

Sûreté Innovation et Maîtrise de l'Energie dans les Procédés et Equipements Frigorifiques

ECOULEMENT DANS UN ECHANGEUR DE CHALEUR A SURFACE RACLEE

Nettoyage et production des crèmes glacées

Présenté par: Rachida BELHAMRI

Sous la direction de: Francine FAYOLLE

ENITIAA - GEPEA – UMR CNRS 6144 - Génie des Procédés- Environnement- Agroalimentaire
Rue des la Géraudière – BP 82225 – 44322 NANTES cedex 3 – France



Objectifs

Caractérisation de l'écoulement dans l'ECSR et validation expérimentale des simulations numériques réalisées.

Caractérisation expérimentale des écoulements turbulents en phase de nettoyage.

- **Etablir des profils de vitesse en écoulement monophasique par PIV.**
- **Etablir les conditions aux limites en entrée de l'ECSR (simuler le bol d'entrée).**

Caractérisation expérimentale de la cristallisation.

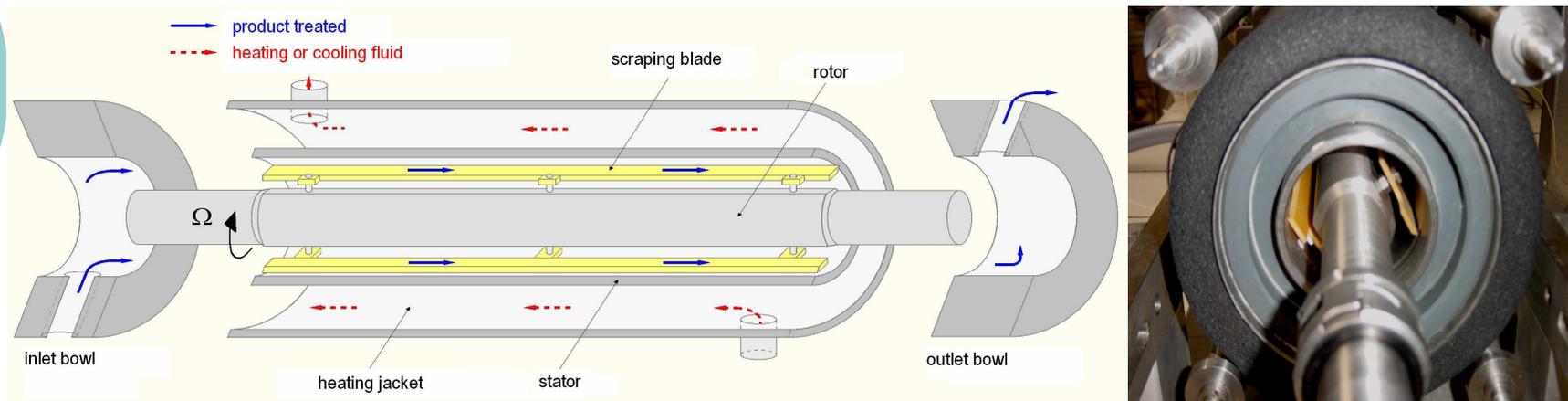
- **Mesure de la DTS pendant le refroidissement : (la cristallisation).**
- **Développer l'étude de la cristallisation en écoulement (avec cisaillement).**



Plan

- **Introduction.**
- **Caractérisation physico-chimique des solutions de sucre.**
- **Caractérisation de la distribution des temps de séjour (en cours).**
- **Caractérisation de l'écoulement en phase de nettoyage.**
- **Conclusion et perspectives.**

Echangeur de chaleur à surface raclée



- Traitement des fluides visqueux.
- Traitement thermique continu.
- Convection forcée + mélange : homogénéité des températures.
- La couche limite renouvelée : bon coefficient d'échange.
- Limitation du gratinage car la surface est raclée.

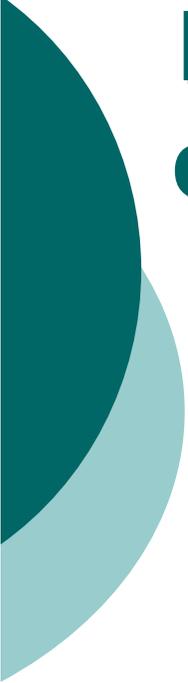


Caractérisation physico-chimique des solutions de sucre

- **Étude des propriétés physicochimiques des solutions modèles (sucre + eau)**
 - **Viscosité**
 - **Chaleur spécifique**
 - **Point de congélation**
 - **Fraction massique de glace**

Aspect de la cristallisation

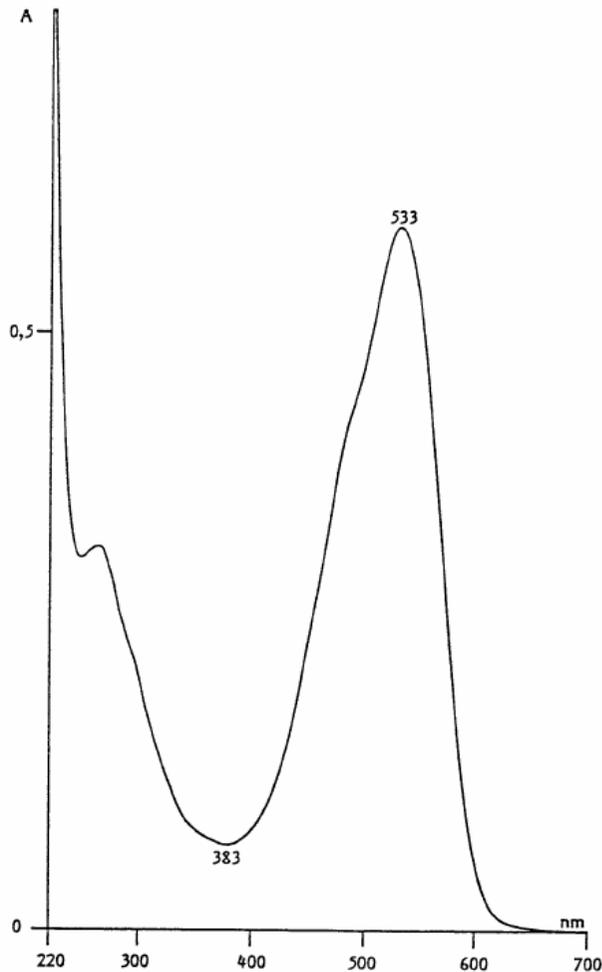
Bilans énergétiques



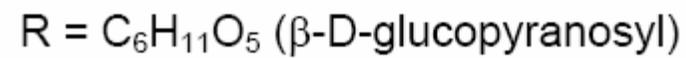
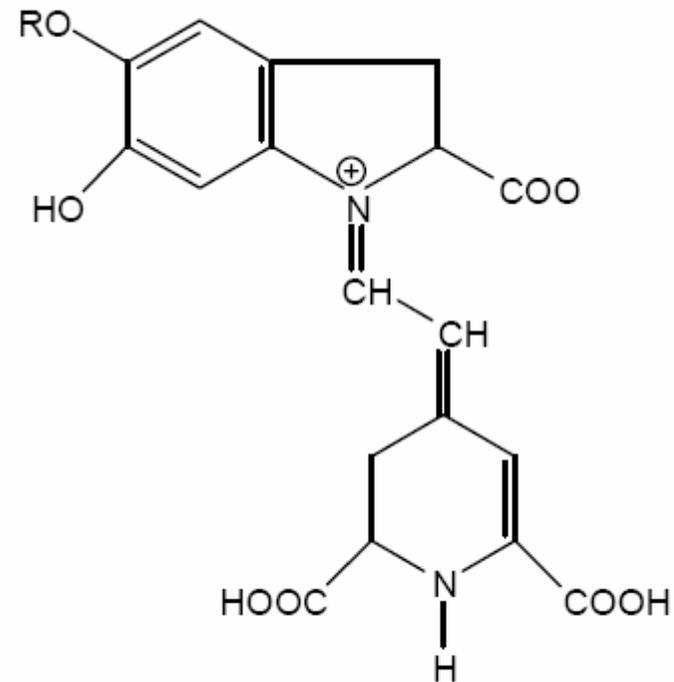
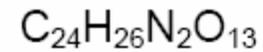
Etude de la distribution des temps de séjour pendant la cristallisation

- **Méthode du traceur coloré**
 - Absorbance en UV
 - Pas d'interaction avec le milieu
 - Pas de dégradation par cisaillement

Choix du traceur coloré: la bétanine



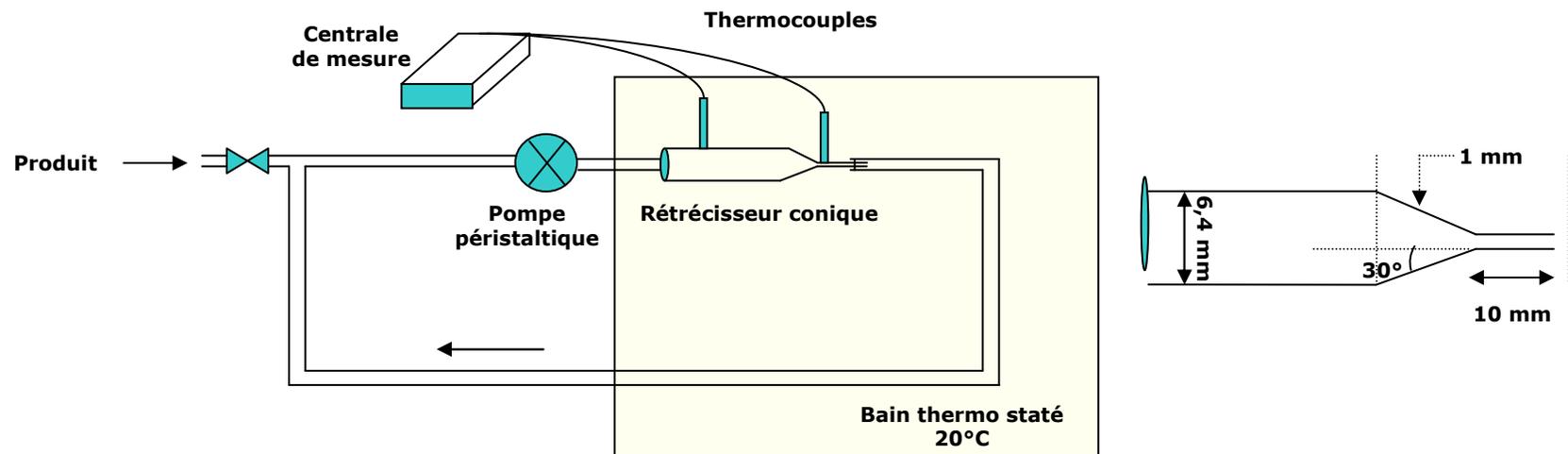
Spectre UV de bétanine



Bétanine rouge de betterave

Dégradation de la bétanine par l'effet du cisaillement

Technique: Rétrécisseur conique

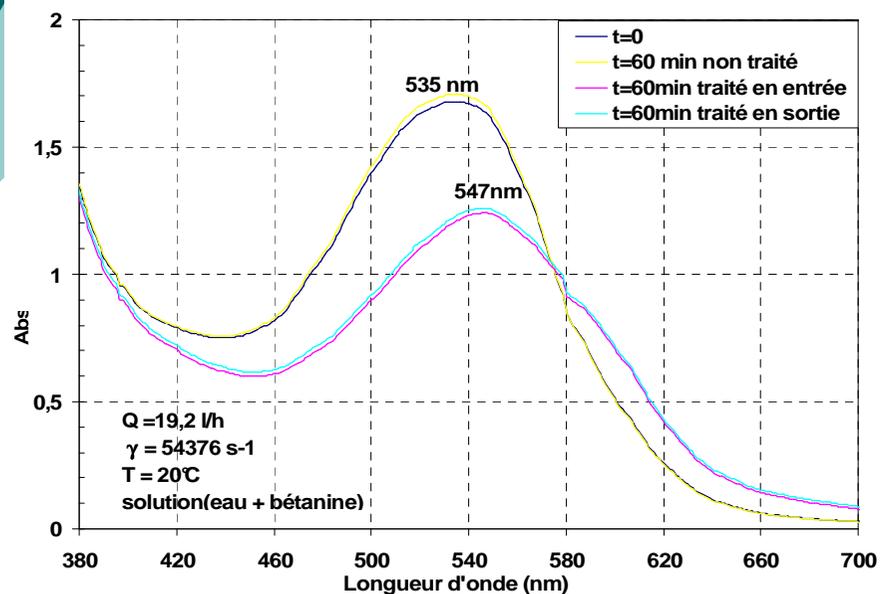


$$\dot{\gamma} = \frac{32 Q}{\pi d^3} \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)$$

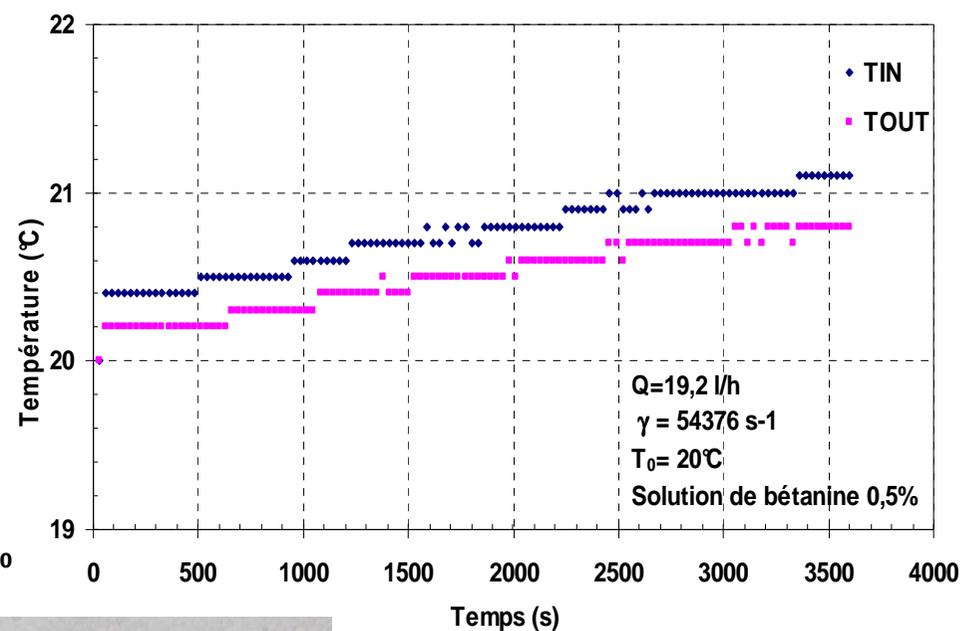
Relation de Rabinovitch

Résultats

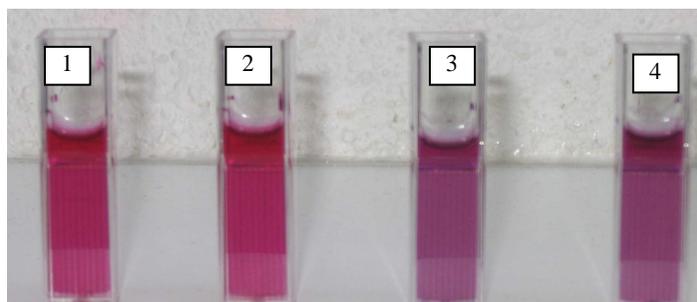
Dégradation de la bétanine par effet du cisaillement



Evolution de la température de la bétanine dans le rétrécisseur conique

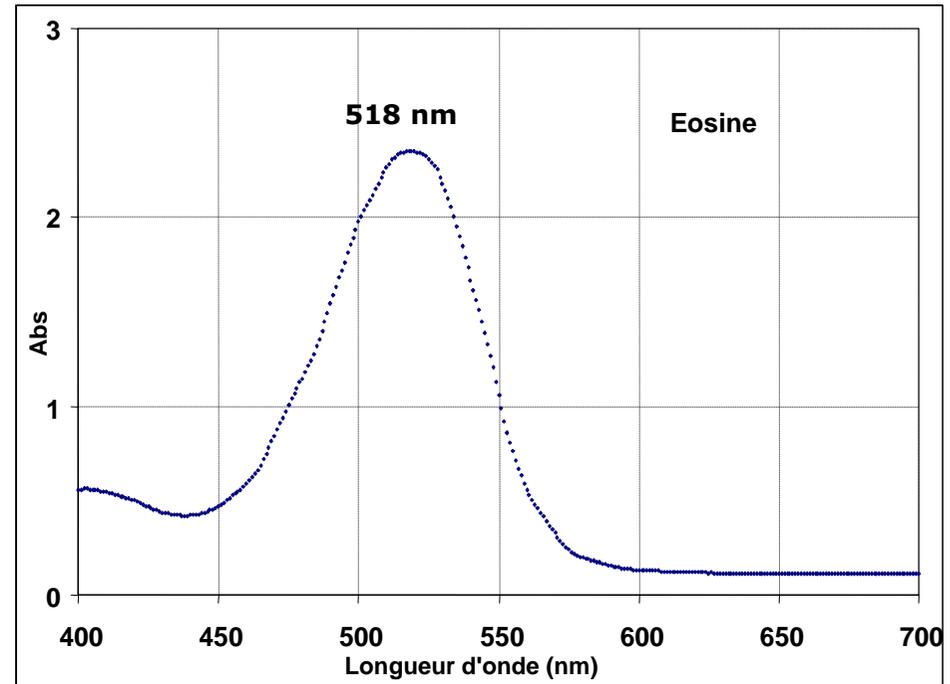
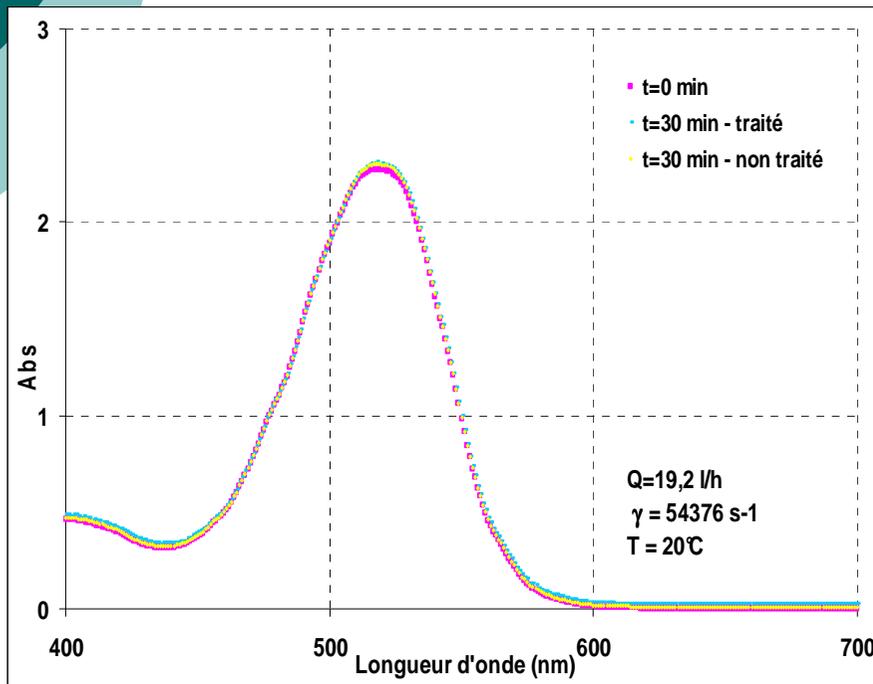


- 1 : $t=0\text{s}$.
- 2 : $t=60\text{min}$ sans traitement.
- 3 : $t=60 \text{ min}$ traité (entrée).
- 4 : $t=60 \text{ min}$ traité (sortie).



Choix du traceur coloré

Spectres UV de l'Eosine avec et sans cisaillement dans le rétrécisseur conique



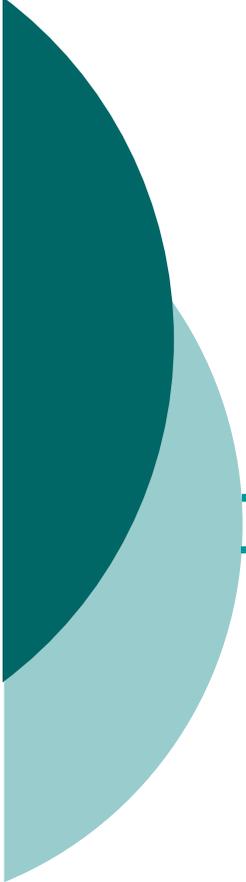
Choix de l'Éosine comme traceur coloré



Distribution des temps de séjour

- **Mise en route de l'appareillage**

- Bain de refroidissement
- Régulation des températures
- Lames (résistantes à la cristallisation)



Écoulement en phase de nettoyage de l'ECSR

Écoulement monophasique

Technique: Vélocimétrie par image de particules (PIV)

- Vitesse dans la surface latérale de l'ECSR
 - Entrée,
 - Centre,
 - Sortie.
- Vitesse dans les bols de l'ECSR

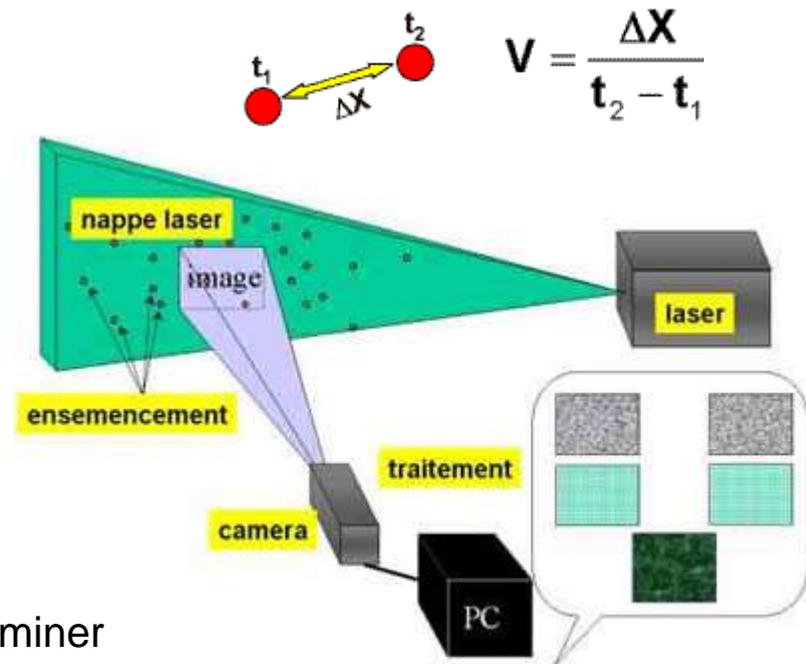
Etude de la vitesse par PIV

Principe de base

Écoulement monophasique

Mesure de la vitesse de particules entraînées par l'écoulement à partir de deux photos successives prises à un très court intervalle de temps.

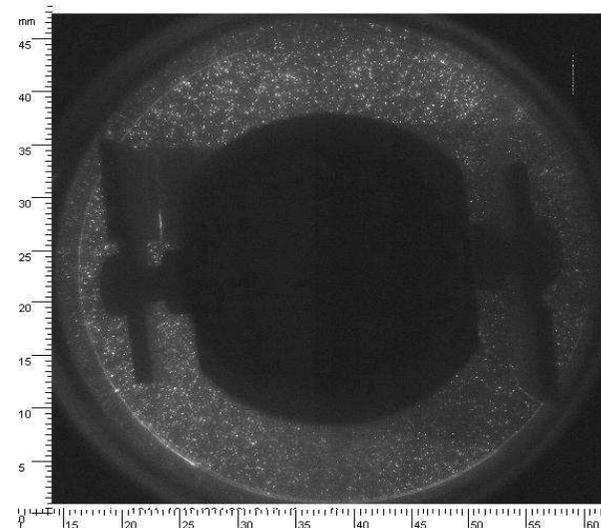
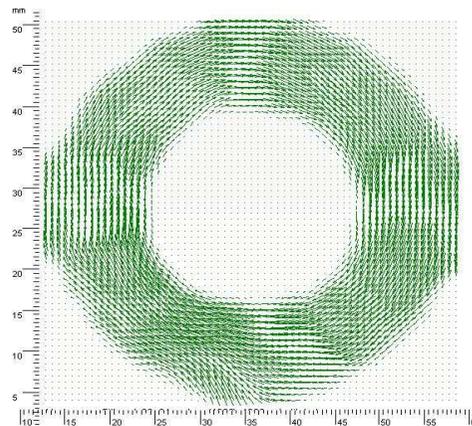
- ensemencement de l'écoulement par des particules submicroniques : **Polyamides 50 μ m**
- deux illuminations successives par deux flashes laser
- enregistrement sur caméra CCD des deux images
- traitement par techniques de corrélation pour déterminer les positions successives de la même particule.



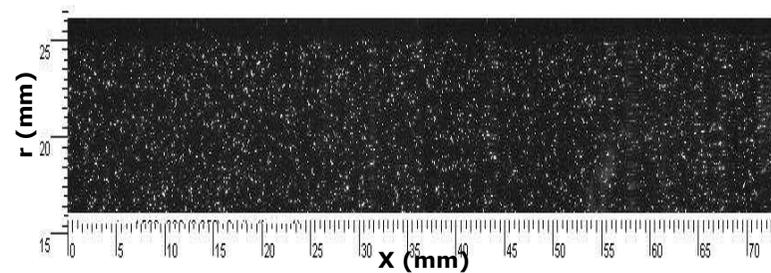
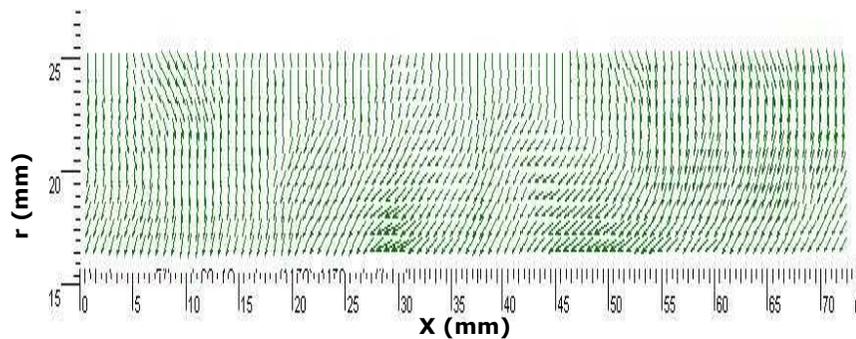
Visualisation de l'ensemencement et des champs de vitesse

Ensemencement : particules sphériques de Polyamides $d=50\mu\text{m}$.

Champs de vitesse après filtrage
Par la méthode des moyennes glissantes



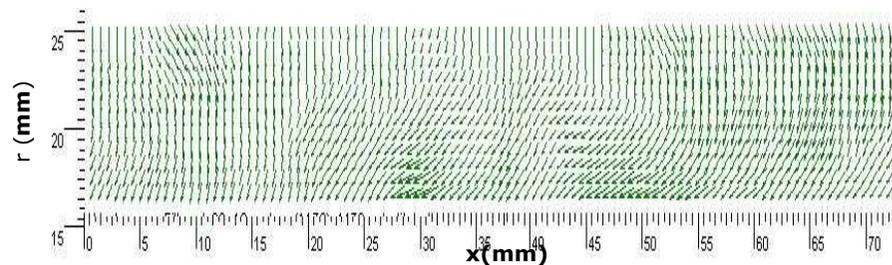
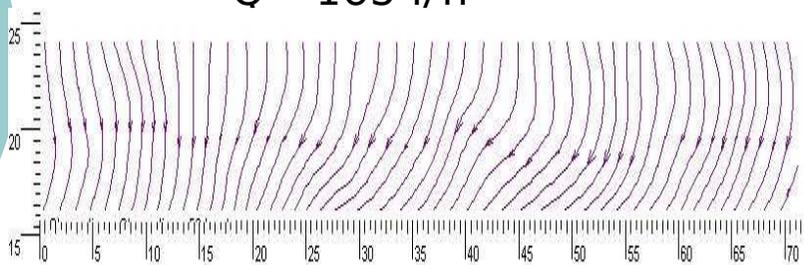
Circonférence
en entrée



Latérale
en entrée

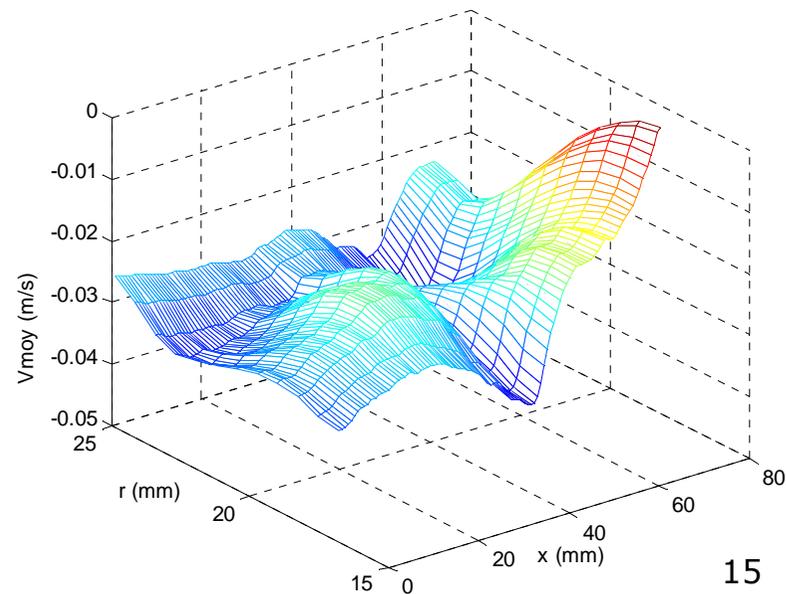
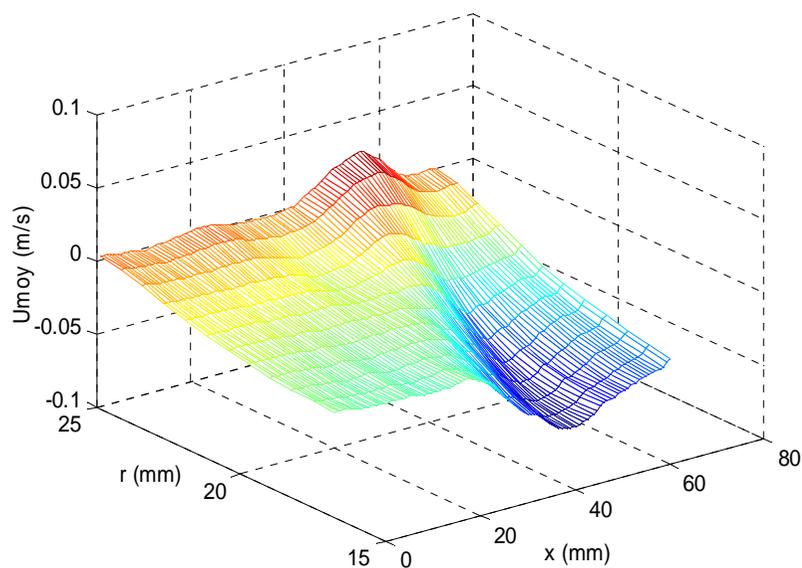
Profils des vitesses moyennes à l'entrée de l'ECSR

N=3 tr/s
Q = 165 l/h



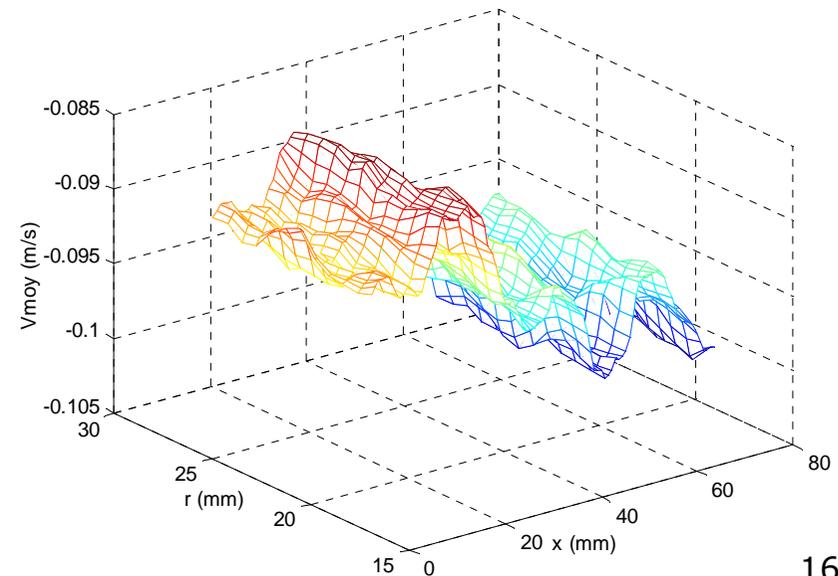
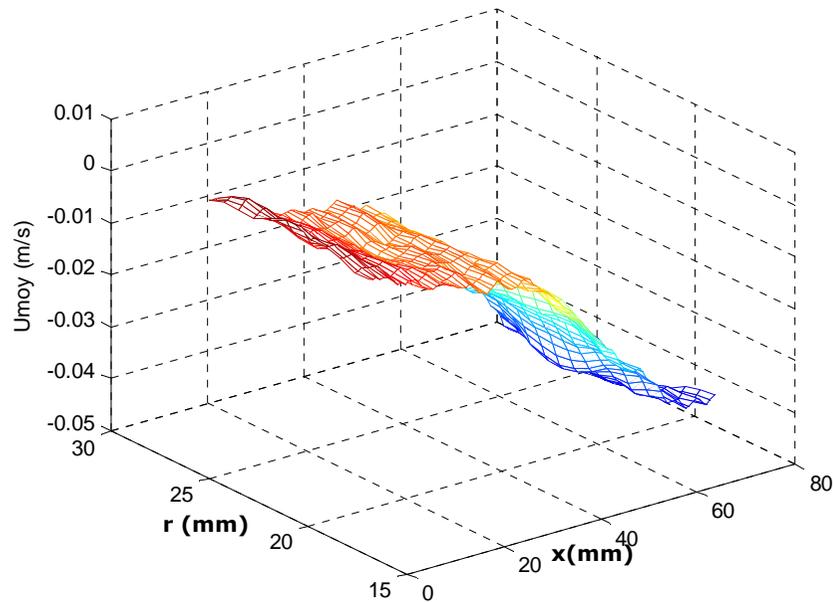
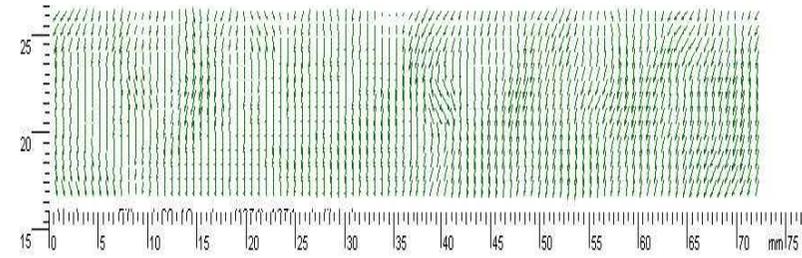
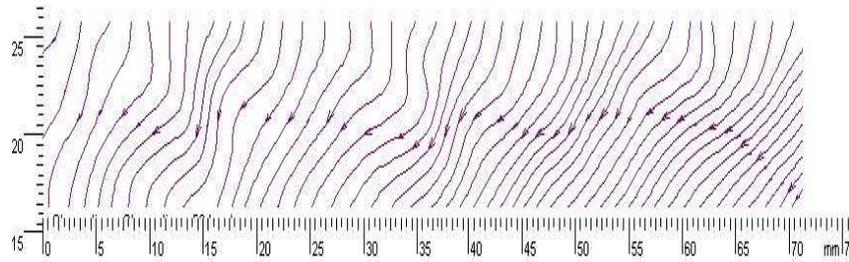
Composante axiale $U_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$

Composante radiale $V_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$



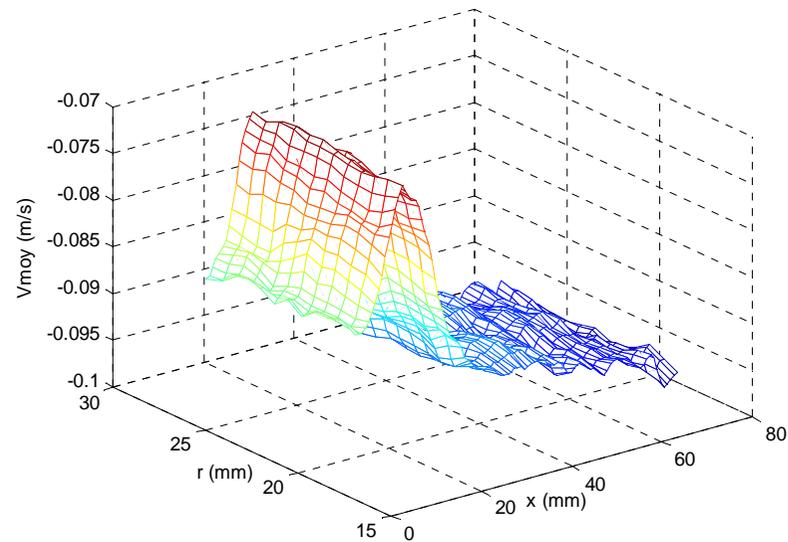
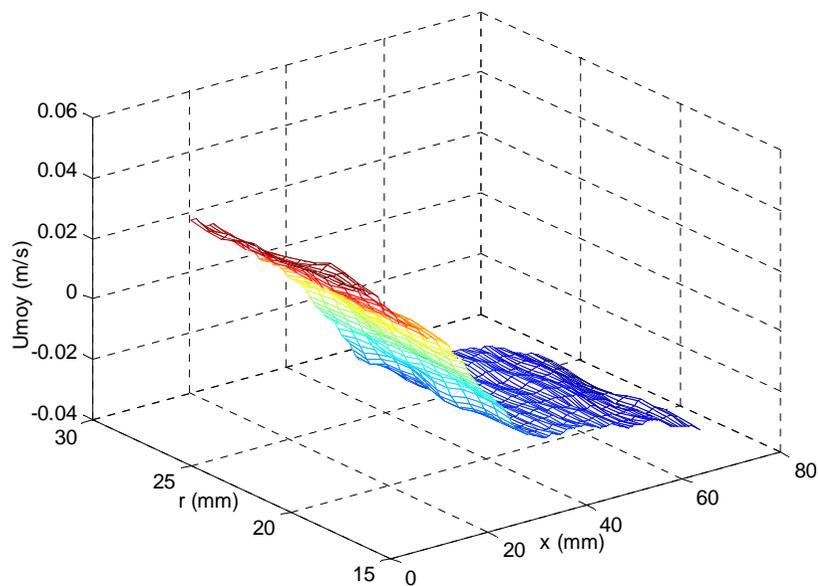
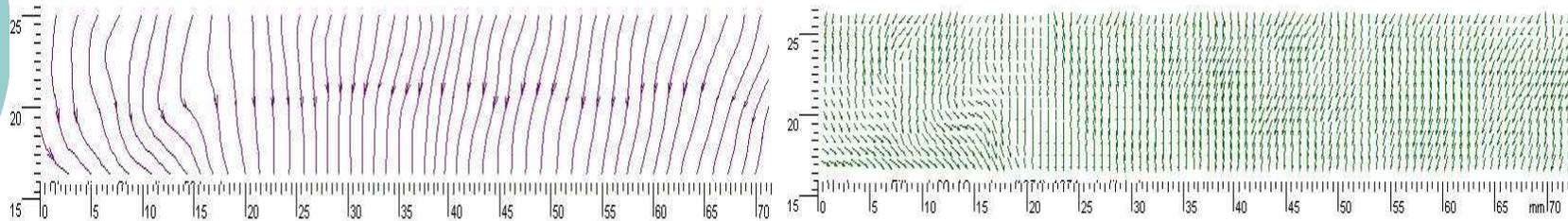
Profils des vitesses moyennes au centre de l'ECSR

$N=3$ tr/s
 $Q = 165$ l/h



Profils des vitesses moyennes à la sortie de l'ECSR

$N=3$ tr/s
 $Q = 165$ l/h

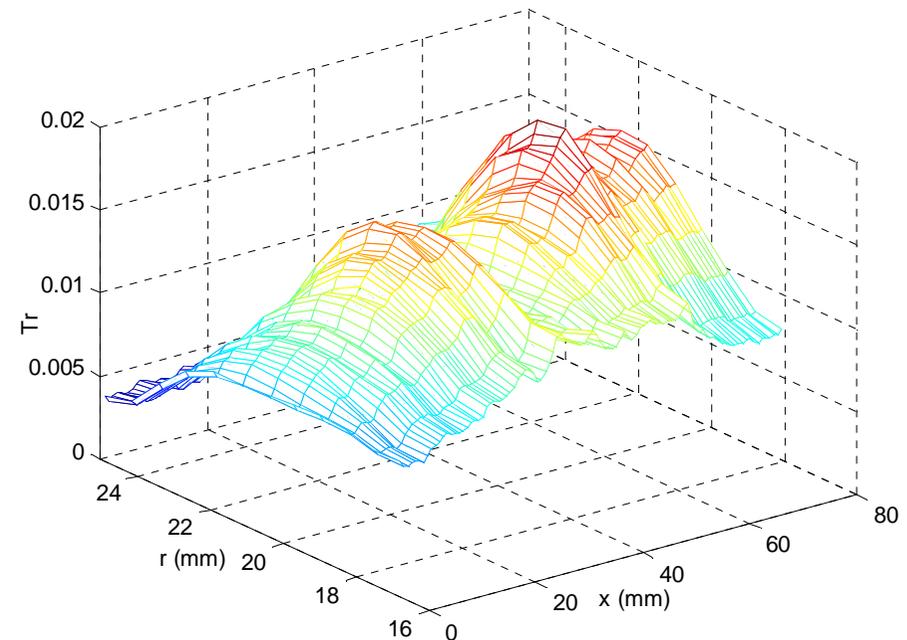
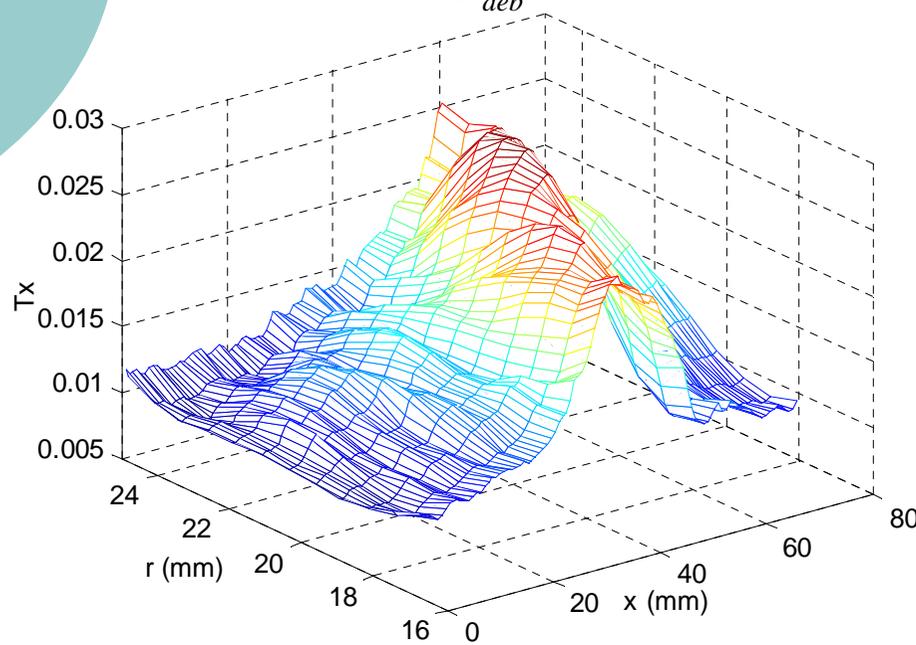


Intensités turbulentes à l'entrée de l'ECSR

$$T_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{moy})^2}}{U_{deb}}$$

N=3 tr/s
Q = 165 l/h

$$T_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{moy})^2}}{U_{deb}}$$



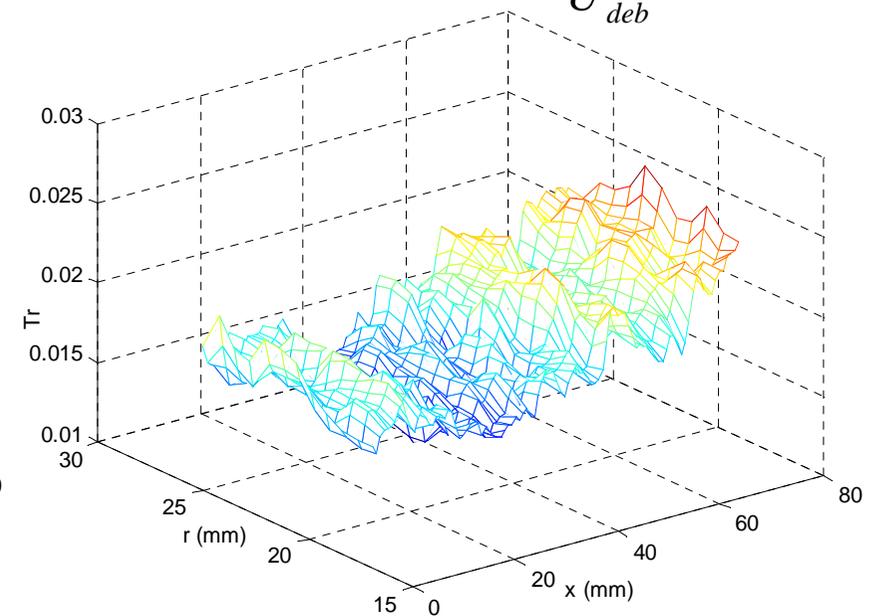
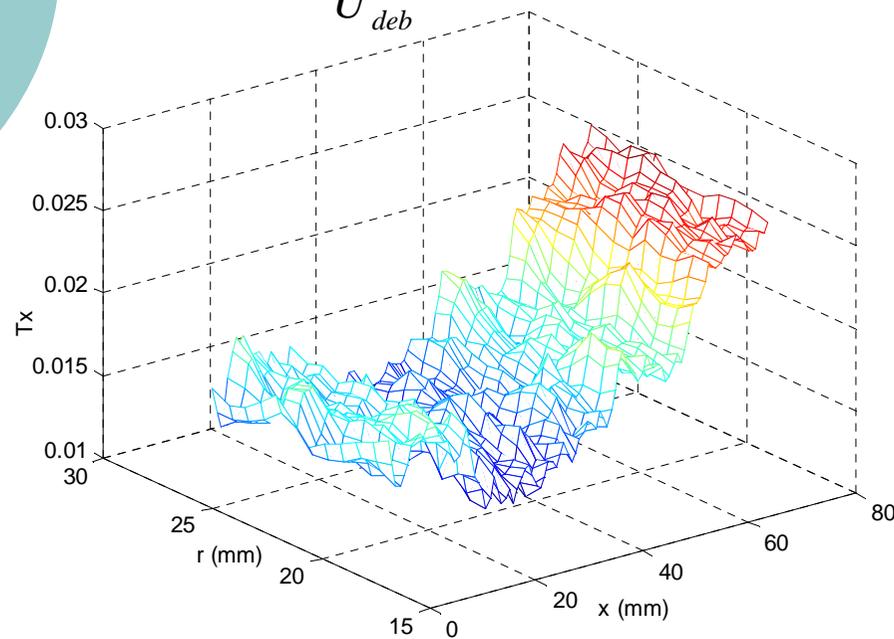
Intensités turbulentes augmentent
 $T_x > T_r$ à l'entrée de l'ECSR

Intensités turbulentes au centre de l'ECSR

$$T_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{moy})^2}}{U_{deb}}$$

N=3 tr/s
Q = 165 l/h

$$T_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{moy})^2}}{U_{deb}}$$



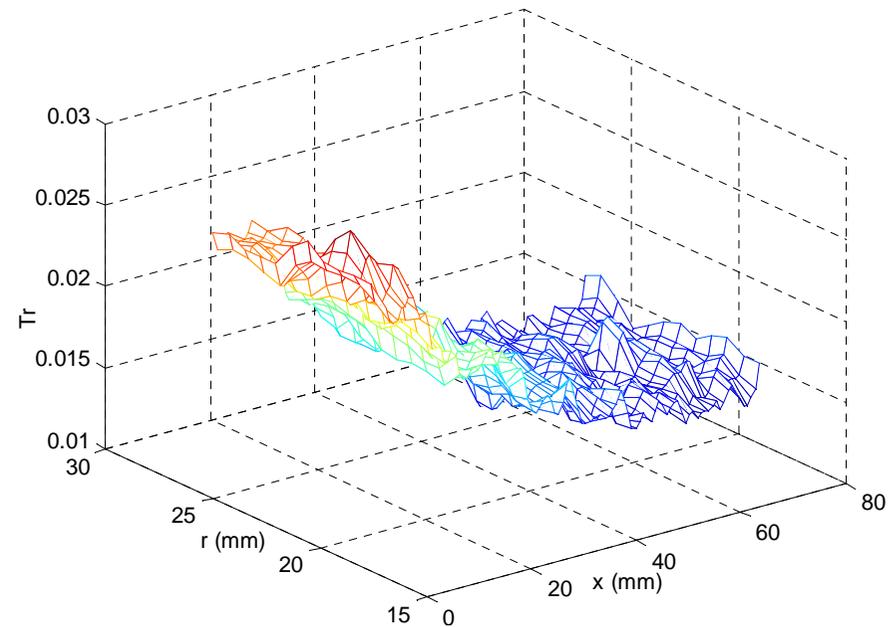
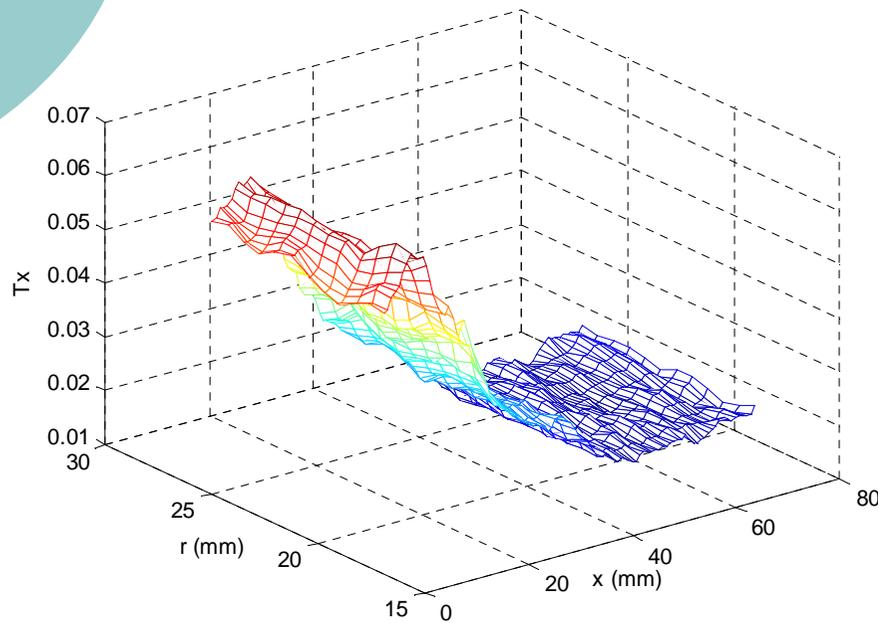
Intensités turbulentes axiales et radiales équivalentes
au centre de l'ECSR

Intensités turbulentes à la sortie de l'ECSR

$$T_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{moy})^2}}{U_{deb}}$$

N=3 tr/s
Q =165 l/h

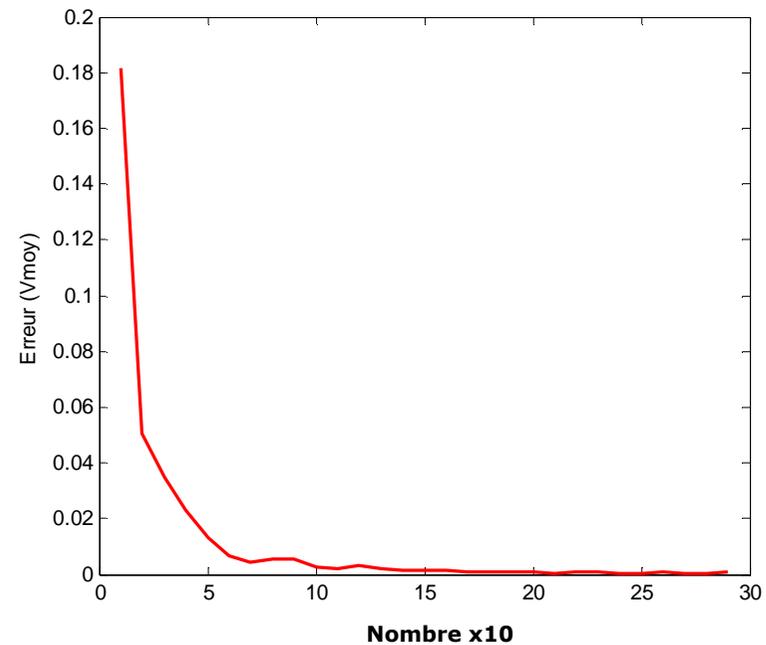
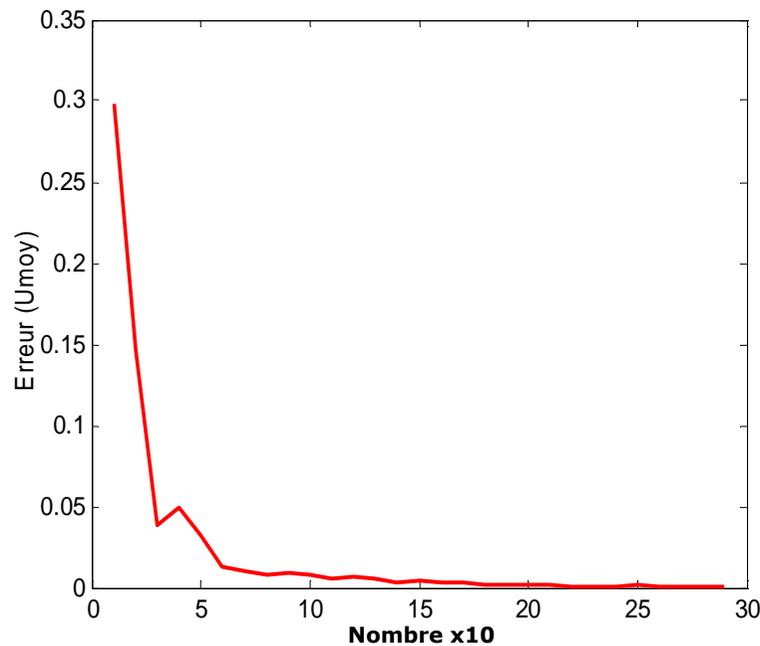
$$T_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{moy})^2}}{U_{deb}}$$



Intensités turbulentes s'atténuent
 $T_x > T_r$ à la sortie de l'ECSR

Nombre d'acquisitions nécessaires à la convergence

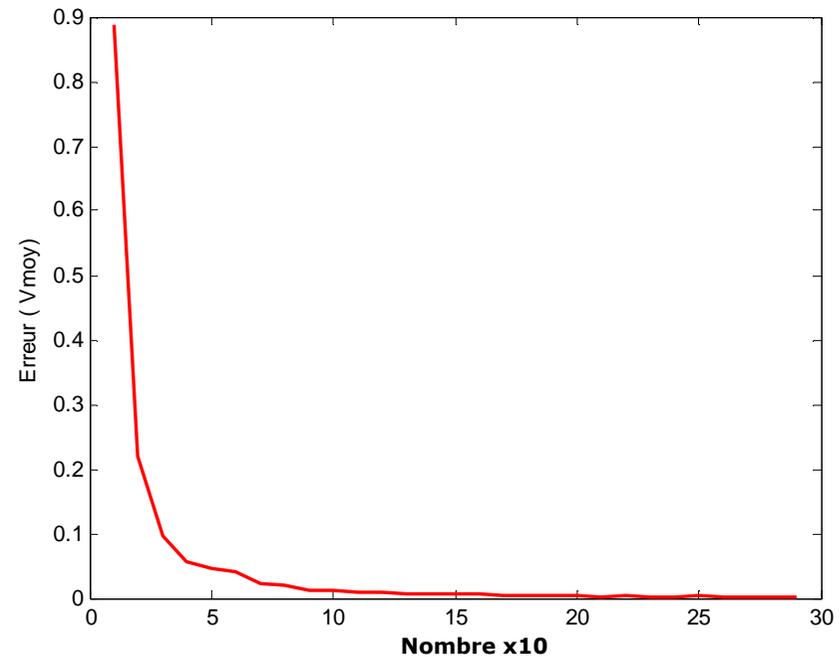
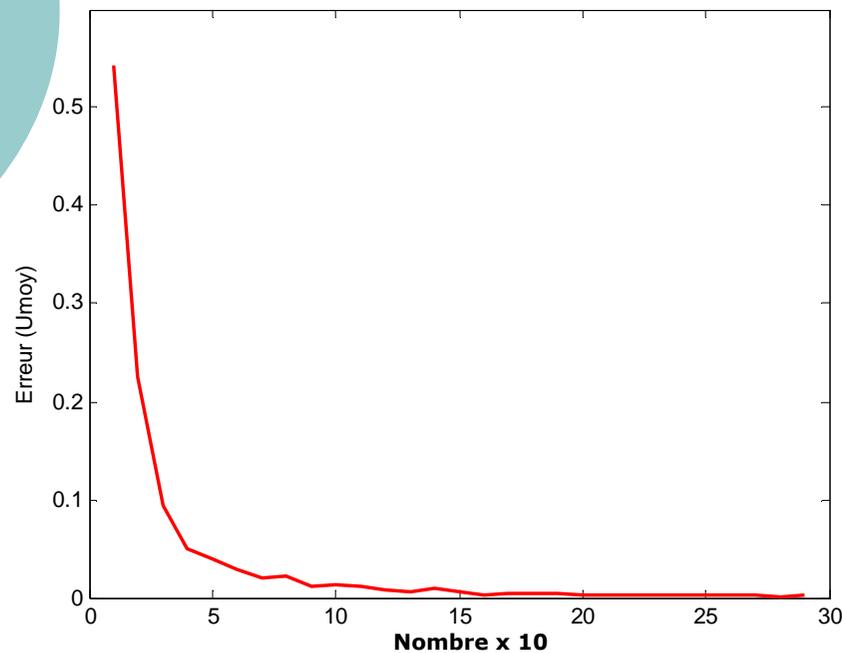
à l'entrée de l'ECSR



100 à 150 acquisitions PIV sont nécessaires pour assurer la convergence

Nombre d'acquisitions nécessaires à la convergence

au centre de l'ECSR



100 à 150 acquisitions PIV sont nécessaires pour assurer la convergence



Conclusion

Caractéristiques physicochimiques des solutions modèles (sucre + eau).

- Mécanismes de cristallisation de l'eau.
- Bilans énergétiques.

Etude de la DTS: choix du traceur coloré : Eosine.

- Pas d'interactions avec les solutions modèles.
- Pas de dégradations pendant l'application de forts taux de cisaillement (lames).

Etude de l'écoulement pendant le nettoyage des équipements par PIV.

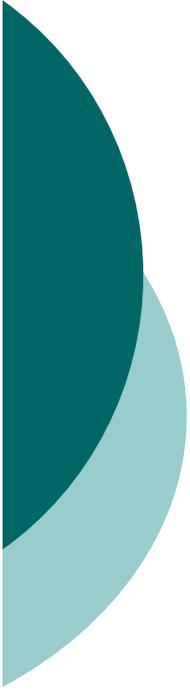
- Ecoulement turbulent le long de l'ECSR.
- Intensités turbulentes plus fortes au centre de l'ECSR.
- Phénomènes d'encrassements très faible au sein de l'échangeur.
- La turbulence s'atténue en sortie, risque d'encrassement dans les bols. 23



Perspectives

- **Interprétation des résultats de la PIV : Bol d'entrée, calcul de l'énergie turbulente...etc.**

- **Étude de la distribution des temps de séjour pendant la cristallisation (en cours).**



Merci pour votre attention