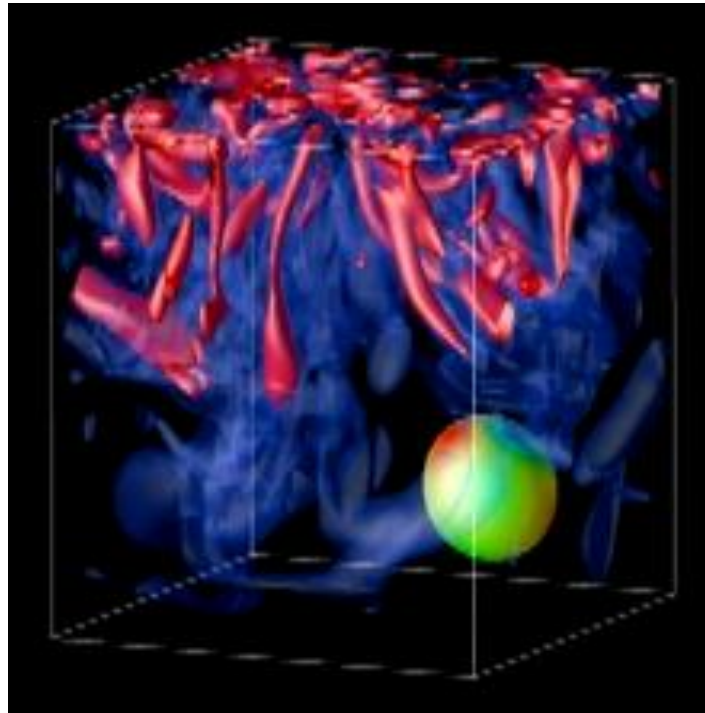


Les écoulements au sein des procédés solaires

- ❑ Dans leur grande majorité, les écoulements au sein des procédés solaires sont **turbulents** fortement **anisothermes** et/ou **diphasiques**.
- ❑ La compréhension des **interactions** entre la dynamique, la thermique et/ou les interfaces est une voie à fort potentiel pour l'**optimisation des procédés solaires**.

Ecoulement diphasique

Interaction entre l'**interface** liquide/gaz et les structures **turbulentes**

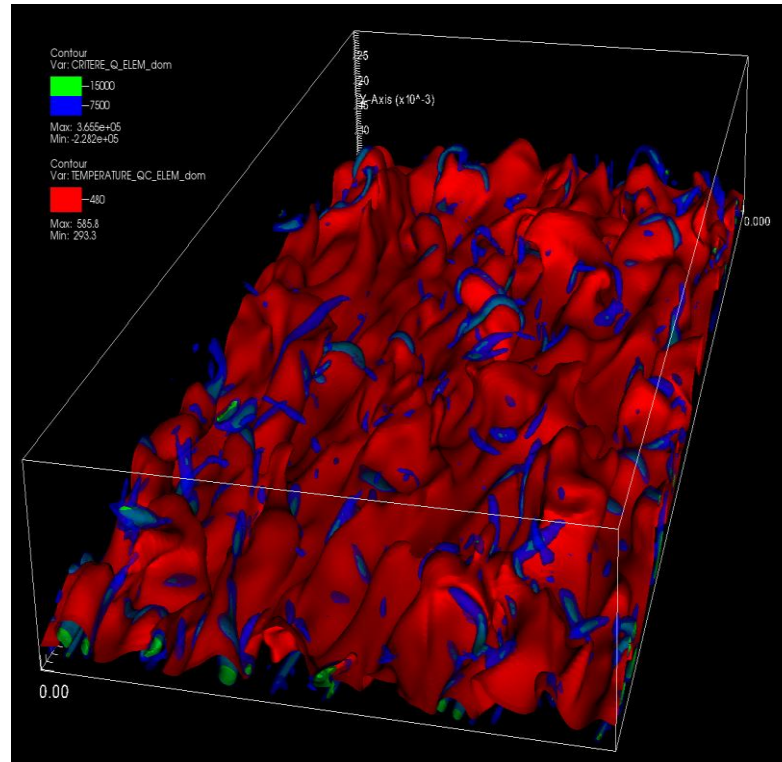


Interaction d'une bulle d'air avec une turbulence de grille
Isosurfaces : critère-Q

Echelle de couleur : déformations de l'interface

Ecoulement fortement anisotherme

Interaction entre la **turbulence** et le **gradient de température**



Canal plan bi-périodique soumis à un fort gradient de température
Isosurfaces : critère-Q (en bleu et vert)
Isotherme 480 K (en rouge)

Stratégie d'étude

Une des difficultés :
différence de taille entre
les petites structures turbulentes ($\sim \mu\text{m}$) et
la géométrie du récepteur solaire ($\sim \text{m}$)

➔ Approche multi-échelles

- ☐ Echelle **locale** : étude des interactions
- ☐ Echelle **intermédiaire** : caractérisation des transferts
- ☐ Echelle **industrielle** : dimensionnement

Outils **numériques** et **expérimentaux**
adaptés à chaque échelle

Approche multi-échelles



Les procédés solaires étudiés :

- ❑ Thème de recherche principal : Filière thermodynamique
 - Moyenne température
 - Haute température

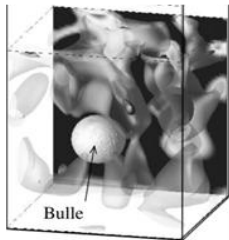
- ❑ Thème de recherche secondaire : Filière photovoltaïque

Approche multi-échelles

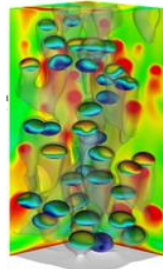
La filière thermodynamique moyenne température Cycle Rankine (400-600°C)

Amont

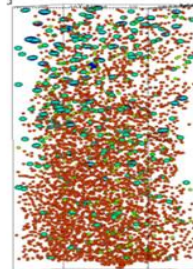
Application



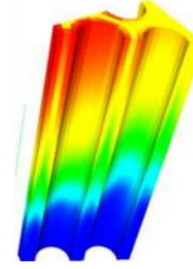
Interaction
bulle et turbulence de grille



Portion de
colonne à bulles



Colonne à bulles



Mélange liquide-vapeur
dans un échangeur



Centrale solaire
à miroir de Fresnel
Génération directe de vapeur

SND

ISS

Moyennée 3D local

Corrélations (coefficient d'échange, pertes de charge)

Echelle
locale

Echelle
intermédiaire

Echelle
industrielle

Approche multi-échelles



La filière thermodynamique haute température

Cycle Brayton (1000°C)

Composant clé : le **récepteur solaire** à haute température

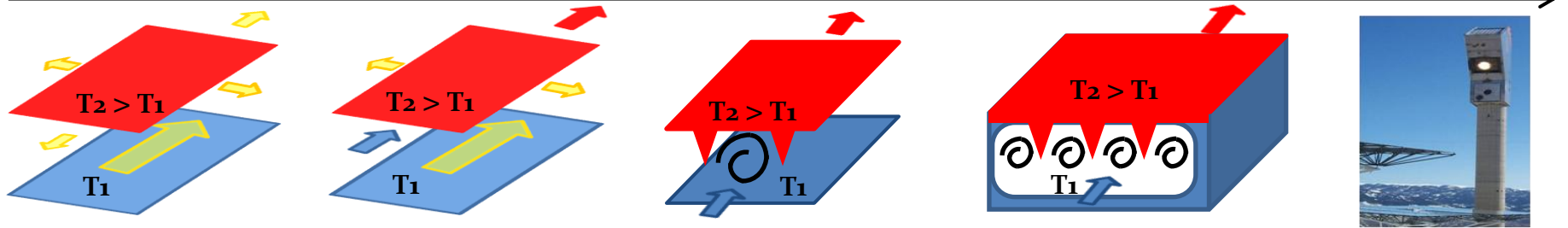
- Transfert de l'énergie solaire concentrée au fluide caloporteur
- Écoulement turbulent
- Chauffage asymétrique
- Sièges des interactions dynamique/thermique
- Choix d'un récepteur surfacique et **module élémentaire**

Approche multi-échelles

La filière thermodynamique haute température

Amont

Application



Canal plan bi-périodique

Etablissement spatial
couche limite thermique

Association riblets et
promoteur de tourbillon

Module élémentaire

Récepteur solaire

SND

SGE

RANS

Corrélations

S-PIV

Four solaire

PEGASE

Echelle
locale

Echelle
modulaire

Echelle
industrielle

Plan

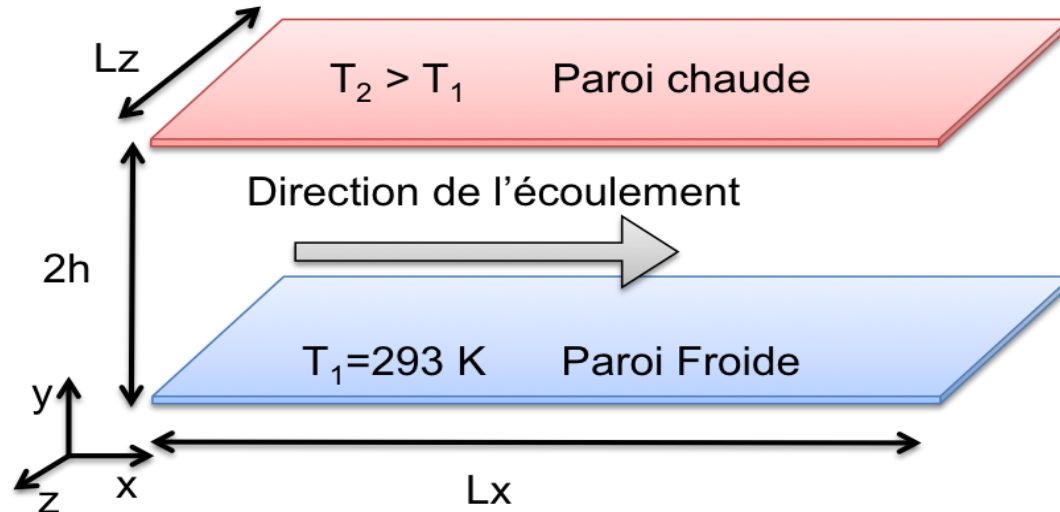


1. Echelle locale
2. Echelle modulaire
3. Quelques mots sur l'échelle industrielle

Conclusions et perspectives

Echelle locale : géométrie simplifiée

- ❑ Caractéristiques principales récepteur solaire haute température :
 - Ecoulement turbulent
 - Chauffage asymétrique
- ❑ Canal plan bi ou mono périodique



- ❑ Etude du couplage dynamique/thermique
- ❑ Développement d'outils numériques et expérimentaux

Echelle locale : outils numériques



- ❑ Concevoir des outils numériques pour l'étude des interactions entre la dynamique et la thermique
- ❑ Améliorations apportées
 - Schémas en temps, convection
 - Méthodes multi-grilles parallèles
 - Postraitements pour l'analyse spectrale
 - Réflexion modèle SGE thermique
 - **Nouvel algorithme pour le quasi compressible**

Echelle locale : nouvel algorithme

Apport du nouvel algorithme :

- Conservation de la masse et de l'énergie
- Couplage entre les différentes grandeurs

Masse volumique
(Conservation de la masse)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

La conservation globale est assurée par les volumes finis

- Pression Thermodynamique
(Conservation de l'énergie intégrée)
- Température
(Loi des gaz parfaits)

$$\frac{\partial P_{th}}{\partial t} = \frac{\gamma - 1}{V} \int_S \lambda(T) \nabla T dS$$
$$T = \frac{P_{thermo}}{\rho r}$$

Point fixe

- Vitesse
(Equation de Navier-Stokes)
- Pression dynamique
(Conservation de l'énergie locale)

$$\nabla \cdot (U) = \frac{1}{\gamma P_{th}} \left((\gamma - 1) \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - \frac{\partial P_{th}}{\partial t} \right)$$

Echelle locale : outils numériques

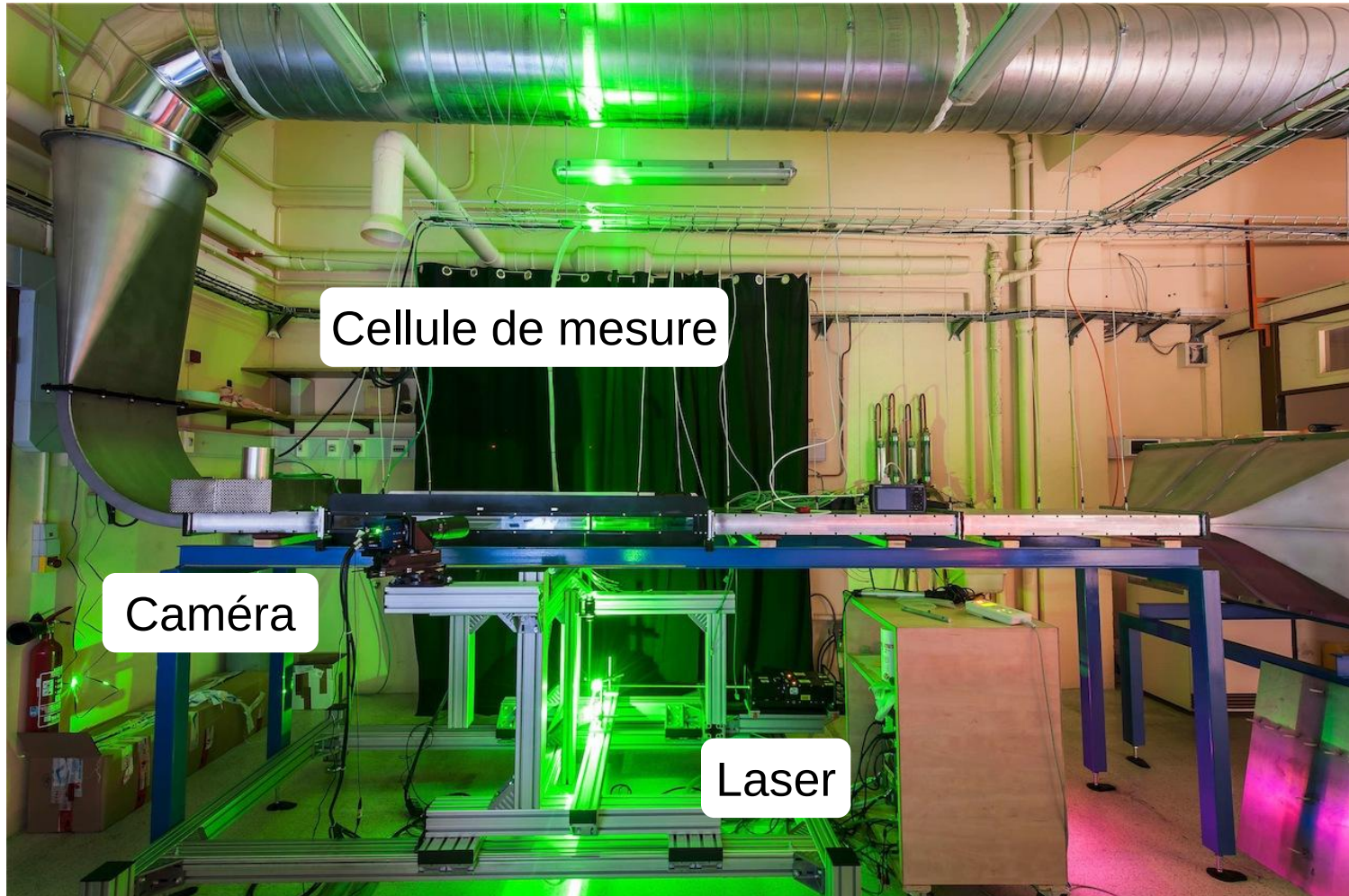
- ❑ Outils numériques précis :
 - Propriétés de conservation
 - Ecoulements de type canal plan en accord avec la littérature
- ❑ Simulations fines : SND et SGE
- ❑ Données de référence
pour l'étude du couplage thermique/dynamique
- ❑ Co-encadrement de **3 thèses** avec Françoise Bataille (Sylvain Serra, Raphaël Monod et Frédéric Aulery)
- ❑ Collaborations avec l'IRSN et avec le CEA pour les améliorations du code Trio_U

Echelle locale : approche expérimentale



- ❑ Soufflerie canal plan à veine ouverte MEETIC :
Moyens d'Essais des **Ecoulements Turbulents pour l'Intensification des Transferts de Chaleur**
- ❑ Moyen expérimental adapté pour la **validation des codes de simulation**
- ❑ Caractéristiques :
 - Distance entre les parois à l'échelle 5 du récepteur solaire
 - Nombres de Reynolds entre 5 000 et 100 000
 - Paroi chauffée jusqu'à 300 °C
- ❑ Instrumentations
 - Micro manomètre
 - Débitmètre
 - S-PIV
 - Sondes d'exploration équipées de micro thermocouples
 - Caméra infrarouge

Echelle locale : approche expérimentale



Echelle locale : approche expérimentale



☐ Ecoulement de type canal plan

- Evolution linéaire de la pression
- Caractère établi et monodimensionnel de l'écoulement
- Vitesses moyennes et fluctuantes en accord avec la littérature

☐ Outil dédié

- Étude des interactions dynamique/thermique
- Validation des codes de calculs

☐ Co-encadrement de **2 thèses** avec Gabriel Olalde (Xavier Daguenet et Arnaud Colléoni)

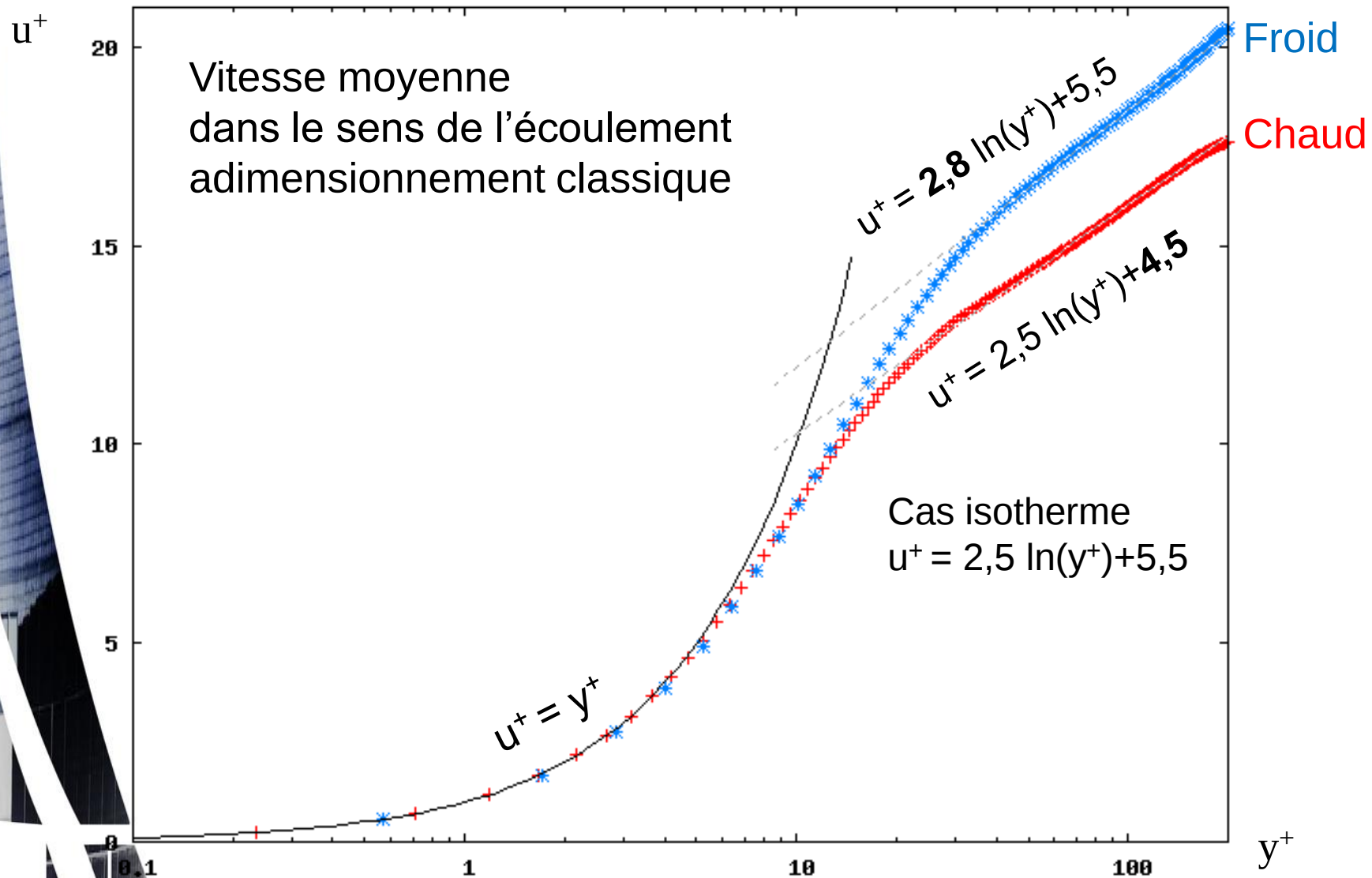
☐ Collaboration avec le Laboratoire de Mécanique de Lille et la plateforme nationale de métrologie optique à Lille



Echelle locale : couplage thermique/dynamique

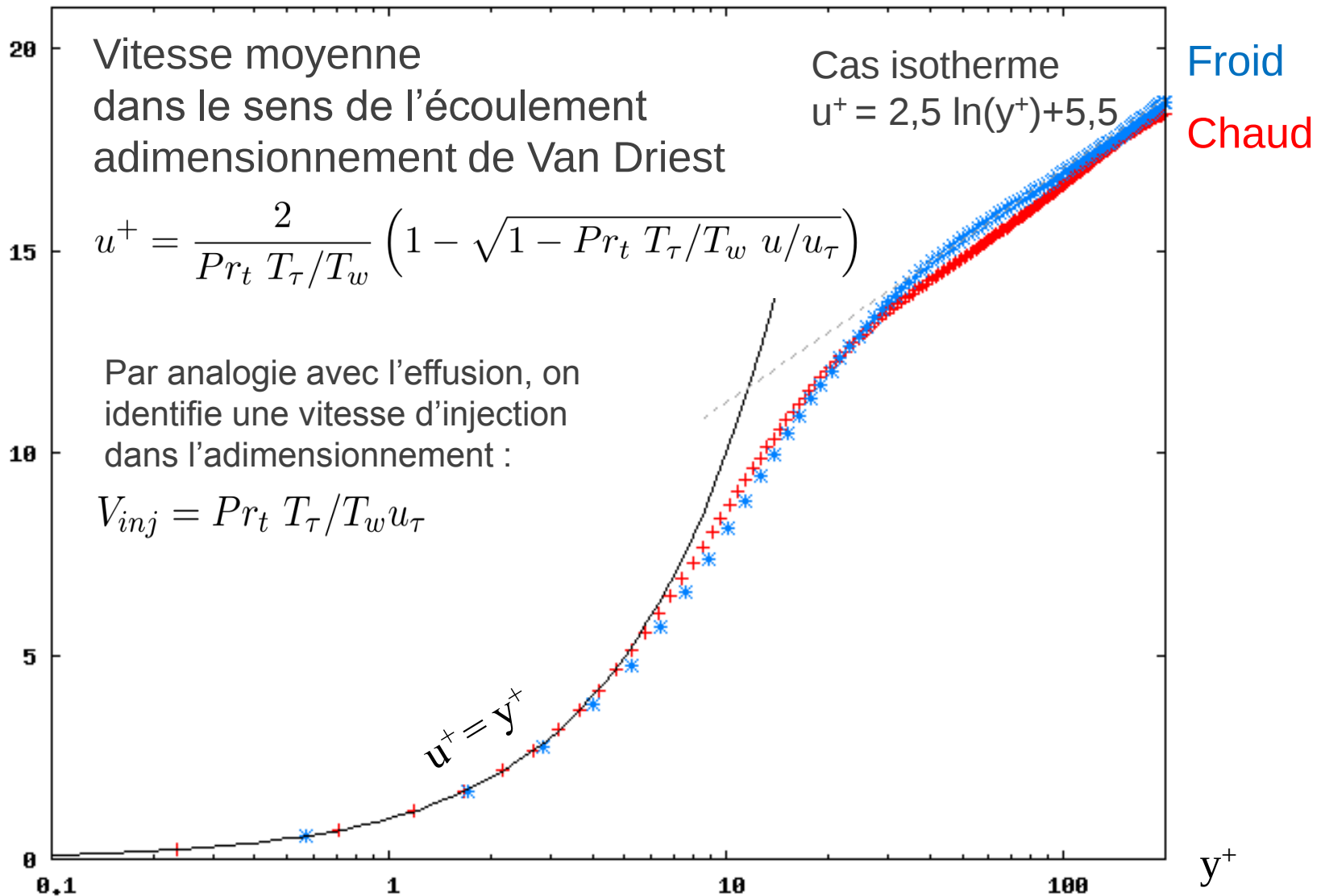
- ☐ Objectif : Développement de modèles pour l'échelle modulaire (RANS)
- ☐ Apport : Compréhension du mécanisme de couplage
- ☐ Etude des modifications des propriétés de la turbulence du fait du gradient de température :
 - Vitesses moyennes et fluctuantes
 - Températures moyenne et fluctuante
 - Etudes dans l'espace physique et spectral
- ☐ Etude réalisée par simulation numérique fine

Echelle locale : SND à $Re_\tau=395$ et $T2/T1=2$

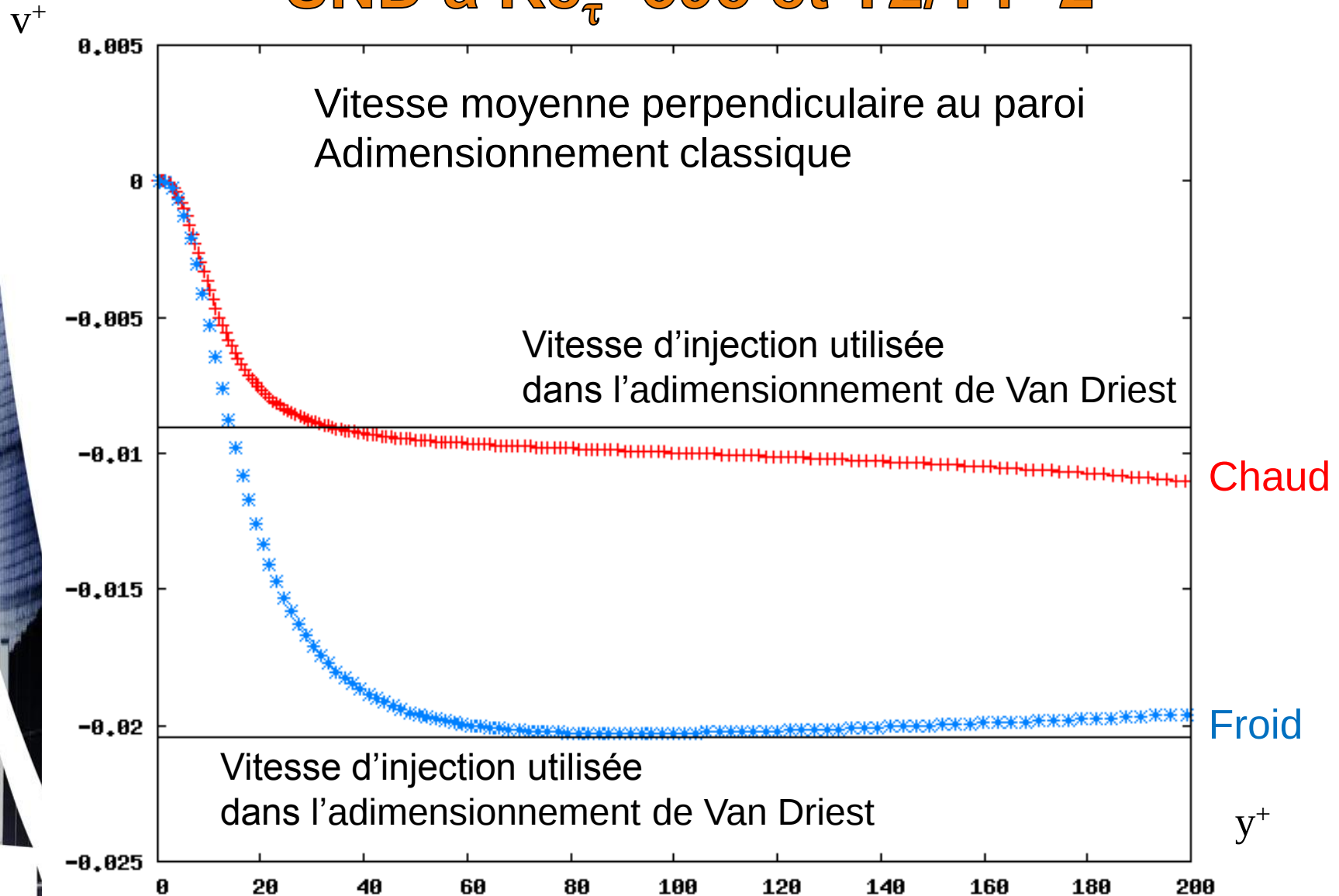


Echelle locale : SND à $Re_\tau = 395$ et $T_2/T_1 = 2$

u^+



Echelle locale : SND à $Re_\tau=395$ et $T2/T1=2$





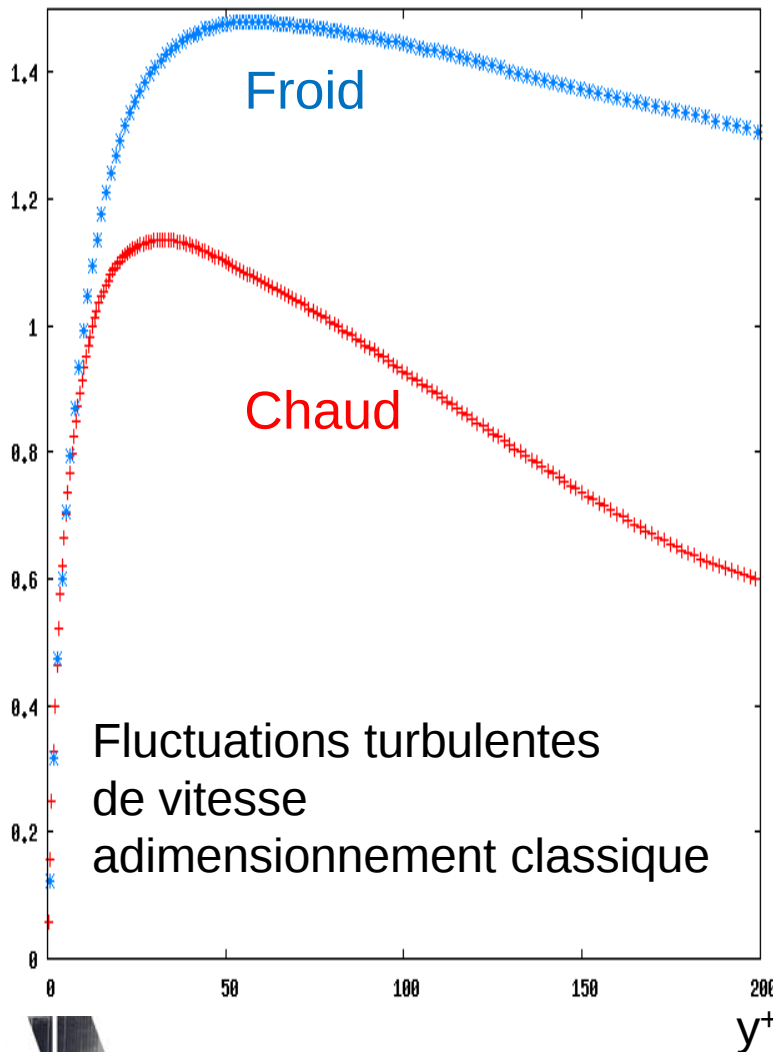
Echelle locale : couplage thermique/dynamique

- ❑ **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.
- ❑ **L'adimensionnement de Van Driest** s'interprète donc comme la prise en compte **d'une vitesse perpendiculaire à la paroi** créée par le **gradient de température**.
- ❑ Cette vitesse **modifie les propriétés de la turbulence**. Comme elle est négative (du chaud vers le froid) :
 - elle éloigne les structures turbulentes de la paroi chaude
 - elle les rapproche de la paroi froide

Echelle locale :

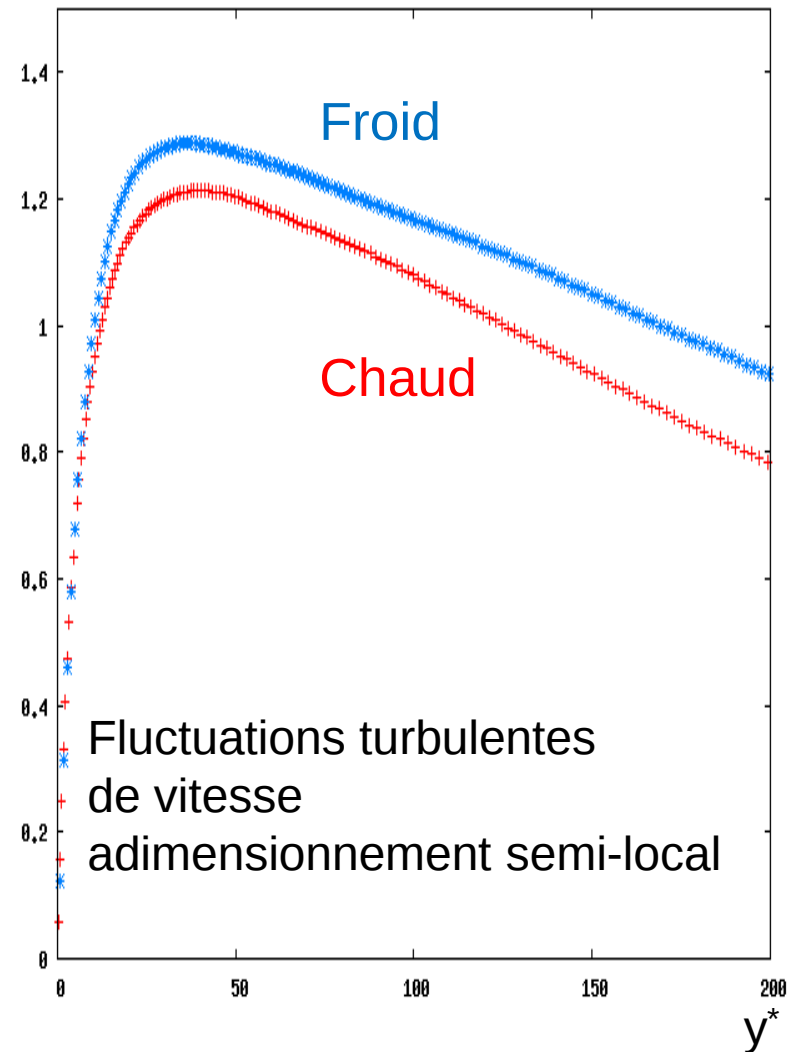
SND à $Re_\tau=395$ et $T2/T1=2$

W_{rms}^+



Adrien Toutant

W_{rms}^*



26

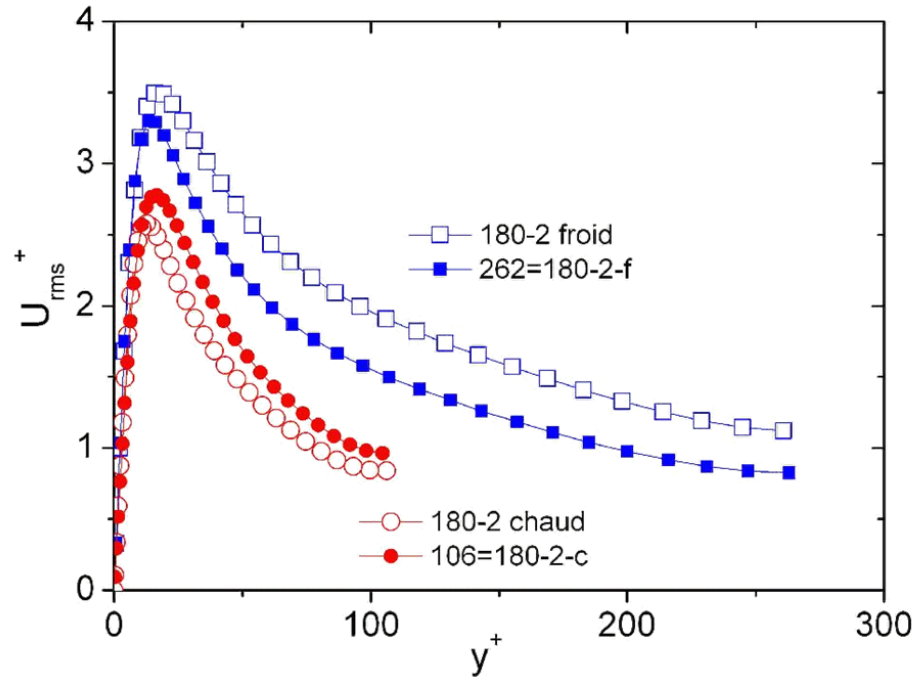


Echelle locale : couplage thermique/dynamique

- ☐ La prise en compte des variations moyennes des propriétés du fluide (adimensionnement semi local) ne supprime pas la dissymétrie (grandeurs moyennes ou rms).
- ☐ 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).
- ☐ La dissymétrie s'explique-t-elle par les niveaux de turbulence des côtés chaud et froid ?

Echelle locale : couplage thermique/dynamique

- Effet visqueux : comparaison des profils anisothermes avec des profils isothermes à des Re équivalents



- L'effet du gradient de température est plus important que l'effet visqueux
- Explication à partir d'études dans l'espace spectral

Echelle locale : étude spectrale

- ☐ Etude des différents termes d'évolution de l'énergie cinétique turbulente
- ☐ Modèle de spectre pour la zone inertielle du spectre d'énergie cinétique turbulente

Echelle locale : terme spécifique au cas anisotherme

$$\frac{\partial E_c(k, y)}{\partial t} = \Pi(k, y) + \sum T_n(k, y) + D(k, y)$$

Production

Transfert

Dissipation

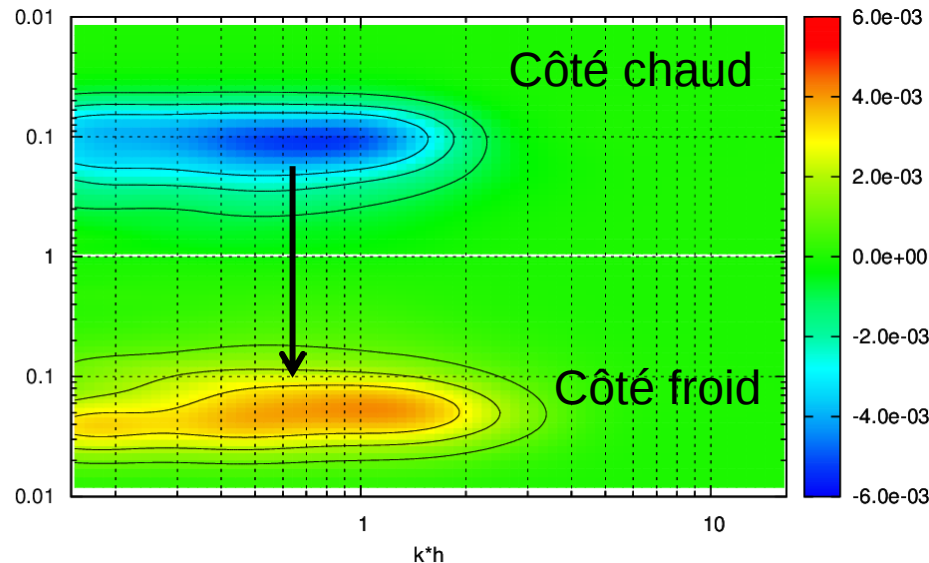
Terme de transfert spécifique au cas anisotherme

$$\int_k -2\Re \left[\sum_i \left[\widehat{v_i^*}' \overline{U_y} \frac{\partial \widehat{v_i}'}{\partial y} + \frac{1}{2} \widehat{v_i^*}' \widehat{v_i}' \frac{\partial \overline{U_y}}{\partial y} - \sum_j \frac{1}{2} \widehat{v_i^*}' \left(\widehat{v_i}' \frac{\partial \widehat{u_j}'}{\partial x_j} \right) + \sum_j \widehat{v_i^*}' \overline{V_i} \frac{\partial \widehat{u_j}'}{\partial x_j} \right] \right] dk$$

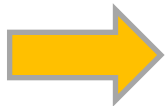
Vitesse perpendiculaire
aux parois non nulle

Divergence de la vitesse
non nulle

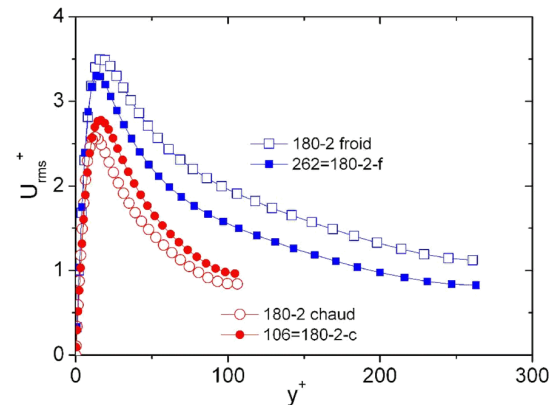
Echelle locale : terme spécifique au cas anisotherme



Transfert d'énergie cinétique turbulente du côté chaud vers le côté froid

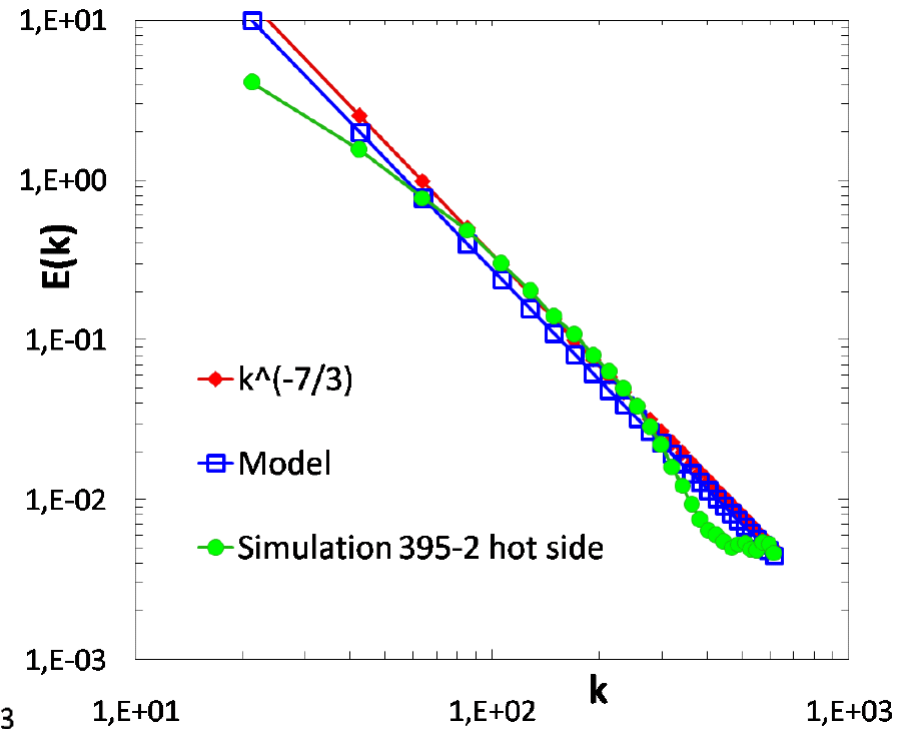
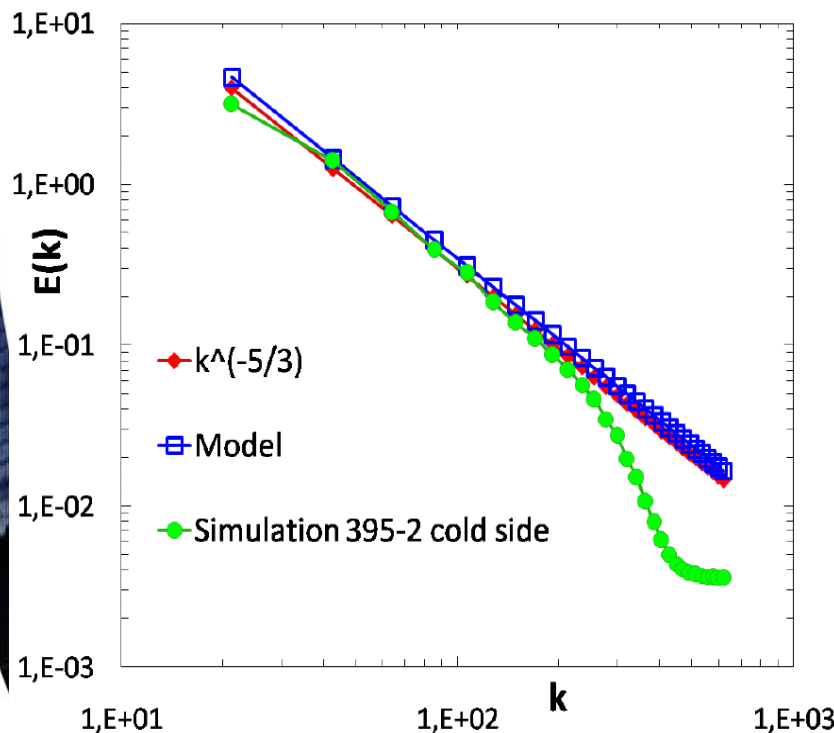


**Explication des niveaux
de fluctuations observés**



Echelle locale : modèle de spectres

- Pente de la zone inertielle égale à $-5/3$ ou $-7/3$ suivant le gradient de température, le côté chaud ou froid, le Re
- Introduction d'un **temps caractéristique** de la turbulence fonction du gradient de température



- Le modèle retrouve le bon comportement

Echelle locale : conclusion

- ❑ Développement d'outils précis et complémentaires (numériques et expérimentaux)
- ❑ Couplage thermique/dynamique
 - Le gradient de température **modifie les caractéristiques** de l'écoulement turbulent
 - Une **dissymétrie** apparaît entre côté chaud et froid
 - Cette dissymétrie ne s'explique pas par les variations moyennes des propriétés du fluide ou le niveau de turbulence
 - Mise en évidence d'un **transfert d'énergie cinétique turbulente** du côté chaud vers le côté froid
 - Proposition d'un **modèle** pour la zone inertielle du **spectre** d'énergie cinétique turbulente
- ❑ Collaboration avec le Lawrence Livermore National Laboratory

Echelle modulaire



❑ Apport :

- Intensification des transferts de chaleur
- Caractérisation des transferts de chaleur à haute température

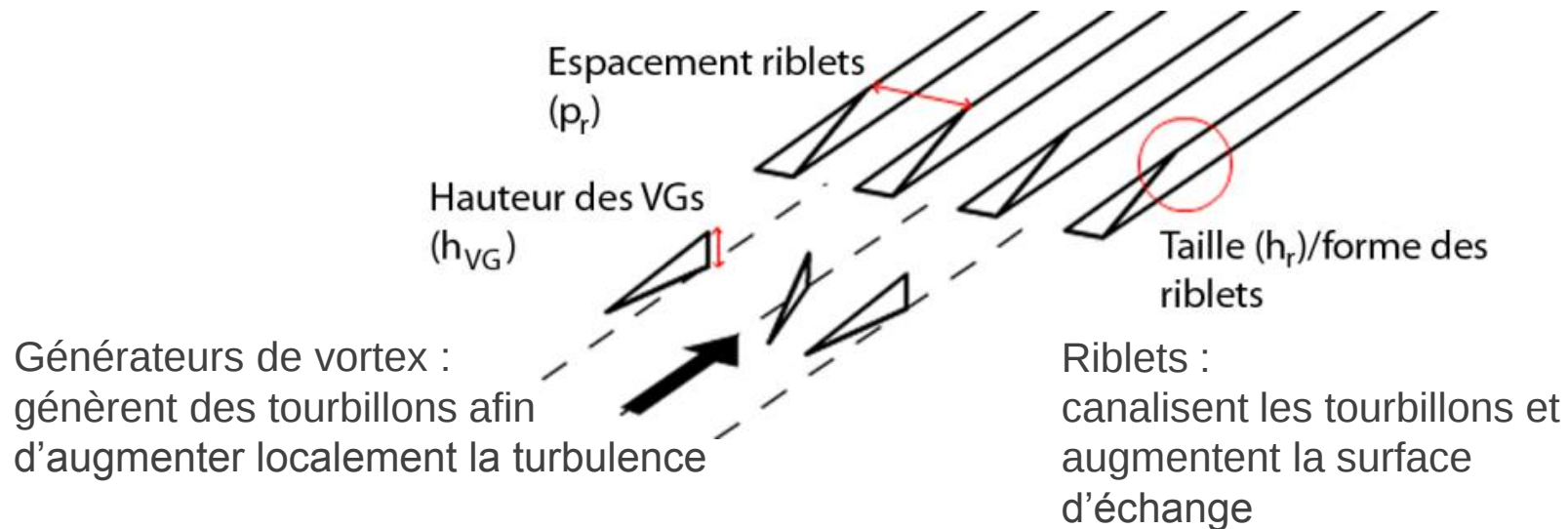
❑ Utilisation de nombreux moyens d'études complémentaires

❑ La céramique SiC Boostec a été sélectionnée :

- résistance à la rupture à haute température (1600 K)
- absorptivité élevée (0.85)
- conductivité élevée à haute température (40 W/m/K)
- matériau mécaniquement fragile

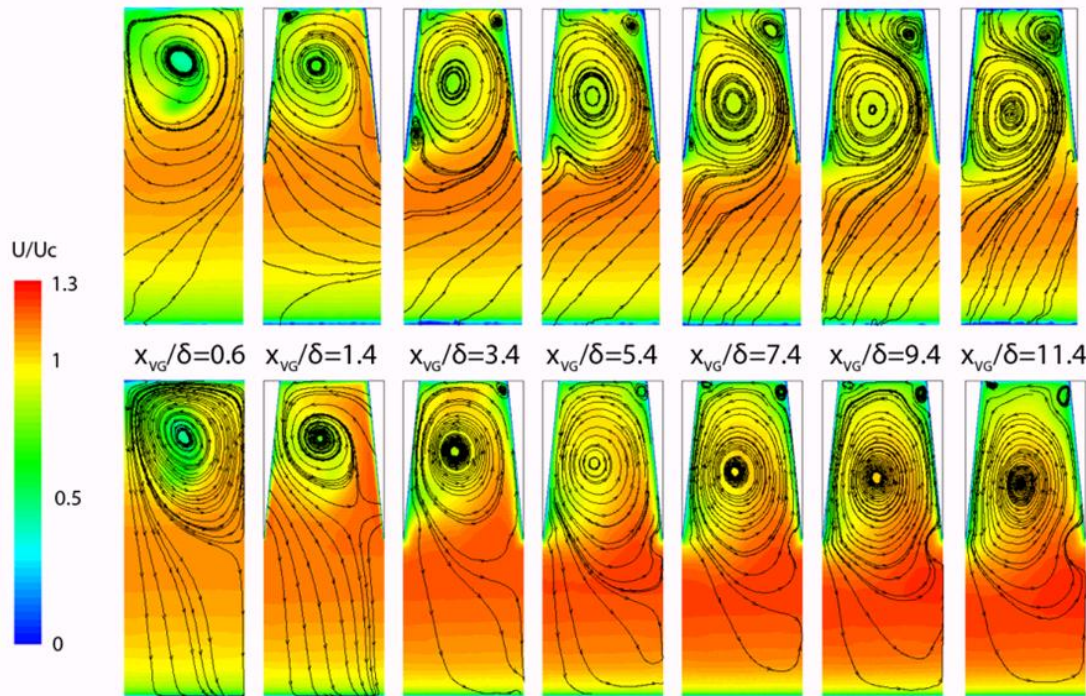
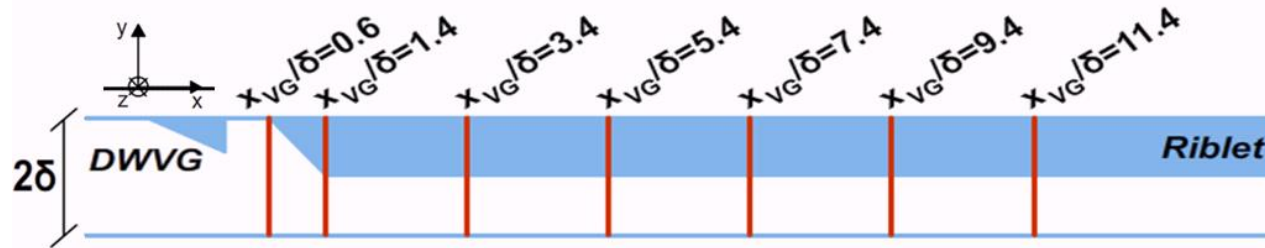
Echelle modulaire : géométrie innovante

- ❑ Maximiser les transferts thermiques en minimisant les pertes de charge
- ❑ Association de générateurs de tourbillons et de riblets



- ❑ Simulations RANS pour optimiser les paramètres
- ❑ Etudes fines de la géométrie optimisée à moyenne et haute température

Echelle modulaire : moyenne température



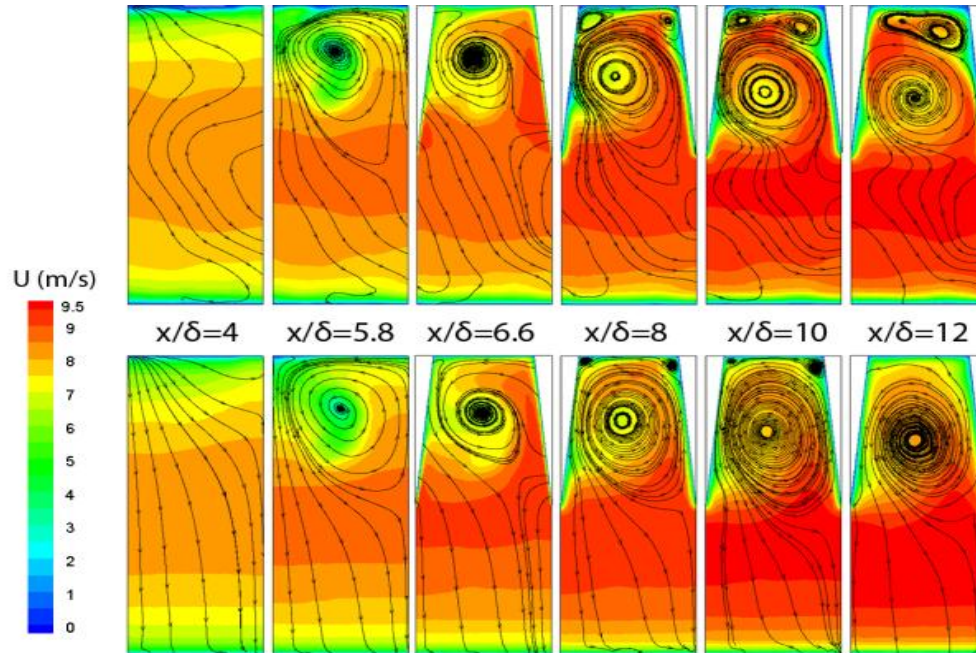
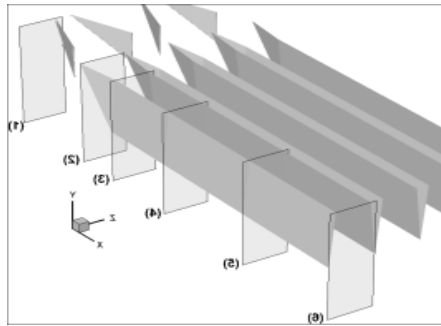
Résultats
expérimentaux
SPIV

Simulation
moyennée
RANS

La simulation moyennée

- sous-estime le tourbillon secondaire
- surestime les pertes de charge

Echelle modulaire : haute température



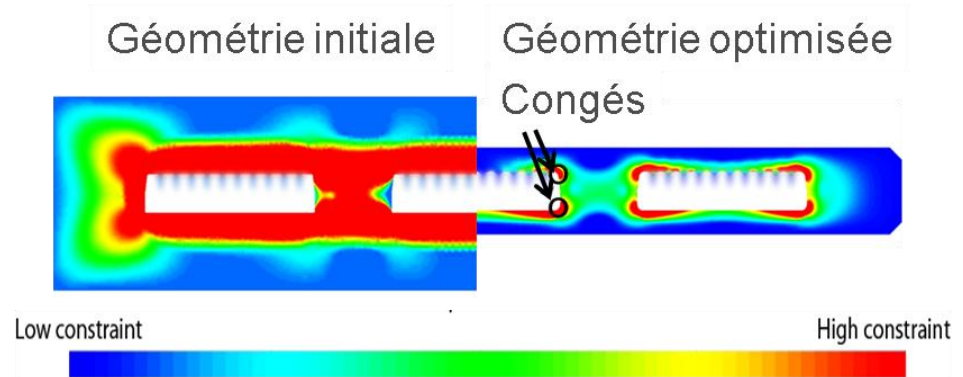
Simulation
fine
SGE

Simulation
moyennée
RANS

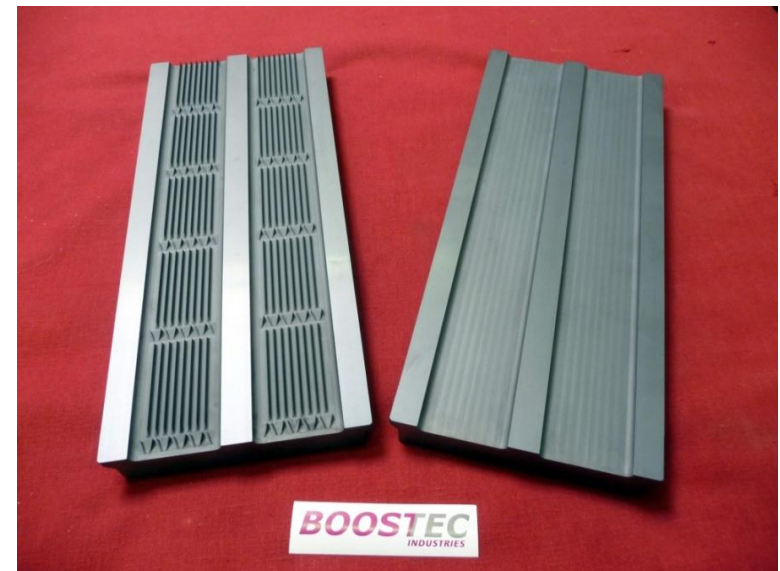
- ❑ Différences SGE/RANS similaires aux différences SPIV/RANS
- ❑ La simulation moyennée surestime les pertes de charge et les transferts thermiques
- ❑ Intérêts des études à l'échelle locale pour améliorer les modèles RANS
- ❑ Nécessité d'essais en conditions réelles

Echelle modulaire : essais solaires

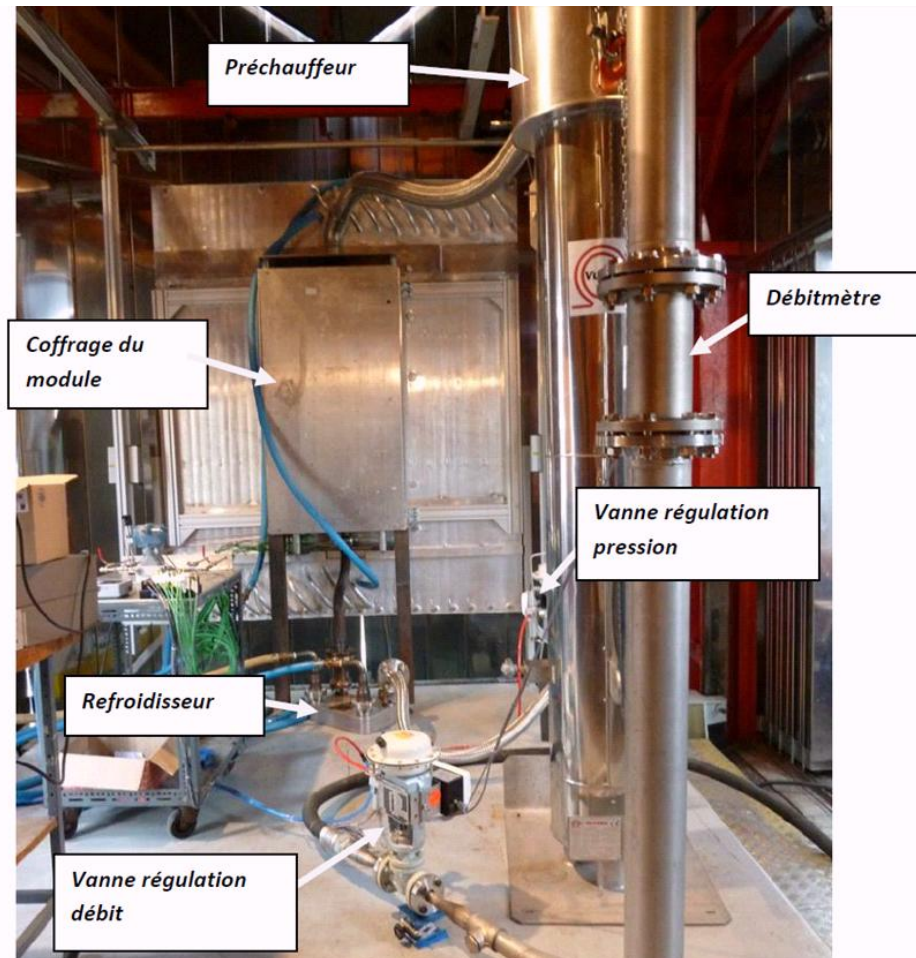
- ❑ Simulations de mécanique des fluides, thermique et thermomécanique pour la minimisation des contraintes



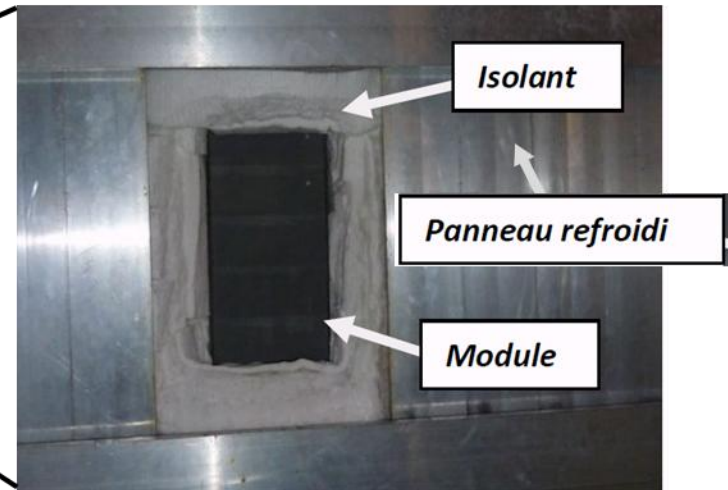
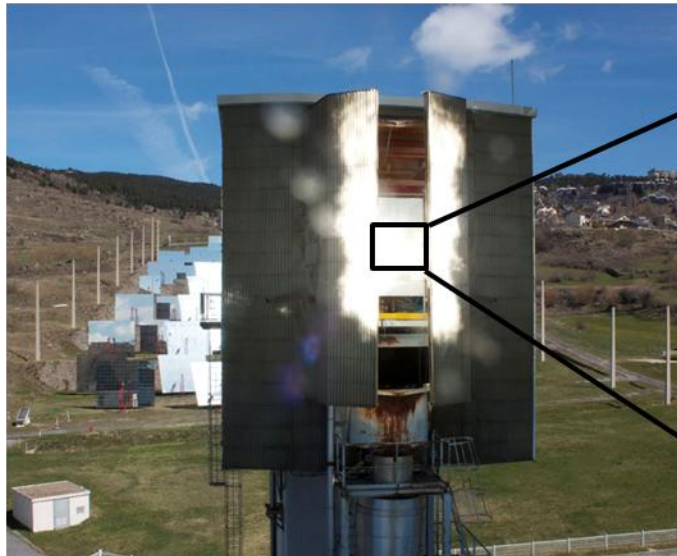
- ❑ Réalisation du module solaire avec 5 motifs



Echelle modulaire : essais solaires



Echelle modulaire : essais solaires



- ❑ Le module a résisté à de forts flux inhomogènes
- ❑ Une **forte puissance** a été **extraite** (230 kW/m^2) couplée à une température de la face avant de l'ordre de 1000° C

Echelle modulaire : conclusion

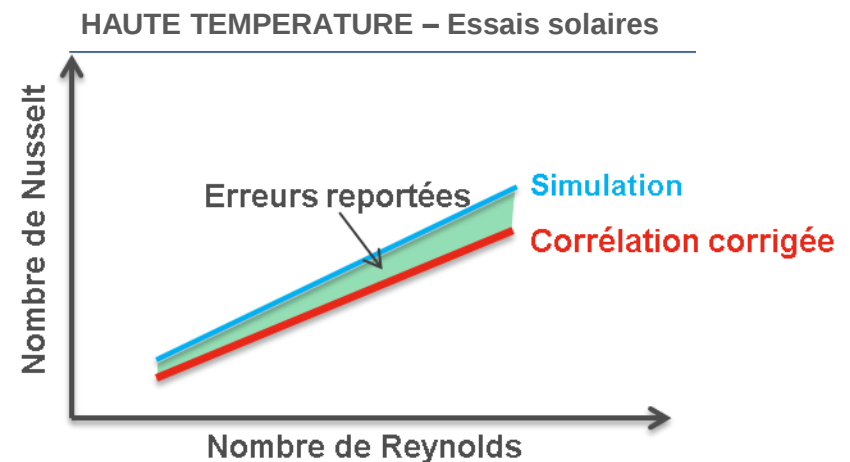
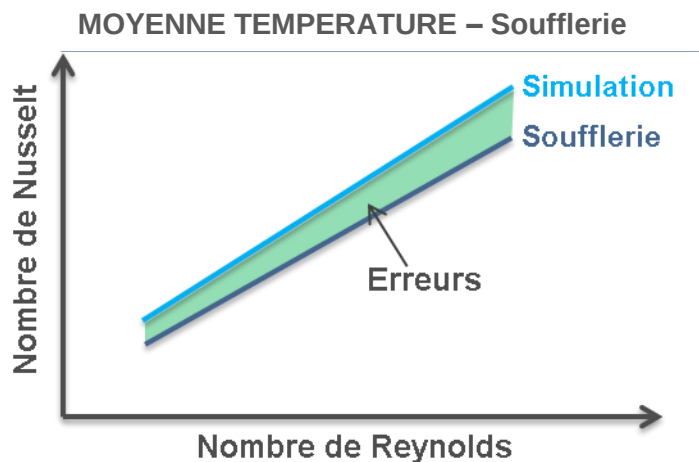
- ❑ Intensification des transferts de chaleur
 - Proposition d'une architecture innovante
 - Optimisation de la géométrie

- ❑ Caractérisation des performances à hautes températures
 - Expérimentalement et numériquement
 - Etudes à moyenne et haute température

- ❑ Réalisation d'essais solaires sous flux concentré
 - Conception du module pour résister aux contraintes thermomécaniques
 - Forte puissance extraite

Echelle industrielle

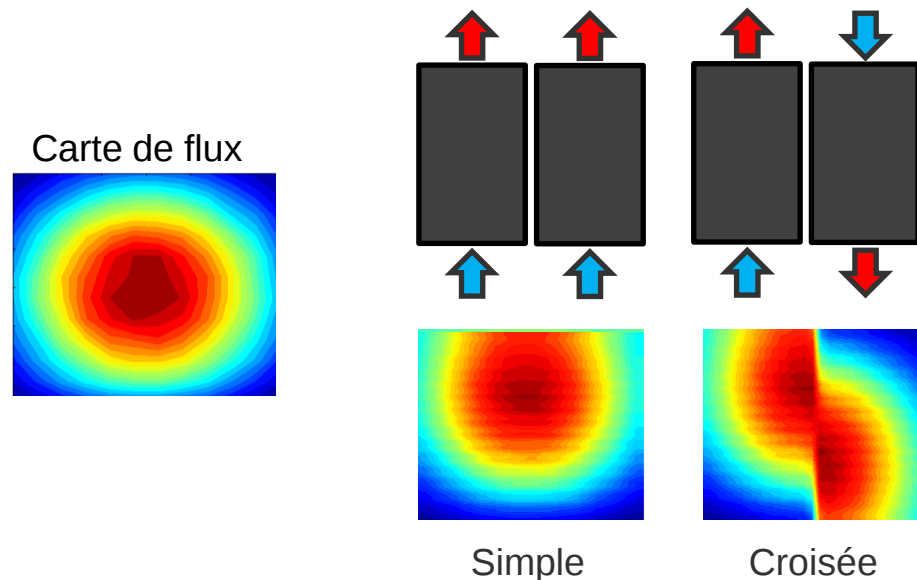
- ❑ Moyenne température
 - Calcul des corrélations à l'aide de simulations moyennées
 - Estimation des erreurs par comparaison avec les résultats expérimentaux
- ❑ Haute température
 - Report des erreurs sur les simulations moyennées
 - Vérification grâce aux essais solaires



Echelle industrielle

- ❑ Les différents moyens d'études sont nécessaires au développement de corrélations pour les coefficients d'échange locaux
- ❑ Implémentation d'un outil de dimensionnement utilisant ces corrélations

Température de l'absorbeur en fonction de deux stratégies d'alimentation





Conclusion générale

- ❑ Démarche multi-échelles pour l'étude des procédés solaires
- ❑ Mécanisme à petites échelles : couplage entre le gradient de température et la turbulence
- ❑ Prédiction des transferts de chaleur au sein des récepteurs solaires à haute température



Conclusion générale

□ Echelle locale

- Développements **d'outils numériques et expérimentaux complémentaires** et dédiés à l'étude du couplage entre thermique et dynamique
- Amélioration de la **compréhension des mécanismes** de couplage entre thermique et dynamique

Conclusion générale



❑ Echelle modulaire

- Conception d'une **géométrie innovante** pour l'intensification des transferts de chaleur
- Caractérisations expérimentales et numériques des performances à moyenne et haute température
- Réalisation d'**essais solaires sous flux concentré**
- Mise en évidence des **limites des simulations moyennées** ce qui souligne l'importance de l'amélioration des connaissances du couplage dynamique/thermique



Conclusion générale

□ Echelle industrielle

- Détermination de **corrélations** pour les coefficients d'échanges
- Développement d'un **outil de dimensionnement**

Perspectives



- ❑ Etude plus approfondie du **modèle à faible nombre de Mach**
 - Analyse théorique
 - Utilisation des résultats S-PIV
 - Réalisation de simulations avec des approches différentes (compressible par ex.)
 - Développement de modèle diphasique compressible
 - Potentiel des méthodes LBM

- ❑ Utilisation des résultats de référence SND et S-PIV pour développer des modèles à trois niveaux différents : **SGE, RANS et corrélations**
 - Mesure des corrélations vitesse-température
 - Mesure des corrélations vitesse-pression
 - Réalisation de tests *a priori* sur les modèles existants
 - Proposition de nouveaux modèles

Perspectives

❑ Compréhension du **couplage thermique/dynamique**

- Réaliser davantage de SND
- Continuer les études paramétriques (plus haut nombre de Reynolds, autres ratios de température)
- Réaliser des comparaisons expérimentales
- Enrichir la physique (géométrie complexe, CL instationnaires)
- Etudier les mécanismes locaux et instantanés

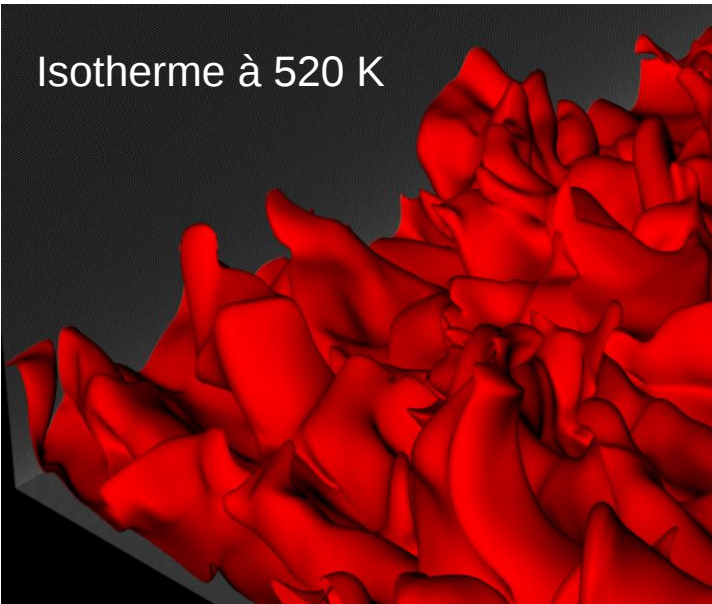
❑ **Optimisation de forme des récepteurs solaires**

- Intensification des transferts de chaleur
- Minimisation des pertes de charge
- Minimisation des contraintes thermomécaniques et de la fatigue thermique (couplage fluide/structure)

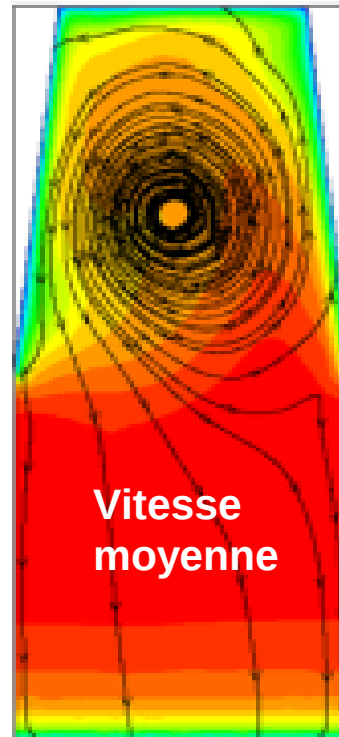
Merci pour votre attention

Amont

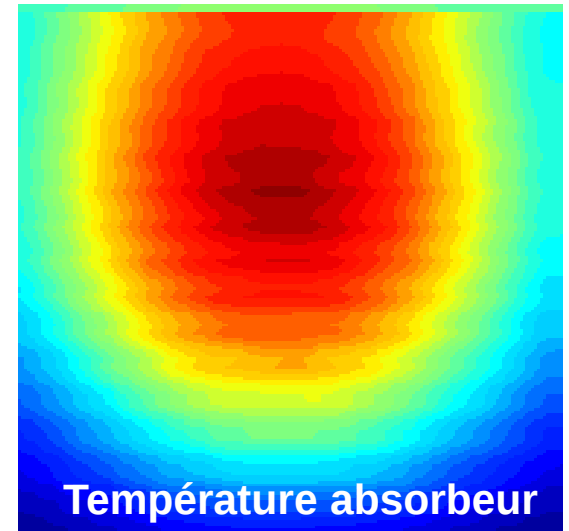
Application



Echelle locale



Echelle intermédiaire



Echelle industrielle