



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE
GROUPE THÉMATIQUE «ÉCHANGEURS
»



Simulation numérique de dépôt de particules dans un échangeur de chaleur par approche Euler-Lagrange

Kousseila ATSAID, Doctorant, IMT Nord Europe, CERI Energie Environnement

Directeur de thèse : Serge RUSSEIL

Encadrants : Souria HAMIDOUCHE et Rémi GAUTIER



- Présentation du contexte de l'étude
- Domaine d'étude et conditions aux limites
- Equations mathématique pour la phase porteuse
- Validation du modèle fluïdique
- Equations mathématique pour la phase dispersée (particules)
- Effet de différents paramètres sur le taux de dépôt de particules (EIM, d_p , Re , b , F_m)
- Effet de l'encrassement sur le transfert thermique



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



Figure 1.1 Echangeur de chaleur à plaques [2]

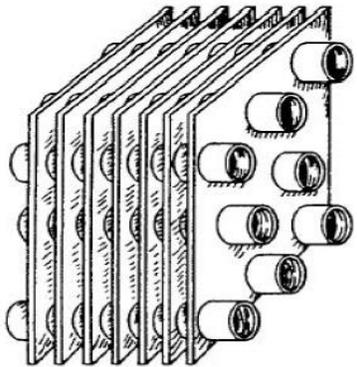


Figure 1.2 Echangeur à tubes et ailettes [3]

1 – Contexte de l'étude

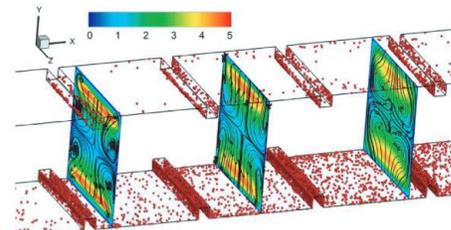
La formation et l'arrachement des particules a un effet majeur sur l'efficacité et la sûreté de multiples applications industriels

Fabrication micro-électronique (Cooper, 1986) [7]

Ventilation des bâtiment résidentiels (Peters et al., 2000) [8]

Sûreté des réacteurs refroidis au gaz (Lecrivain and Hampel, 2012) [9]

Récupération de la chaleur fatales des process industriel (Lu, et la., 2020) [10]



(d) $d_p=50\mu\text{m}$

Figure 1.3 : encrassement dans un échangeur [Lu et al., 21020]

1 – Contexte de l'étude

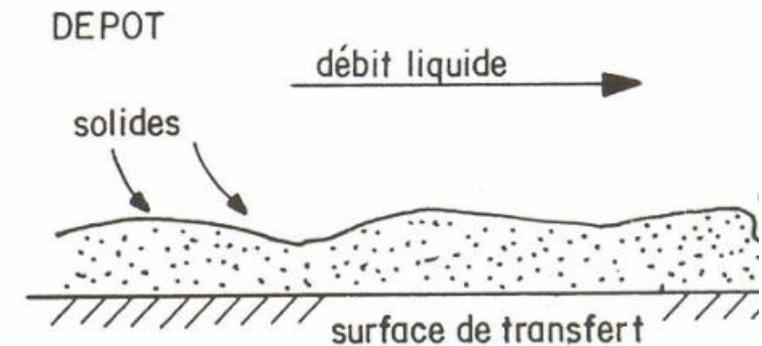
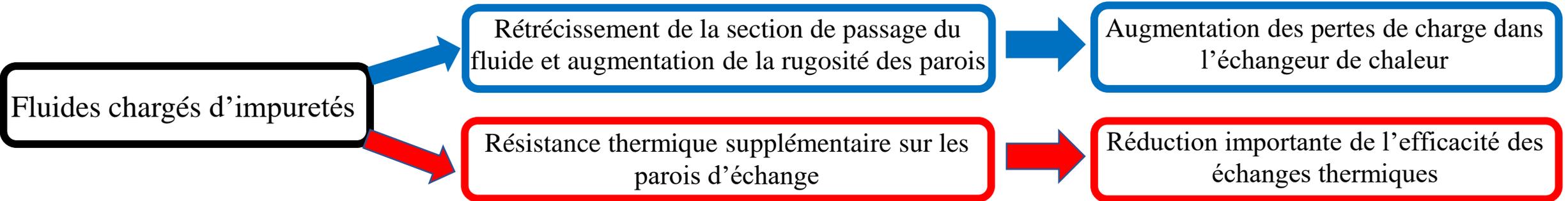


Figure 2: Encrassement des échangeurs de chaleur [4], [5]

2 - Présentation du domaine d'étude et conditions aux limites

- Echangeur de chaleur à tubes et ailettes : Quatre rangs de tubes elliptiques
- Rangement triangulaire des tubes
- Conditions similaires à Toubiana et al. [1]

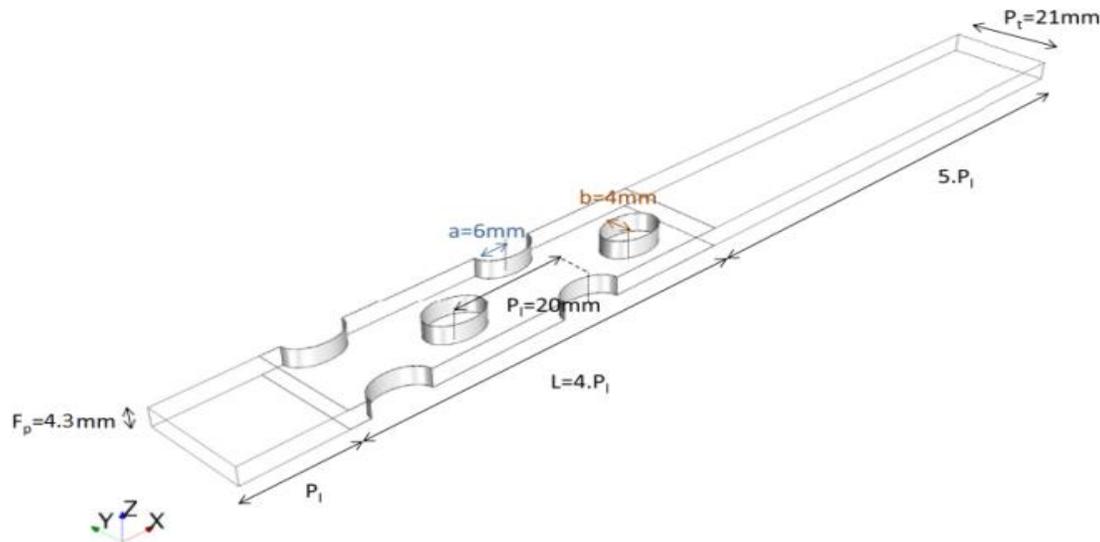


Figure 3: *Domaine d'étude [1].*

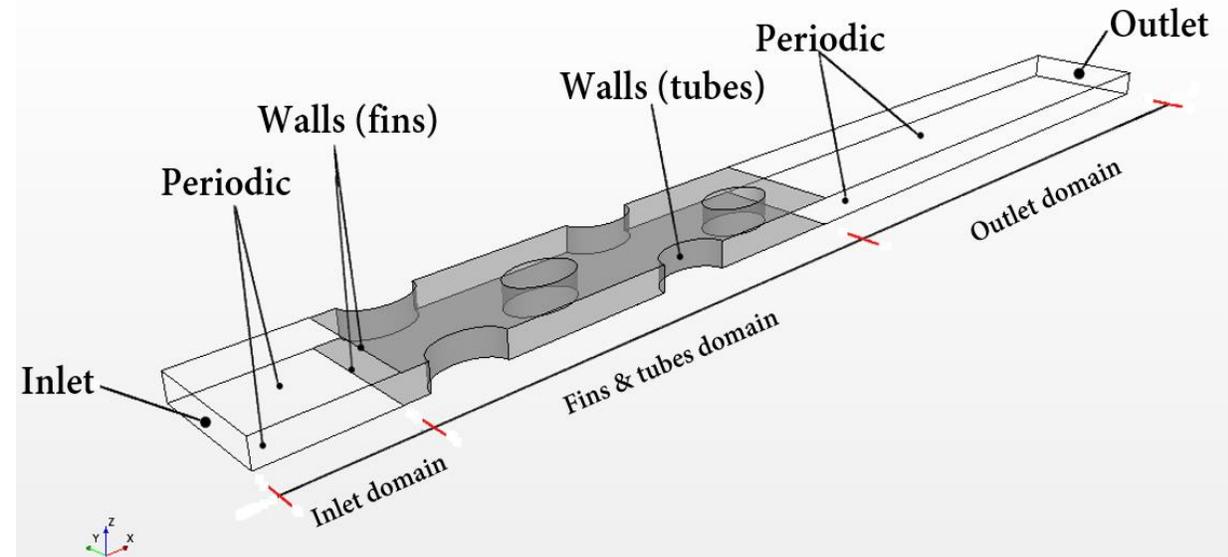


Figure 4: *Conditions aux limites.*

| U_{in} (m/s) | I_{in} | T_{in} (K) | T_p (K) | Pressure Outlet (Pa) |
|----------------|----------|--------------|-----------|----------------------|
| 1, 2, 3 et 5 | 0,1 | 300 | 340 | 101310 |



- Écoulement turbulent tridimensionnel avec transfert de chaleur.
- Équations de Navier-Stokes et de l'énergie moyennées par la décomposition de Reynolds.

- Équation de continuité:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

- Équation de quantité de mouvement:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

- Équation d'énergie:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_i^2} - \rho C_p \frac{\partial \overline{u'_i T'}}{\partial x_i} \quad (3)$$

- Équations de transport du modèle de turbulence k – ω SST:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \beta^* f_\beta \omega k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - \rho \beta f_\beta \omega^2 + D_\omega \quad (5)$$



4 – Etude de sensibilité au maillage :

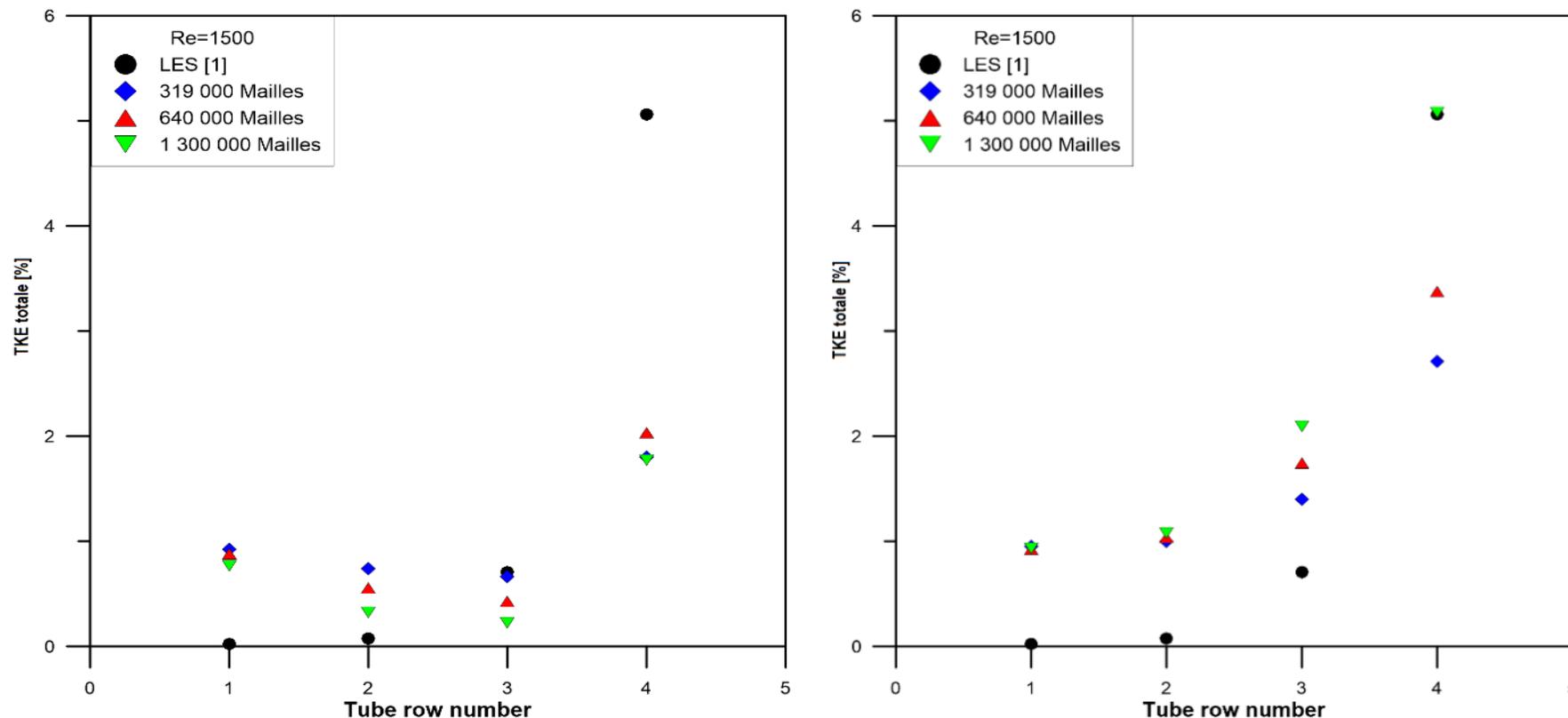


Figure 5: Influence du maillage sur les résultats de la TKE totale pour un $Re=1500$ (maillage polyédrique non-structuré à gauche et hexaédrique structuré à droite).

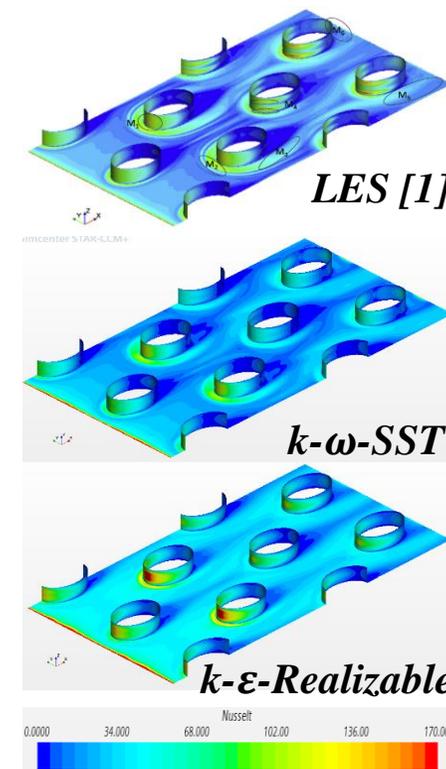


Figure 6 : Contours de nombre de Nusselt local obtenu pour $Re=2500$



5 – Equations de mouvement des particules



Le suivi des particules se fait avec une méthode lagrangienne (LPT), et cela par la résolution de l'équation fondamentale de la dynamique de chaque particule.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_B + \vec{F}_P + \vec{F}_{LS} + \vec{F}_d + \vec{F}_{TH} \quad (6)$$

| | |
|---|---|
| <p>Force de gravité :</p> $\vec{F}_g = m_p \vec{g} \quad (7)$ | <p>Force de gradient de pression :</p> $\vec{F}_P = -\vec{v}_p \frac{\partial P_{statique}}{\partial x_i} \quad (10)$ |
| <p>Force d'Archimède :</p> $\vec{F}_B = -\rho V_p \vec{g} \quad (8)$ | <p>Force de portance (Saffman) :</p> $\vec{F}_{LS} = C_l \frac{\rho \pi}{8} d_p^3 \left(\vec{v}_s \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (11)$ |
| <p>Force de traînée :</p> $\vec{F}_d = \frac{1}{2} \rho \vec{v}_s^2 \pi d_p^2 C_D \quad (9)$ | <p>Force thermophorétique :</p> $\vec{F}_{TH} = \frac{6\pi d_p \mu^2 (C_s \lambda + C_t K_n)}{\rho(1+3C_m K_n)(1+2\lambda+2C_t K_n)} \frac{1}{m_p T} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (12)$ |

- L'interaction : **Two way coupling** est utilisée dans cette étude

5 – Equations de mouvement des particules



Les particules qui rentrent en contact avec les parois se déposent uniquement si ces deux conditions sont satisfaites.

Vitesse critique de dépôt [11]

La vitesse critique de déposition est définie comme suite :

$$V_{cr} = \left[\frac{1,02 \left(\frac{5\pi^2 (k_s + k_p)}{4\rho_p^{1.5}} \right)^{0,4}}{d_p R^2} \right]^{10/7} \quad (13)$$

Avec :

$$k_s = \frac{1 - \vartheta_s^2}{\pi E_s} \quad \text{et} \quad k_p = \frac{1 - \vartheta_p^2}{\pi E_p} \quad (14)$$

Angle critique de dépôt

L'angle critique de déposition est donc défini comme suite :

$$\theta_{cr} = \arctan \frac{u_{it}}{u_{in}} \quad (15)$$

| ρ_p (kg/m ³) | E_s (GPa) | E_p (GPa) | ϑ_s | ϑ_p |
|-------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 3110 | 70 | 192 | 0,35 | 0,13 |

- Si $V_p < V_{cr}$ et $\theta_i < \theta_{cr} \implies$ **Dépôt**
Sinon **Rebond**

6 – Effet de la dispersion turbulente sur dépôt

- 2 205 000 particules de diamètre de 5 μm ont été injectées dans le domaine d'étude pour un Reynolds de 1500 ($\text{Re} = U_{in} * 2b/v$)

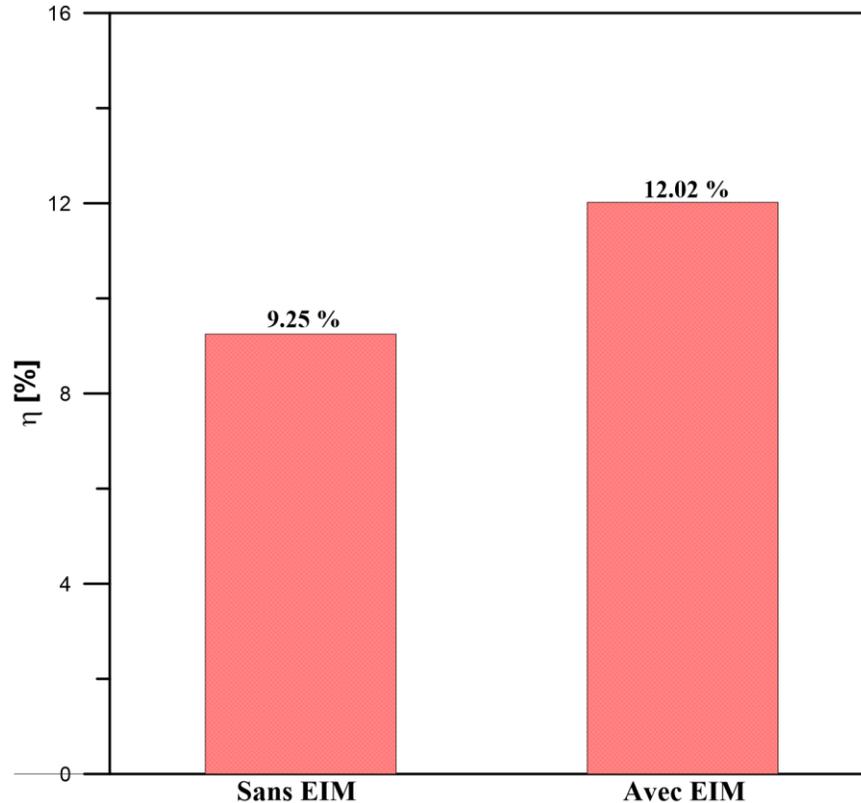


Figure (7): Taux de dépôt de particules avec et sans la dispersion turbulente.

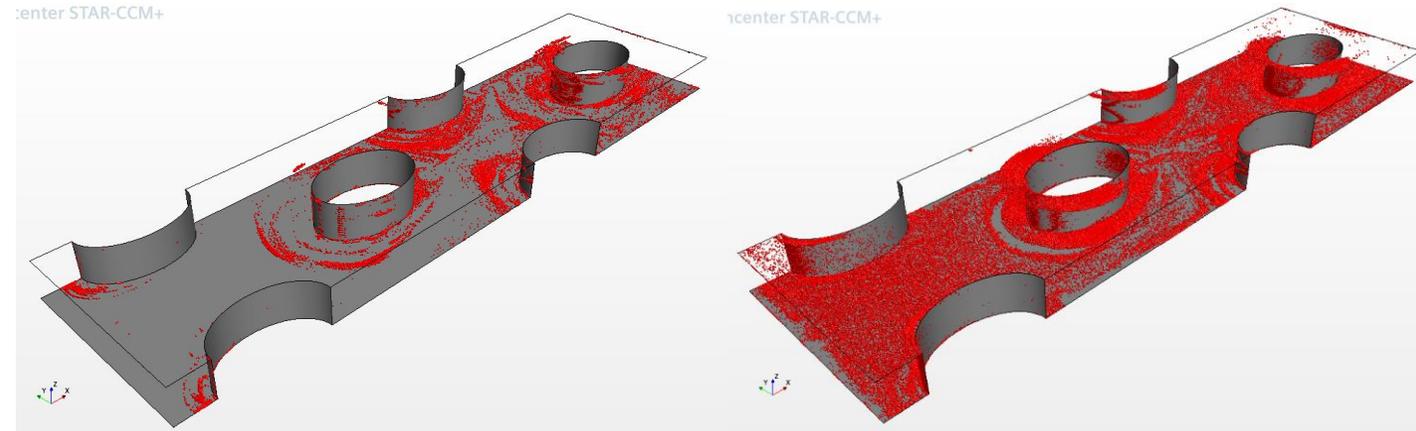


Figure 8 : Distribution des particules déposées (sans EIM à gauche, avec EIM à droite). Mise évidence en rouge les particules déposées.

7 – Effet du diamètre des particules sur le dépôt

- Le nombre total de particules injectées est de 2 205 000 sur une durée de 0.5 s. Pour $Re=1500$.

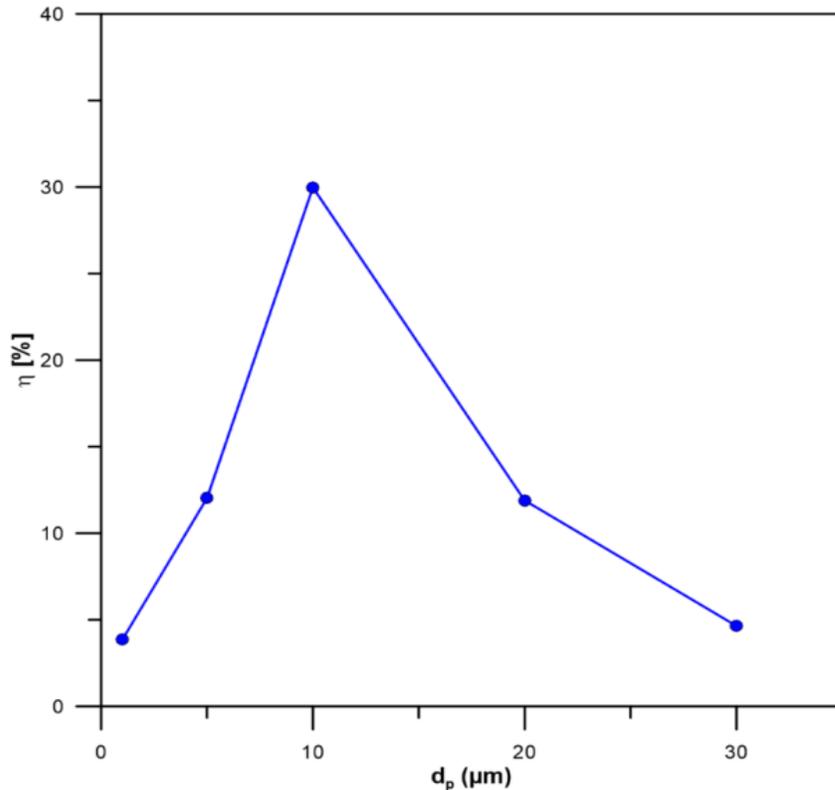


Figure 9: Evolution du taux de dépôt en fonction du diamètre des particules injectées

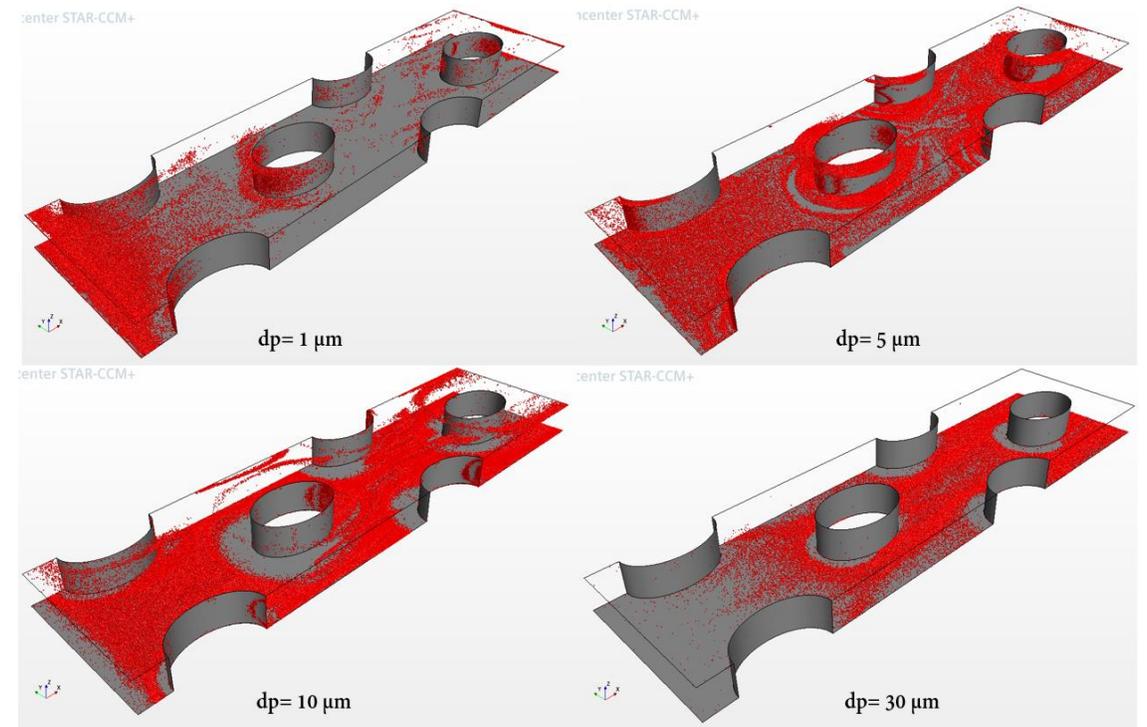


Figure 10 : Distribution de dépôt pour différents diamètres de particules injectées ($Re=1500$).



8 – Effet du nombre de Reynolds sur le dépôt

- Le nombre total de particules injectées est de 2 205 000 sur une durée de 0.5 s. Pour $Re=500; 1500; 2500; 3500; 4500$
- $d_p = 5 \mu m$

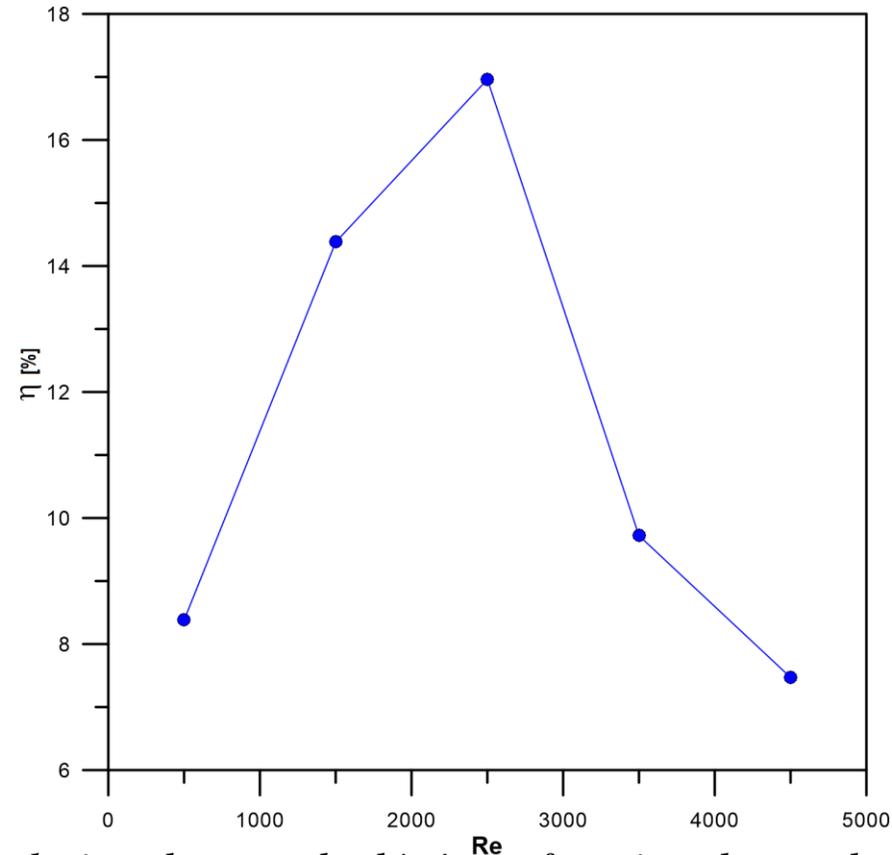


Figure 11 : Evolution du taux de dépôt en fonction du nombre de Reynolds



9 – Effet de l'ellipticité des tubes et de l'espacement inter-ailettes sur le dépôt

- Le nombre total de particules injectées est de 2 205 000 sur une durée de 0.5 s. Pour $U_{in} = 3$ m/s

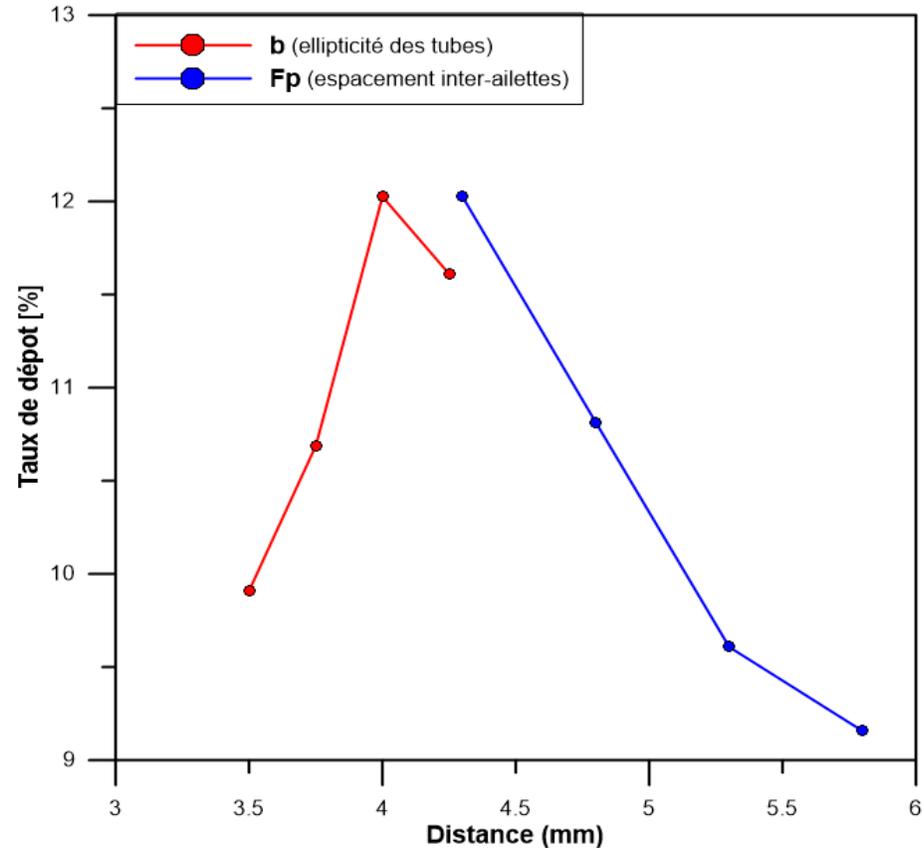


Figure 12 : Effet de l'espacement entre ailettes et de l'ellipticité des tubes sur le taux de dépôt des particules

10 – Effet du dépôt des particules sur le transfert thermique

- Estimer l'épaisseur du dépôt équivalent sur chaque maille:

$$\phi_{p,d} = \frac{V_{p,d}}{V_m} \Rightarrow V_{p,d} = \phi_{p,d} \times V_m \Rightarrow e_d = \frac{V_{p,d}}{S_m} \quad (16)$$

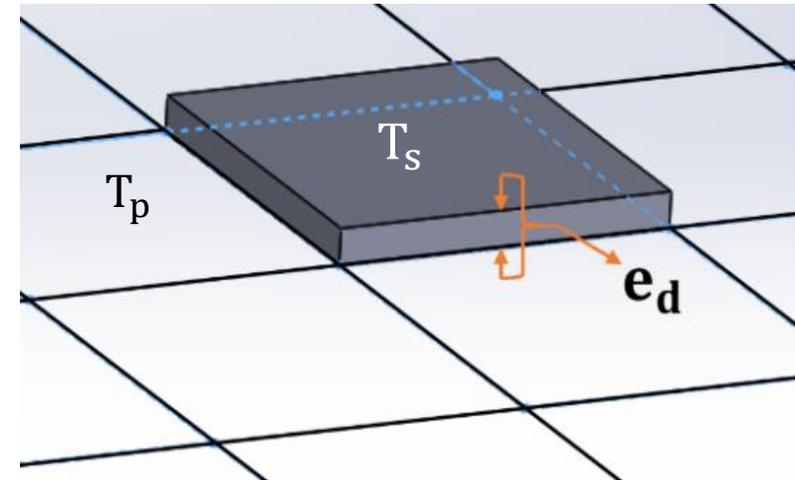
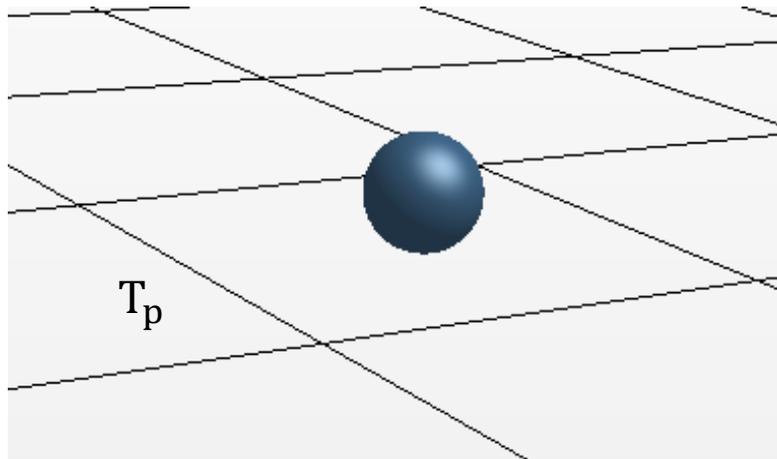


Figure 13: Dépôt de la particule sur une maille (gauche), épaisseur de dépôt équivalent (droite).

- Résoudre l'équation de conduction 1D:

$$q'' = -\lambda_p \frac{dT}{dx} \approx -\lambda_p \frac{T_s - T_p}{e_d} \Rightarrow T_s = T_p - \frac{e_d}{\lambda_p} q'' = T_p - r_{th} q'' \quad (17)$$



10 – Effet du dépôt sur le transfert thermique



On reprend les mêmes simulations précédentes, et nous nous intéressons à l'effet de dépôt enregistré pour les différents diamètres de particules injectées sur les performances de transfert thermique de l'échangeur.

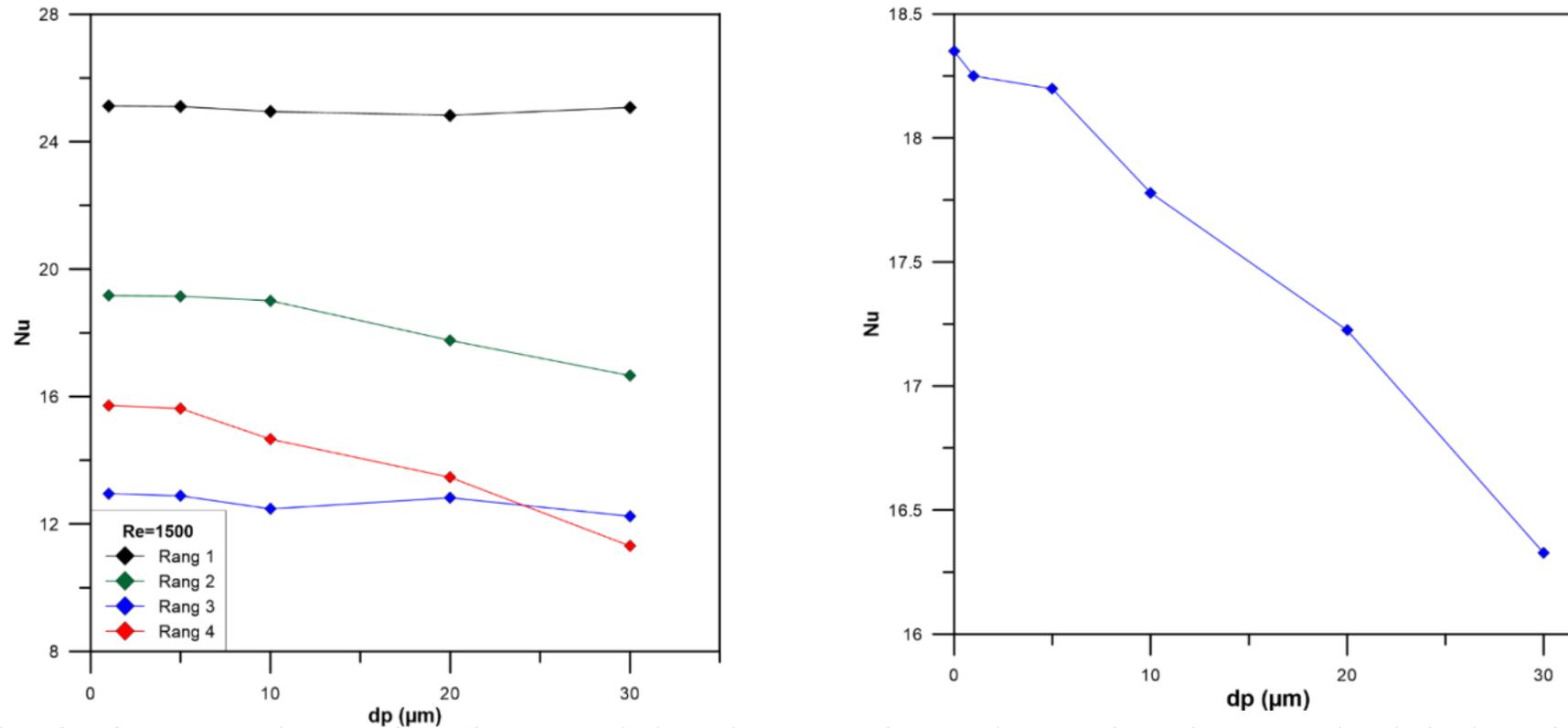


Figure 14 : Effet du dépôt sur le nombre de Nusselt local (à gauche) et le nombre de Nusselt global (à droite) ($Re=1500$).

- Un modèle de dépôt a été implémenté dans le code de calcul commercial Star-CCM+ et une approche a été développée afin d'estimer l'influence de dépôt de particules dans les échanges thermiques.
- L'effet de plusieurs paramètres numériques et physiques sur le dépôt de particules a été investigué , (modèle stochastique EIM, Re , le diamètre des particules injectées, F_p et b).
- L'évolution du taux de dépôt, permettant de définir des valeurs critiques pour les différents paramètres physiques et géométriques étudiés : un nombre de Reynolds critique à 2500 et d_p à $10 \mu\text{m}$.
- Enfin, le dépôt réduit l'efficacité des échanges thermiques dans l'échangeur de chaleur étudié, et

En thèse de doctorat depuis 1 janvier 2023

- Validation du modèle développé en se basant sur la littérature
- Intégration du modèle dans une étude avancée en utilisant l'approche LES (Large Eddy Simulation)
- Développement d'un échangeur innovant (étude paramétrique tenant compte de la fluïdique, de la thermique et de l'encrassement)

- [1] E. Toubiana, R.Gautier, D.Bougeard, S.Russeil, Large Eddy Simulation of transitional flows in an elliptical finned-tube heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences* 144 (2019) 158-172.
- [2] Q. Li, G. Flamant, X. Yuan, P. Neveu, and L. Luo. Compact heat exchangers : A review and future applications for a new generation of high temperature solar receivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 :393–405, 2011.
- [3] F. Kreith and R.F. Boehm et. al. Heat and Mass Transfer, *Mechanical Engineering Handbook*. Ed. Frank Kreith, Boca Raton : CRC Press LLC,1999, 1999.
- [4] Hamza Chérif Sadouk. Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois. Autre [cond-mat.other]. Université Paris- Est, 2009. Français. NNT : 2009PEST1001. tel-00499251
- [5] Barth et al. 2013, Experimental investigation of multilayer particle deposition and resuspension between periodic steps in turbulent flows, *Journal of Aerosol Science*,
- [6] Elghobashi. S, On predicting particle-laden turbulent flows, *Applied Scientific Research* 52 (1994) 309-329.
- [7] Douglas W. Cooper (1986) Particulate Contamination and Microelectronics Manufacturing: An Introduction, *Aerosol Science and Technology*, 5:3, 287-299
- [8] Peters et al., Air Pollution and Incidence of Cardiac Arrhythmia. *Epidemiology* 11(1):p 11-17, January 2000.
- [9] Lecrivain, Grégory & Hampel, Uwe. (2012). Influence of the Lagrangian Integral Time Scale Estimation in the Near Wall Region on Particle Deposition. *Journal of Fluids Engineering*. 134. 074502. 10.1115/1.4006912.
- [10] Hao Lu, Tao Ma, Lin Lu, Deposition characteristics of particles in inclined heat exchange channel with surface ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 161 (2020) 120289.
- [11] R. Brach, P. Dunn, A mathematical model of the impact and adhesion of Microspheres, *Aerosol Science and Technology* 16:1 (1992) 51-64.



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

**Merci pour
votre
attention...**