

SOCIETE FRANÇAISE DE THERMIQUE

Groupe Thématique « Échangeurs »

Jeudi 26 janvier 2023

Échangeurs thermiques et multi-fonctionnels : Récents développements et perspectives

Journée thématique organisée par : *Thierry LEMENAND (LARIS), RUSSEIL (IMT Nord Europe) et Mathieu FÉNOT (Institut P')*

Cette journée thématique avait pour but d'échanger autour des problématiques liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et fluide des échangeurs thermiques et multi-fonctionnels, composants primordiaux présents dans de nombreux secteurs et qui sont au cœur des problématiques liées à la transition écologique.

Elle s'est déroulée à l'espace Hamelin (17 rue Hamelin, Paris) et a réuni 15 participants, en majorité issus du monde académique, mais également, pour 5 d'entre eux, du monde industriel. Cette diversité d'origines a permis d'échanger et de confronter les points de vue académiques et industriels sur l'état de l'art des échangeurs ainsi que des possibles évolutions à moyen et long termes.

La journée a débuté par une introduction d'Anthony Badalamenti et de Nicolas Fabbro de Safran Aircraft Engines sur « Les enjeux des échangeurs liés aux turboréacteurs du futur », présentant les utilisations possibles, présentes et à venir, des échangeurs dans le cadre de la propulsion aéronautique, ainsi que les besoins de Safran pour répondre aux enjeux techniques dans ce domaine notamment ceux liés à la décarbonation.

Cette introduction a été suivie de 6 présentations couvrant un large spectre de méthodes et d'applications :

- 1- Echangeur/réacteur à milli-canal ondulé – Hydrodynamique et transferts dans un écoulement liquide/liquide
par Zoé Minvielle du CEA LITEN, **page 3**
- 2- Etude expérimentale d'un échangeur à condensation en mini-canaux
par Dominique Couton de l'Institut P'- Université de Poitiers, **page 25**
- 3- Hybrid Heat Recovery Systems with Integrated Vortex Generators - Numerical and Parametric Studies
par Al Aridi Rima et Thierry Lemenand du LARIS -Université d'Angers, **page 37**
- 4- Contrôle en ligne des échangeurs par excitation/réponse transitoire en température
par Denis Maillet, Benjamin Rémy, Vincent Schick du LEMTA -Université de Lorraine, **page 89**
- 5- Déposition de particules solides dans un échangeur thermique à tubes ailetés : analyse numérique via une approche Euler–Lagrange
par Kousseila Atsaïd, Souria Hamidouche, Rémi Gautier, Serge Russeil de l'IMT Nord Europe, **page 119**
- 6- Échangeurs-stockeurs de type thermocline destinés à la récupération et la valorisation de chaleur fatale
par Régis Olives du PROMES, **page 138**

L'ensemble des présentations a montré un bon équilibre et une complémentarité certaine et nécessaire entre les approches expérimentales et numériques.

De plus, un nombre croissant d'études (trois lors de cette journée) semblent s'intéresser aux échangeurs du point de vue système. Pour la plupart de ces études, l'objectif était la réduction de modèle ou l'optimisation des échangeurs au travers de modèles réduits.

Cependant, les autres études restent centrées sur la compréhension et l'amélioration des phénomènes locaux.

Cette dualité dans les approches a amené une discussion qui a conclu à l'utilité et à la complémentarité de chacune d'entre elles.

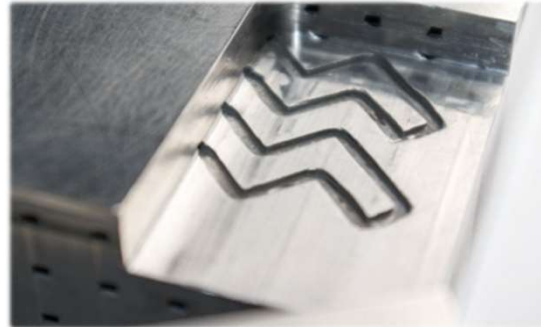
D'autre part, si les études sur des échangeurs monophasiques restent encore majoritaires (4 présentations), il a été noté une augmentation des travaux sur les échangeurs diphasiques avec ou sans changement de phase.

Enfin, malgré une demande industrielle forte, aucun des travaux présentés ne s'est intéressé aux échangeurs réalisés par fabrication additive, ni d'un point de vue local (effet de la rugosité) ni d'un point de vue plus global. Cette absence peut peut-être en partie s'expliquer par les aspects de confidentialité liés à ces nouvelles techniques de fabrication.

Echangeur/réacteur à milli-canal ondulé : hydrodynamique et transferts dans un écoulement liquide/liquide

Antoinette MAARAWI, Zoé ANXIONNAZ-MINVIELLE, Pierre COSTE,
Nathalie DI MICELI RAIMONDI, Michel CABASSUD

Séminaire SFT – 26 janvier 2023 - Paris



Intensification des procédés

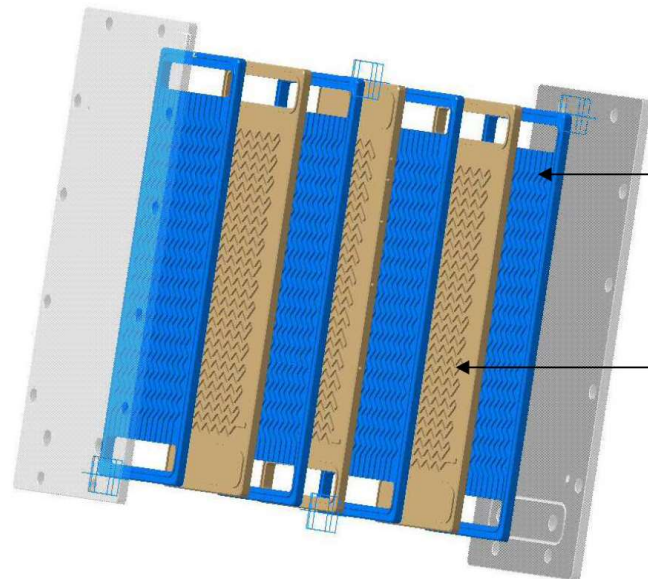
→ Couplage de plusieurs fonctions unitaires

Développement des échangeurs/réacteurs milli-structurés :

→ Intensification des transferts thermiques

→ Temps de séjour critique

→ Ecoulements de Dean (structuration 2D du canal réactionnel)



Plaque utilité → chauffage ou refroidissement

Plaque procédé → réaction

Intensification des procédés

→ Couplage de plusieurs fonctions unitaires

Développement des échangeurs/réacteurs milli-structurés :

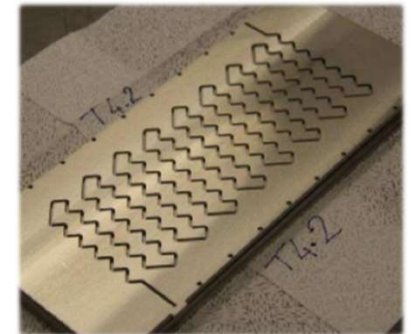
→ Intensification des transferts thermiques

→ Temps de séjour critique

→ Ecoulements de Dean (structuration 2D du canal réactionnel)

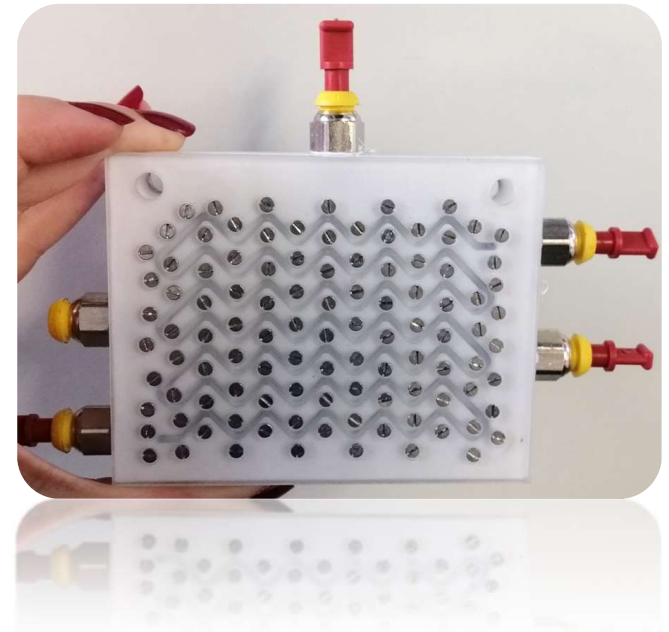
Polyvalence de ces technologies ?

Mise à l'échelle ?

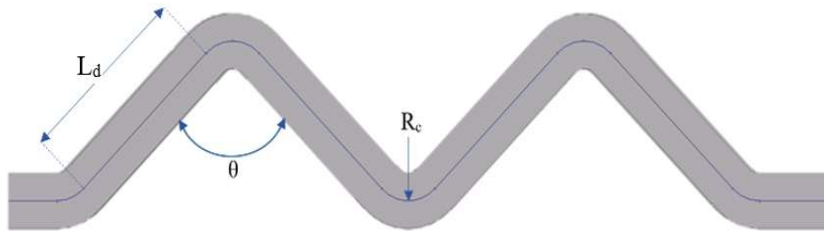
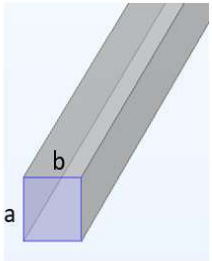


Modèle de prédiction des performances thermiques et massiques en milieu diphasique

- L'échangeur/réacteur milli-structuré
- Système diphasique
- Régimes d'écoulement et transfert massique
- Modélisation numérique (thermique + massique)
- Conclusions / Perspectives

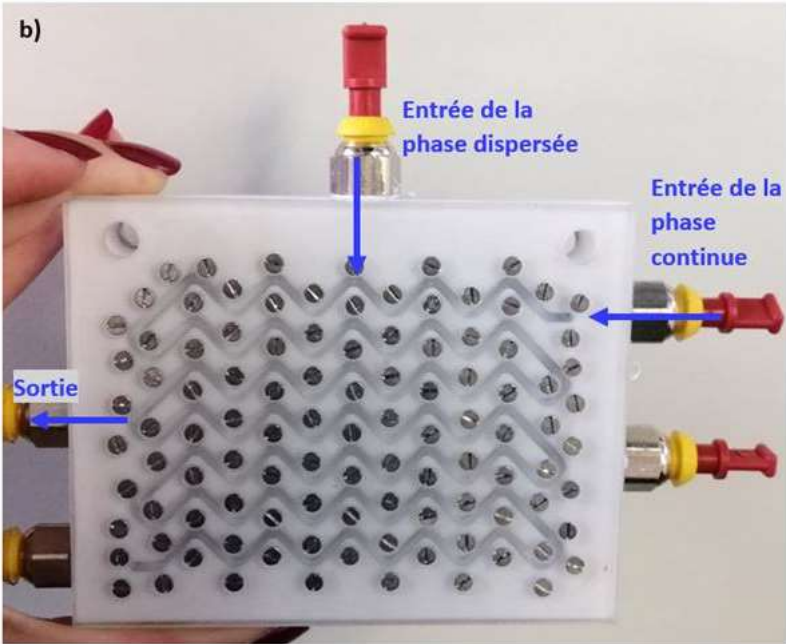


L'ÉCHANGEUR/RÉACTEUR MILLI-STRUCTURÉ



a=b (mm)	R _c (mm)
2	1,5
3	2,25
4	3

$L_d=7\text{mm} ; \theta=90^\circ$

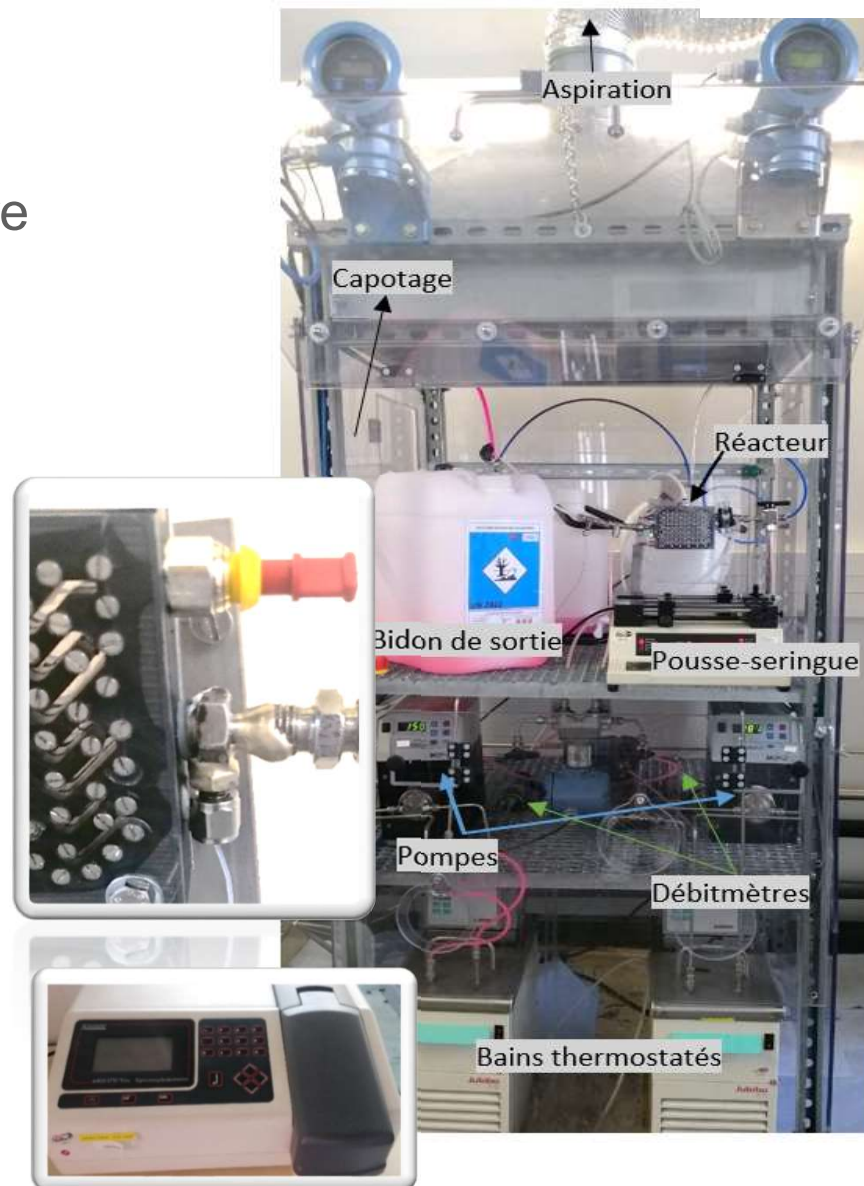


- Visualisation des écoulements
- Caractérisation du transfert de matière liquide/liquide

- Eau / Rhodamine B / Octan-1-ol

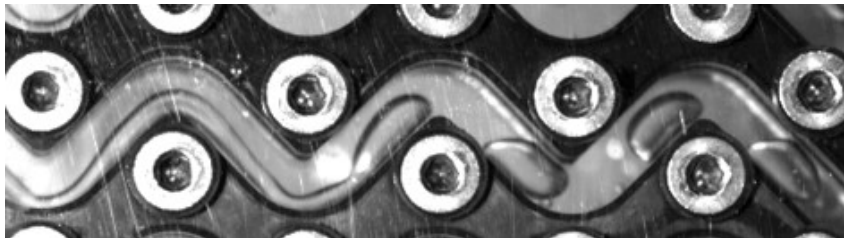


- Séparation en sortie de maquette
- Analyse spectrophotomètre UV-Visible



Quatre régimes d'écoulements observés:

1. Annulaire/Bouchons



2. Annulaire



3. Annulaire/Dispersé



4. Agité (émulsion)



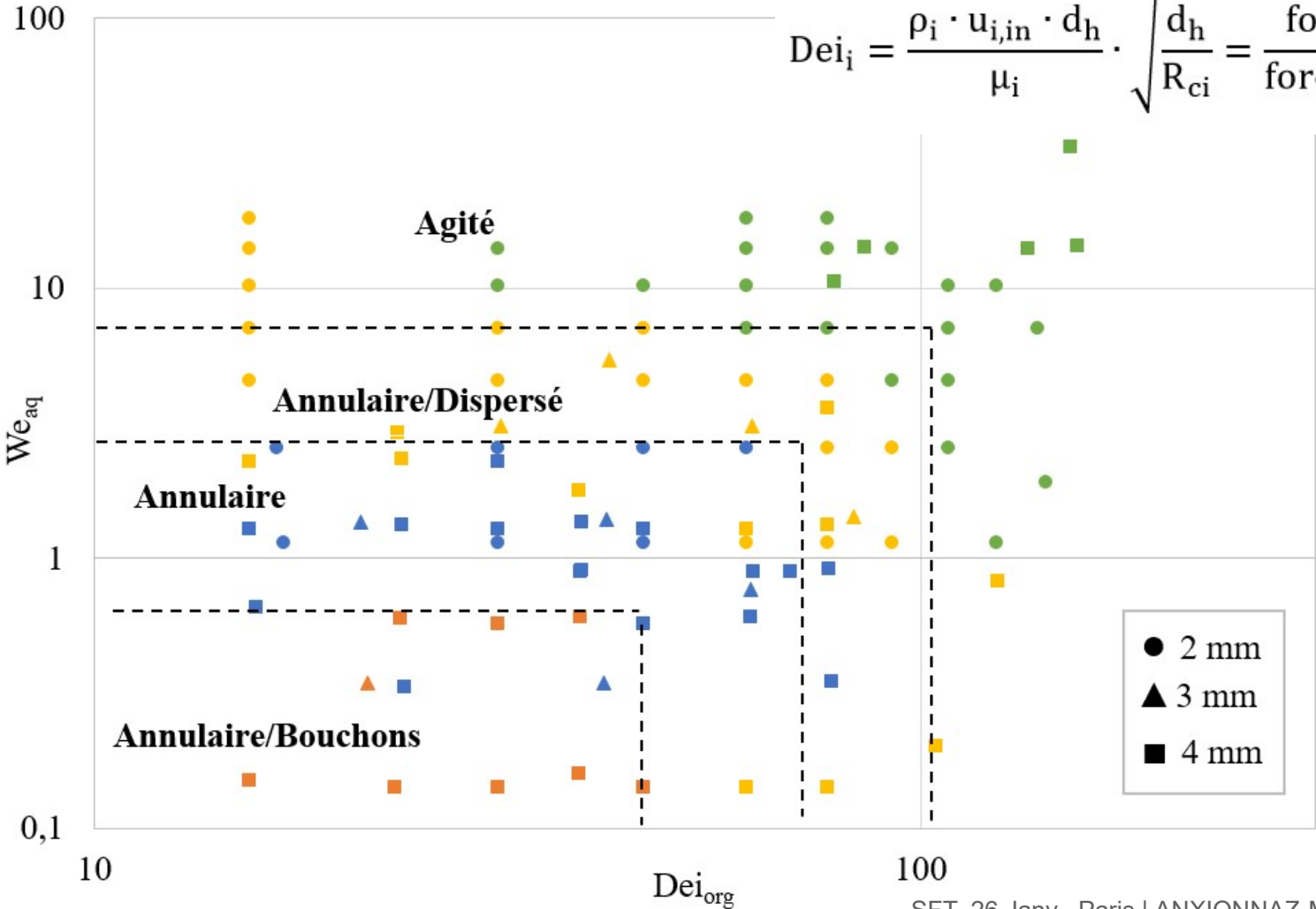
Phase organique = phase continue

CARTOGRAPHIE D'ÉCOULEMENT

✓ Satisfaisante
Quelle que soit la taille des milli-canaux !

$$We_i = \frac{\rho_i \cdot u_{i,in}^2 \cdot d_h}{\gamma} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{tension interfaciale}}$$

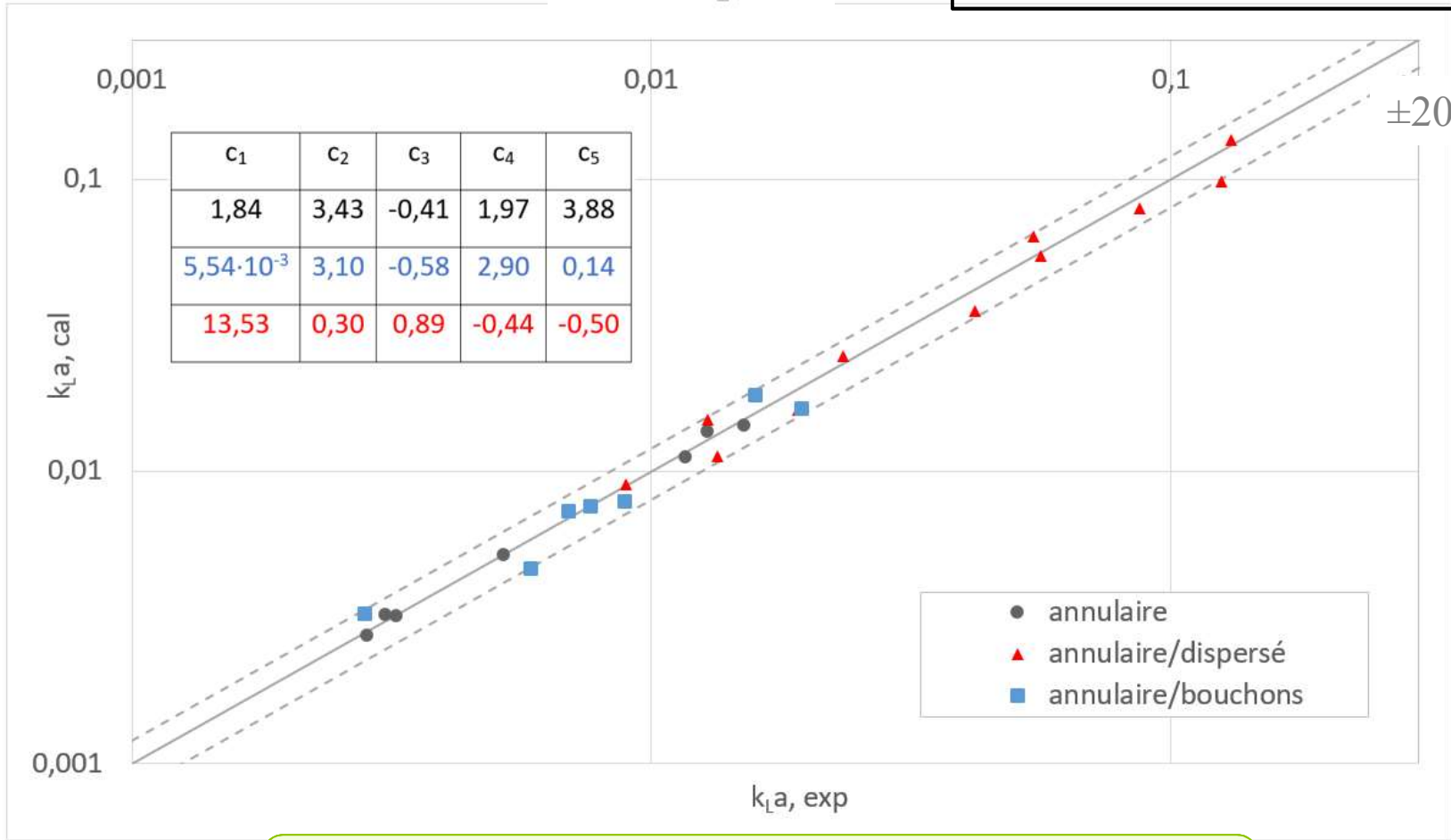
$$Dei_i = \frac{\rho_i \cdot u_{i,in} \cdot d_h}{\mu_i} \cdot \sqrt{\frac{d_h}{R_{ci}}} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces visqueuses}}$$



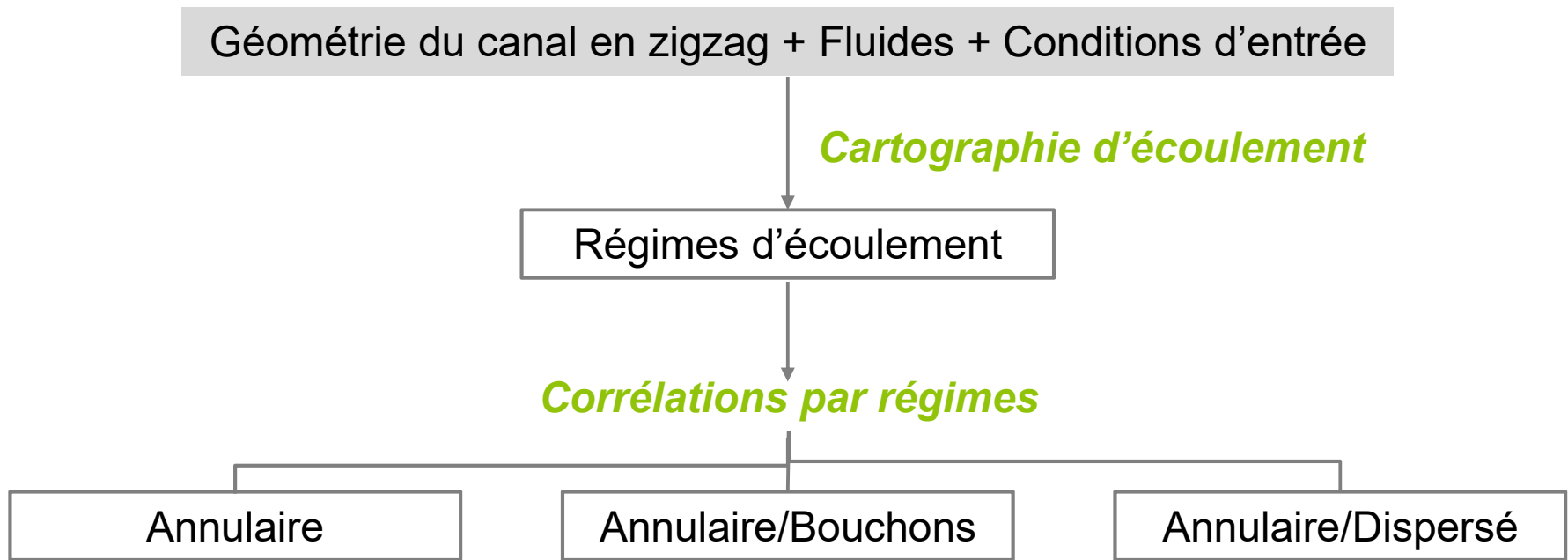
TRANSFERT DE MATIÈRE

$$Sh^* = \frac{k_{La} \cdot d_h^2}{D}$$

$$Sh^* = c_1 \cdot De_{org}^{c_2} \cdot We_{aq}^{c_3} \cdot q^{c_4} \cdot \left(\frac{R_{ci}}{L_d}\right)^{c_5}$$



- ✓ Même forme de corrélation *quel que soit le régime*
- ✓ Données de différentes tailles de canaux

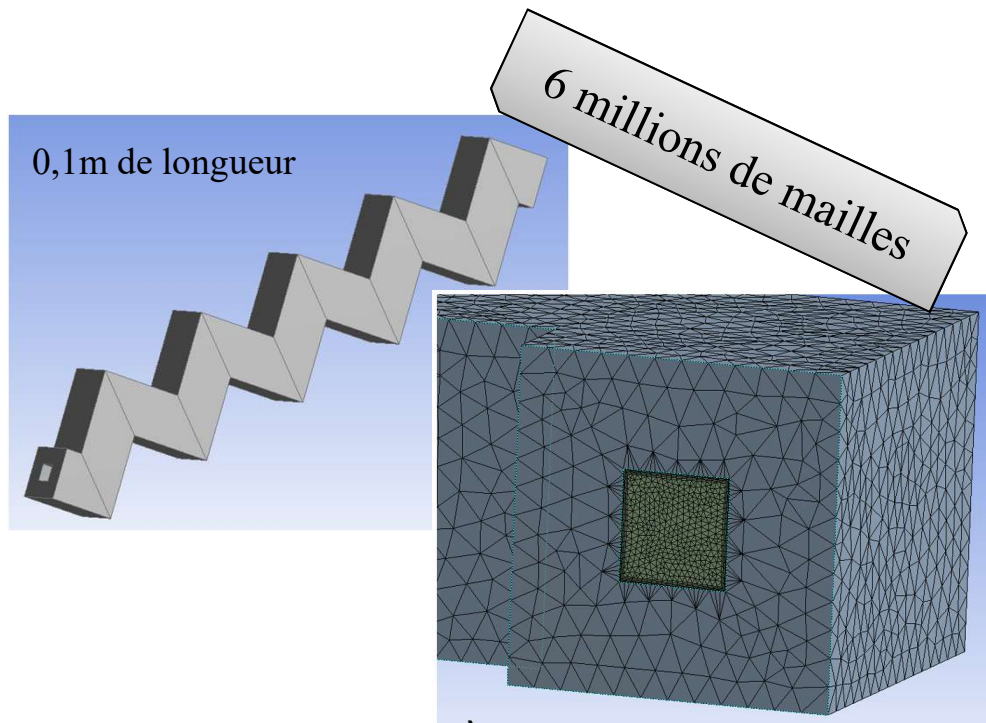


Modèle numérique pour prédire les performances du réacteur à des conditions opératoires données !

Modèle d'échangeurs/réacteurs à plaques pour:

- Simulation rapide de cas d'étude
- Prédiction des performances lors de la mise à l'échelle industrielle

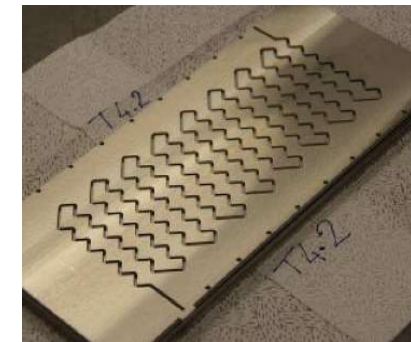
Modèles 3D CFD :



Modèles 1D :

↓
Flux de chaleur:

- ✓ entre fluides « procédé » et « utilité »
- ✗ entre canaux adjacents



Simulations longues et complexes (*géométries des canaux avec L/d_h élevé*)

Approche numérique **1D/3D**

Comsol

*Compromis entre
les modèles 1D
'classiques'
et 3D CFD*

Couplage :

- **modèle 1D** pour le canal zigzag
- **modèle 3D** pour le solide environnant

Modèle 1D:

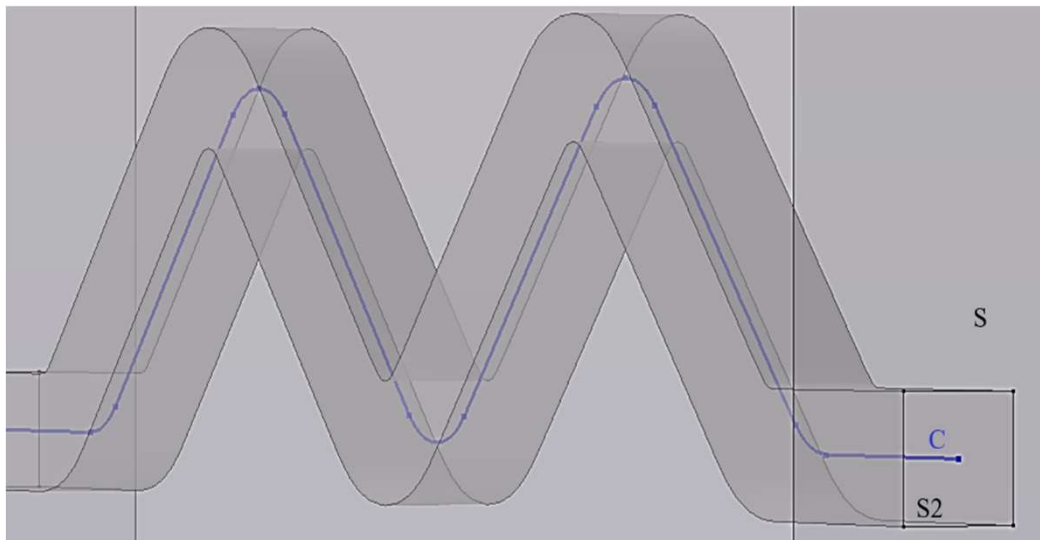
- Variables physiques **moyennées** sur les sections transversales du canal
 - ✓ *Éviter le maillage 3D complexe de la section du canal*
- **Corrélations** intégrées
 - ✓ *Prédire les performances de l'échangeur/réacteur*
 - ✓ *Transfert thermique + massique + pertes de charge*

Canal en zigzag 3D → Fil 1D « C » (axe du canal 3D)

Matériau solide du dispositif → Matrice solide « S »

+ **Solide fictif « S2 »**

- Géométrie du solide réel
- Conditions aux limites réalistes dans « S » (flux de chaleur)



Géométrie simulée avec l'approche 1D/3D.

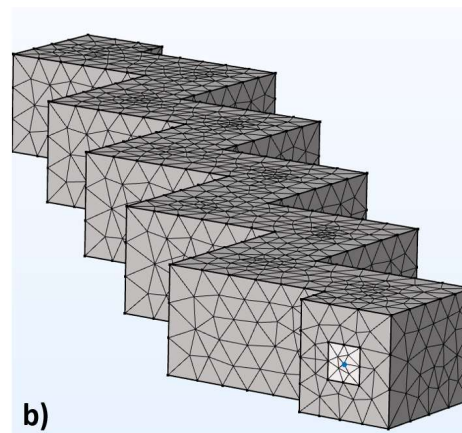
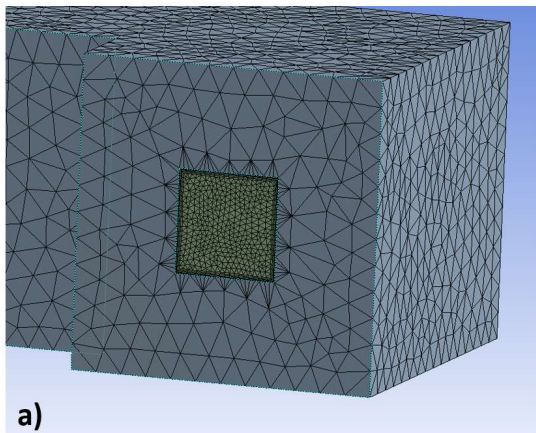
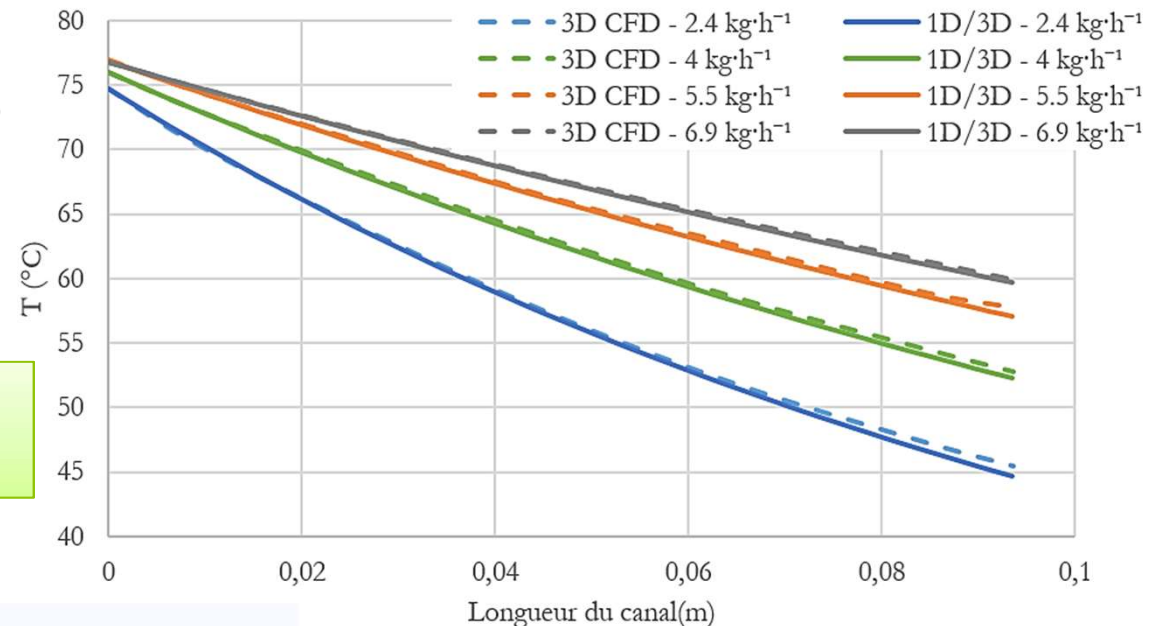
+ **Conductivité thermique de « S2 » radialement infinie ($10^5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)**

- Transmission de la température de « C » au voisinage des parois de « S2 » dans chaque section

Comparaison aux résultats CFD 3D

- ANSYS Fluent
- Modèle de turbulence SST k- ω
- Re de 700 à 2300

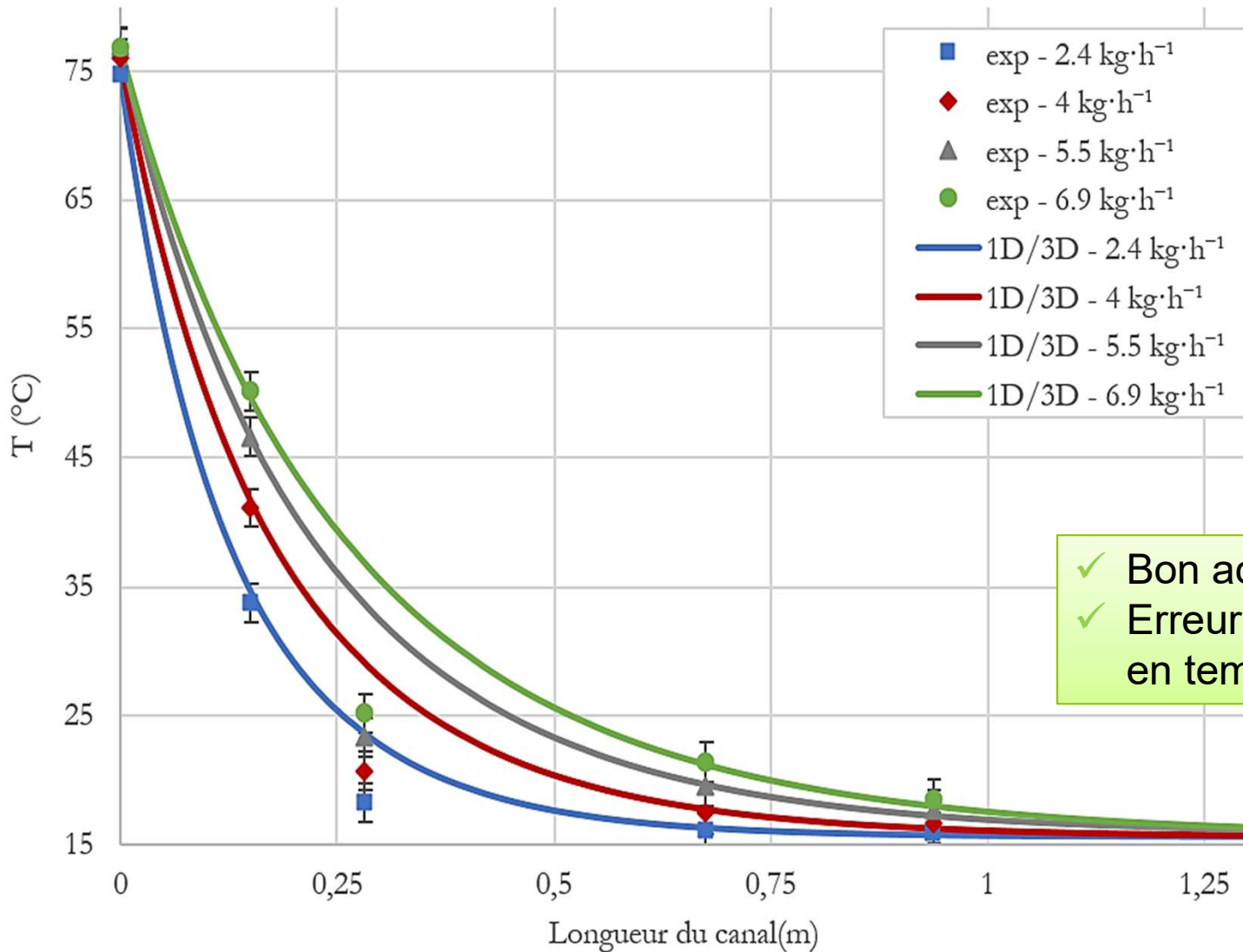
- ✓ Erreur relative maximale < 2%
- ✓ Très bon accord



Maillages utilisés dans les simulations a) CFD 3D et b) 1D/3D.

- ✓ 6 millions de mailles (3D CFD) vs 77 240 mailles (1D/3D)
- ✓ Réduction significative du temps de calcul (4h à 5min)

Comparaison aux résultats expérimentaux



✓ Bon accord
✓ Erreur relative maximale en température < 4%

Implémentation réaction exothermique : $2\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 4\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_3\text{O}_6 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$

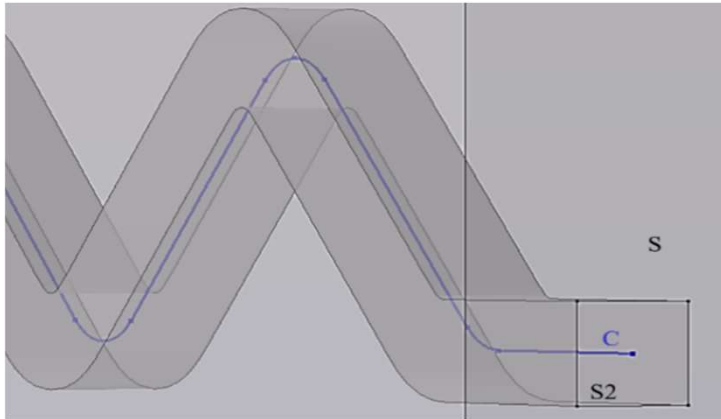
N° Exp.	$T_{p,out,exp}$ (°C)	$T_{p,out,simu}$ (°C)	Conversion (exp)		Conversion (simu)
			Reacteur	Dewar	
1	43,9	40,6	60	59	73
2	41,4	40,2	82	94	92
3	43,4	40,7	88	91	86
4	51,0	50,3	93	100	96
5	59,2	59,8	95	100	99

Différence relative en température < 8%

*Modèle 1D/3D validé
en monophasique
(avec et sans réaction)*

Différence relative en conversion (réacteur) < 12%
Différence relative en conversion (Dewar) < 5%

Modélisation diphasique



→ Où le fil « C » = canal procédé de section S_p



Appliquer à « C » **deux physiques 1D** (deux liquides) : (section $S_i = \alpha_i \cdot S_p$ avec $i=aq$ et org)

Flux transféré:

$$F = \frac{k_L a}{\alpha_{org}} \cdot (m \cdot c_{aq} - c_{org})$$

Dans le modèle:

- **Corrélations de $k_L a$** selon le régime d'écoulement
- Conditions opératoires des expériences
- Calcul des fractions volumiques d'après **modèle de glissement**

➔ Comparaison des concentrations en sortie du réacteur (simulées vs expérimentales)

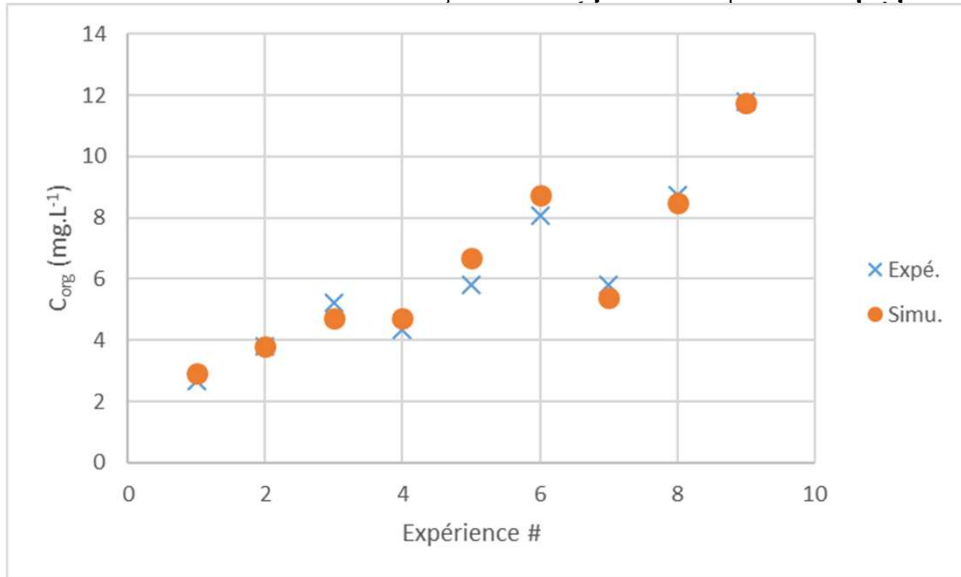
VALIDATION DU MODÈLE

$d_h = 2 \text{ mm}$

Erreur relative < 15%
(en moyenne < 7%)

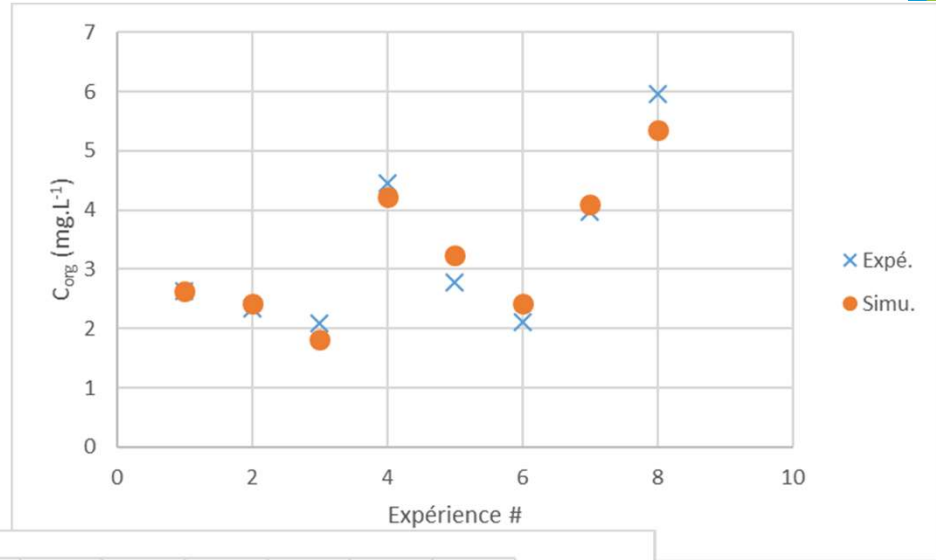
$Q_{aq} \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$Q_{org} \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$c_{org, exp} \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$	$c_{org, simu} \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$
1	2	2,67	2,91
1,5	3	3,78	3,81
2	4	5,23	4,7
1	1	4,36	4,72
2	2	5,82	6,69
3	3	8,06	8,75
1	0,5	5,80	5,37
2	1	8,73	8,48
3	1,5	11,79	11,75

$\pm 0,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



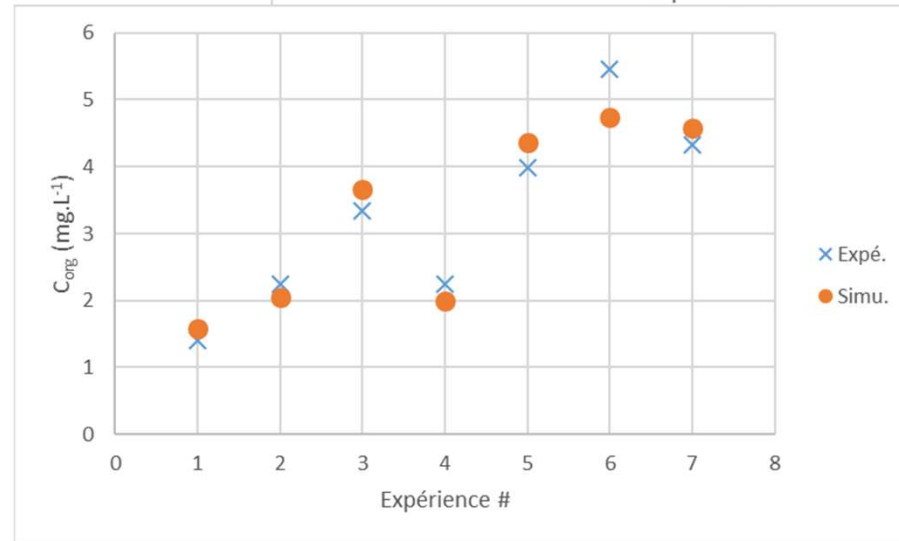
$d_h = 3 \text{ mm}$

Erreur relative < 17%
(en moyenne < 8%)



$d_h = 4 \text{ mm}$

Erreur relative < 13%
(en moyenne < 10%)



Résultats prometteurs : - corrélations de $k_L a$ résultant d'un ensemble de données
- différents régimes d'écoulement et tailles de canaux

- ❖ Caractérisations expérimentales d'un **échangeur/réacteur à milli-canal** ($d_h=2$; 3 et 4mm)
 - Cartographie d'écoulements
 - Transfert de matière liquide/liquide
 - Corrélations pour le transfert de matière

- ❖ Nouvelle approche de **modélisation 1D/3D**
 - Représentation fine des phénomènes avec moins de ressources
 - Transfert de chaleur avec et sans réaction (monophasique)
 - Temps de calcul de 4h (CFD 3D) à 5min
 - Lois de frottement, corrélations de transferts thermique et massique
 - Modèle validé à partir de résultats expérimentaux (diphasique)

- ❖ **Plusieurs systèmes de fluides** ayant différentes propriétés physico-chimiques
- ❖ Écoulement de type **agité**
- ❖ Modélisation (EES) du **glissement**
- ❖ **Canaux « utilité »** présents géométriquement et représentés par des modèles 1D
 - Modélisation dynamique
 - Evaluation des effets de déviation des conditions opératoires
- ❖ Simulation d'une **réaction diphasique**, rapide et exothermique avec le modèle 1D/3D
 - Validation du modèle complet (transferts thermique et massique)
 - Étude de l'effet du régime d'écoulement sur les taux de conversion



zoe.minvielle@cea.fr



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

THANKS FOR YOUR ATTENTION

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
17 rue des Martyrs | 38054 Grenoble Cedex
www-liten.cea.fr

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019



SOCIETE FRANCAISE DE THERMIQUE
Groupe thématique « ECHANGEURS »

Journée thématique – Jeudi 26 janvier 2023

***Échangeurs thermiques et multi-fonctionnels :
récents développements et perspectives***



**Etude expérimentale d'un échangeur à
condensation à mini-canaux**

Nam LE, Dominique COUTON*, Matthieu FENOT, Frédéric PLOURDE

***Institut P' (UPR CNRS 3346) – Dépt. FTC – Equipe COST (Convection,
Optimisation, Systèmes Thermiques)***

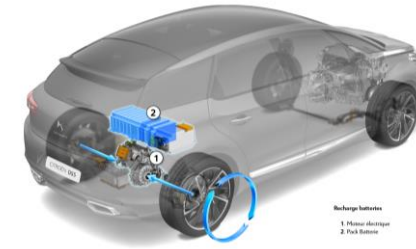




L'un des enjeux de la **transition énergétique** : réduction de la consommation énergétique de tous les **procédés industriels**.

Les **échangeurs thermiques** interviennent dans de nombreux procédés.

Transfert thermique plus efficace ?



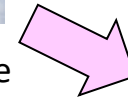
Gestion de la thermique des batteries par systèmes monophasiques et diphasiques (PSA 2019-2023)



Gestion de la condensation de vapeur d'eau dans les packs de conditionnement d'air sur échangeurs compacts (Liebherr Aerospace 2002-2022)

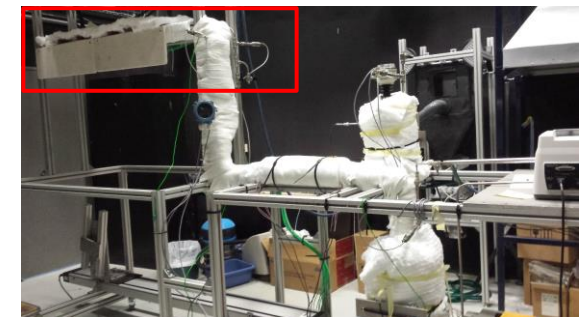


Identification d'un système permettant de refroidir un système embarqué : gestion au niveau du turboréacteur (Airbus 2015-2018)



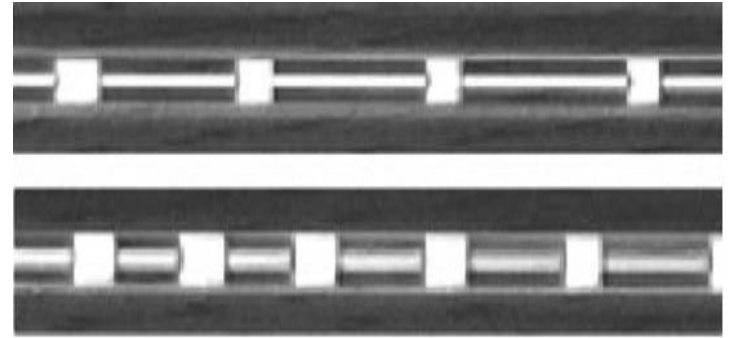
Solution : Boucle diphasique avec changement de phase de vapeur d'eau en minicanaux ...

Condenseur



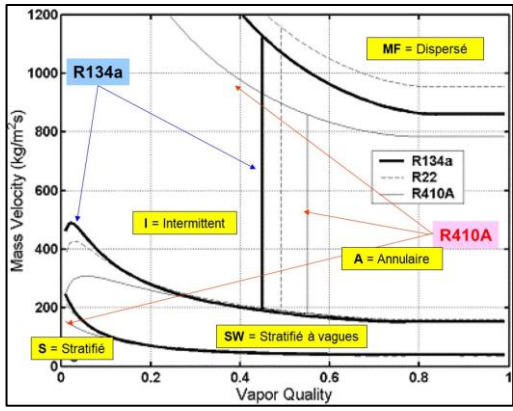
Littérature scientifique → Fluides frigorigènes ?

- ❖ Cavallini et Zecchin (1974) [1] : R11, R12, R21, R22, etc.
- ❖ Haraguchi et al. (1994) [2] : R22, R134a et R123
- ❖ Dobson et Chato (1998) [3] : R12, R22, R134a et R32/R125
- ❖ Tran et al. (2000) [4] : R12, R113 et R134a
- ❖ Cavallini et al. (2001) [6] : R22, R32, R125, R134a, etc.
- ❖ Wilson et al. (2003) [7] : R134a et R410A
- ❖ Park et al. (2011) [8] : R1234ze(E)
- ❖ Bohdal et al. (2011) [9] : R134a et R404A



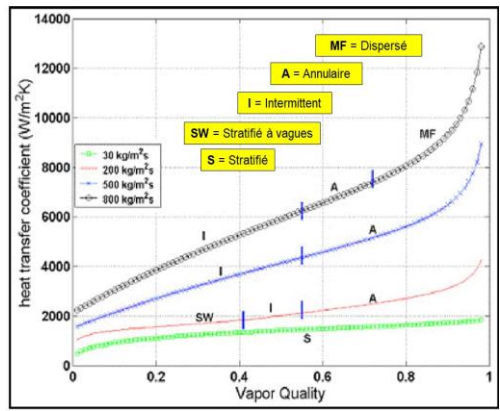
Serizawa et al. (2002)

4 - Topologie d'écoulement



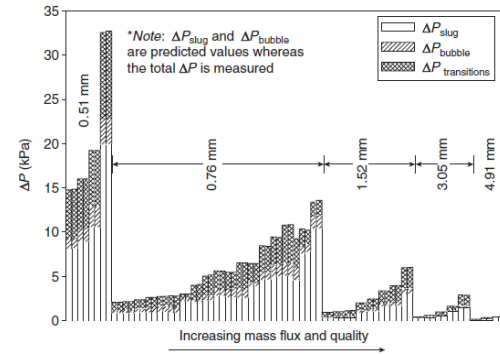
Muzzio et al. (1998)

1 - Cartographie des régimes d'écoulement



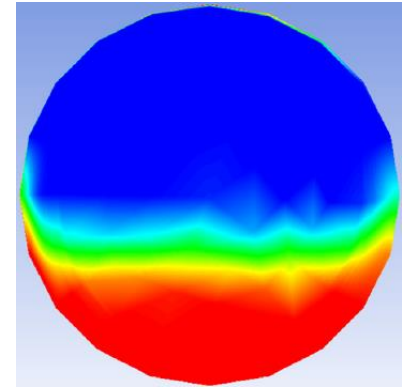
Muzzio et al. (1998)

2 - Coefficient d'échange moyen



Coleman et al. (2003)

3 - Perte de charge

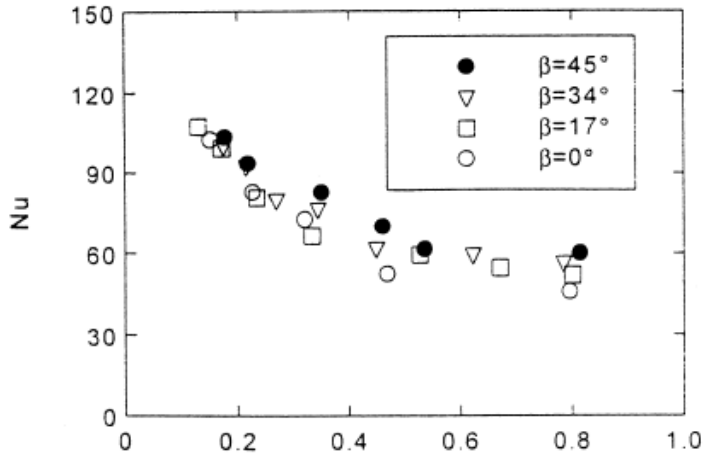


Abadi et al. (2018)

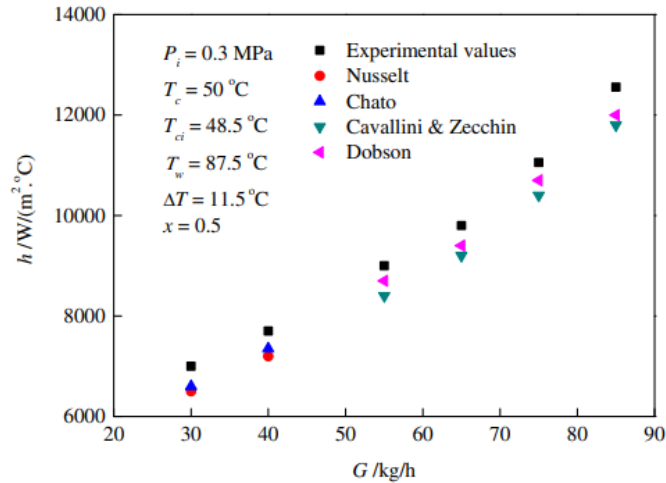
5 - Simulation numérique de la condensation dans un tube

Littérature scientifique → Eau ?

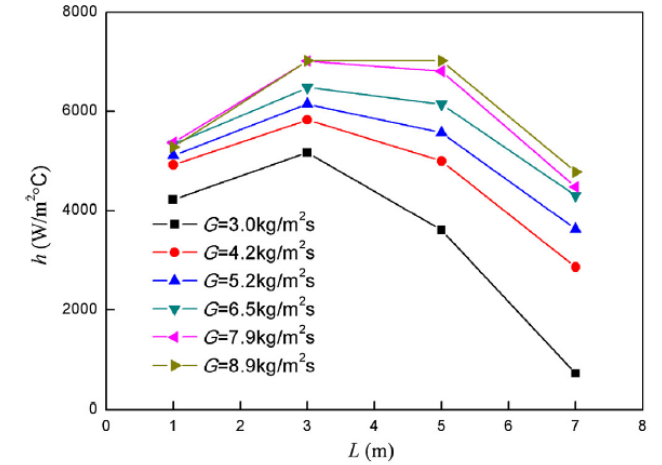
[5] Bu-Xuan WANG et Xiao-Ze DU. « Study on laminar film-wise condensation for vapor flow in an inclined small/mini-diameter tube ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 43.10 (mai 2000), p. 1859-1868.



[10] Y. Wang et al. « Heat transfer characteristics of steam condensation flow in vacuum horizontal tube ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 108 (2017), p. 128-135.



[11] Juan SHI, Gonghang ZHENG et Zhenqian CHEN. « Experimental investigation on flow condensation in horizontal tubes filled with annular metal foam ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 116 (2018), p. 920-930.



(1) $\Delta T_{s,c} = 3^\circ\text{C}$

- Écoulement laminaire ^{1-x}
- Mini-canal : $1,94 < d < 4,98 \text{ mm}$**
- Inclinaison β
- 3 températures / échangeur : global
- $\text{Nu} = f(d, G, x, \beta)$

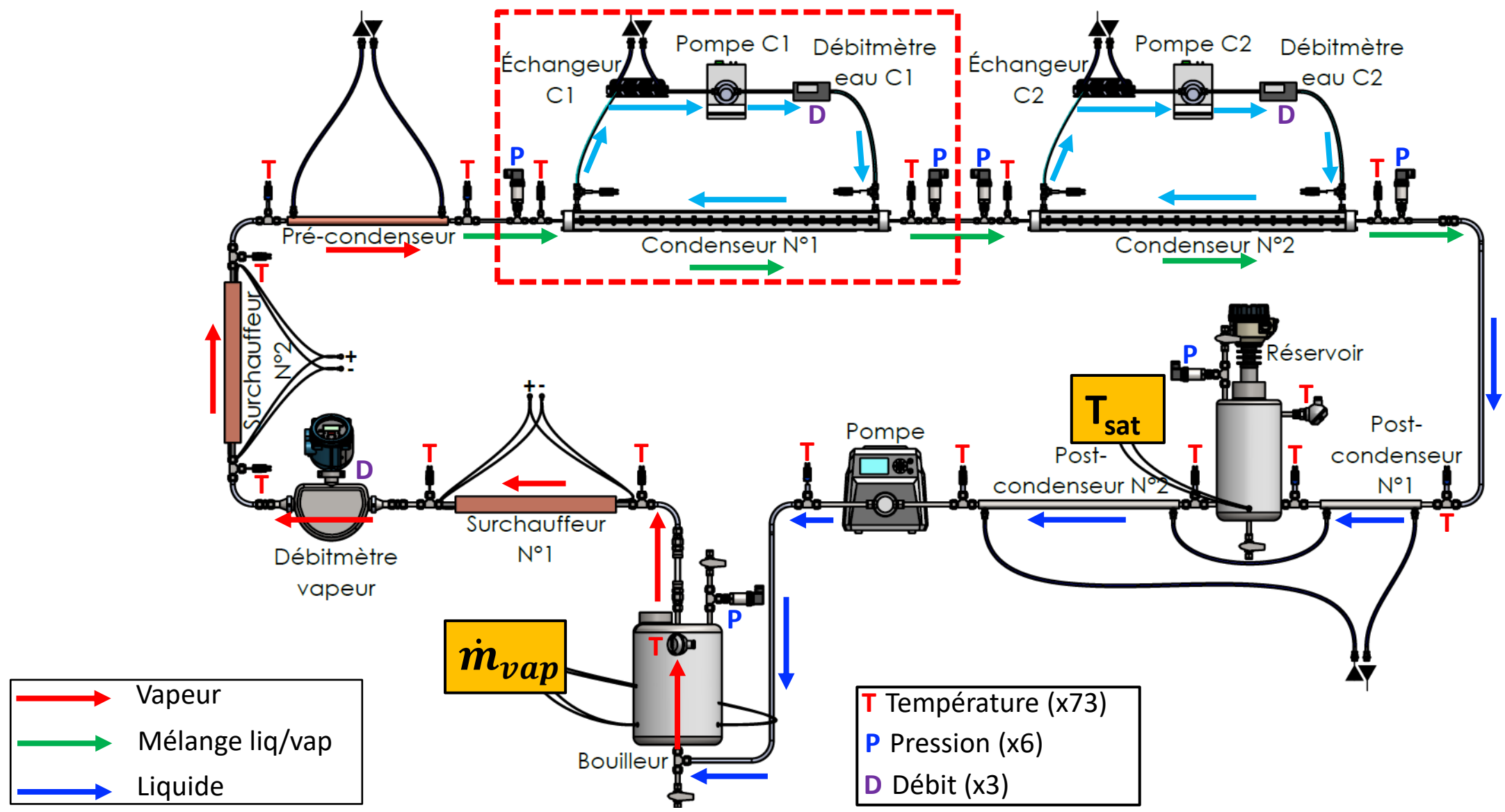
- Écoulement laminaire
- Macro-canal : $d = 18 \text{ mm}$**
- 6 températures / échangeur : global
- $h = f(G, z, \Delta T_{\text{sat}})$

- Écoulement avec couche métallique poreuse
- Macro-canal : $d = 9,52 \text{ mm}$**
- 4 températures locales x 9 positions longitudinales
- $h = f(G, z, \theta)$

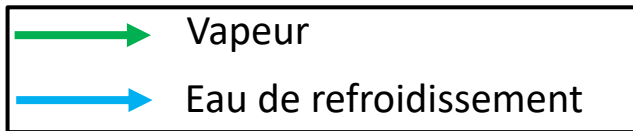
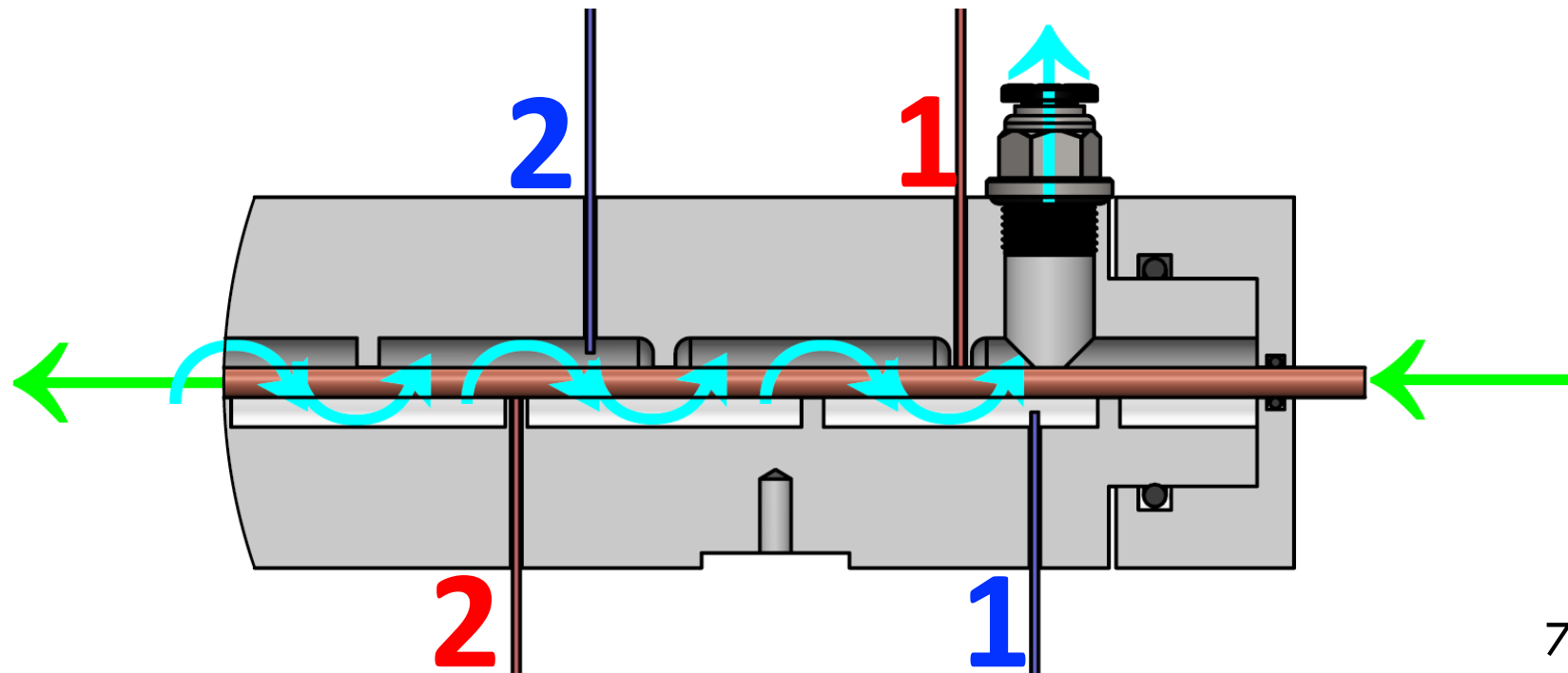
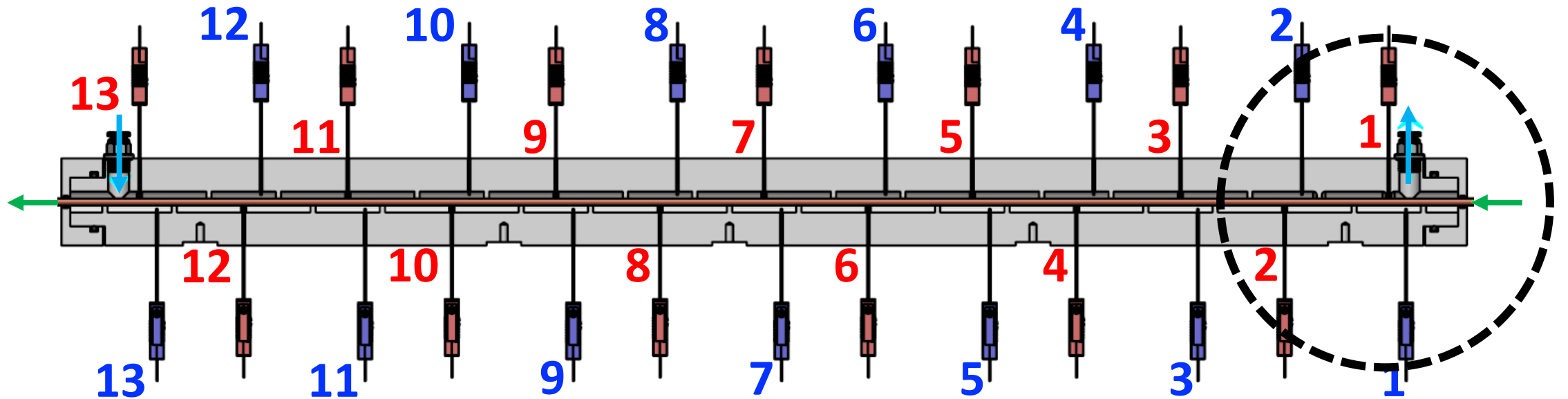
➤ Peu d'études sur l'eau comme fluide de travail en mini-canal
 ➤ Mesures généralement globales
 ➤ Pas de travaux numériques

**Dispositif Expérimental : boucle diphasique en « mini-
canal » circulaire ...
(diamètre interne 3 mm)**

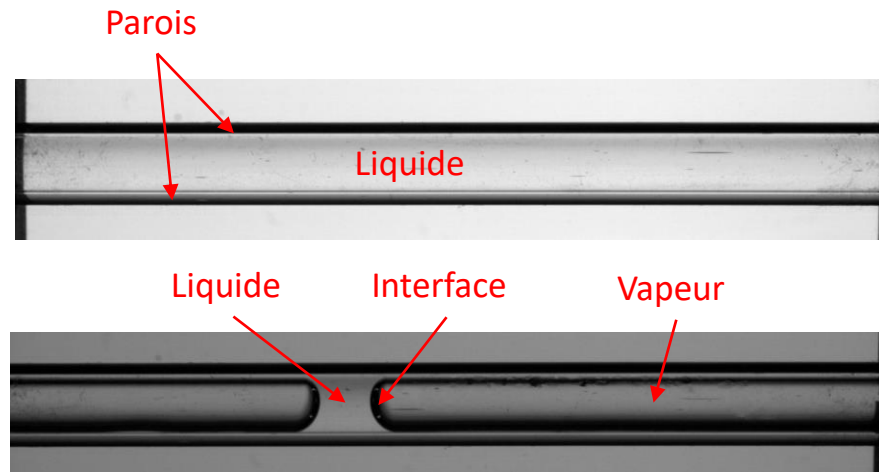
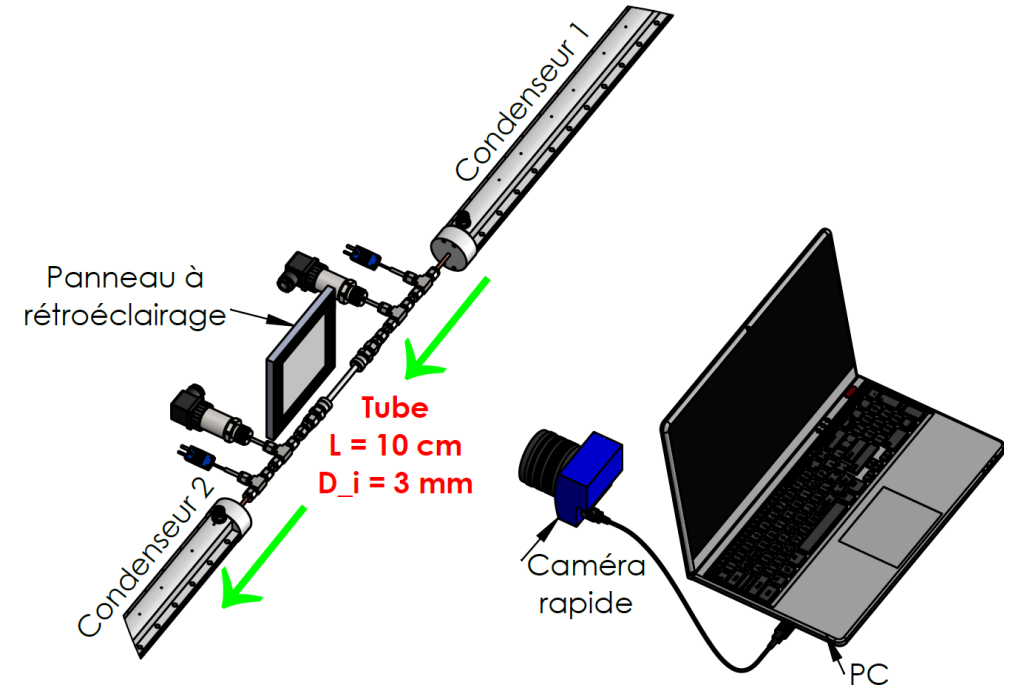
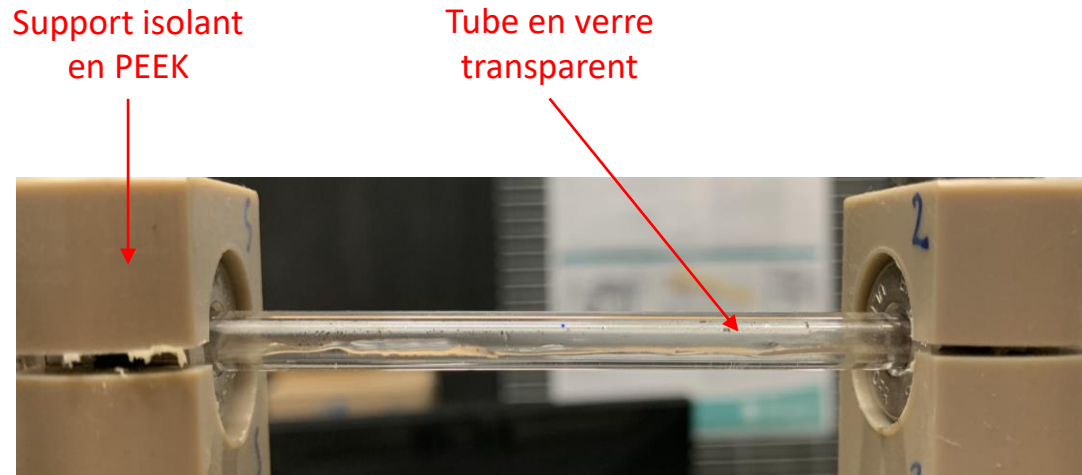
Dispositif expérimental



Condenseur



Dispositif de visualisation



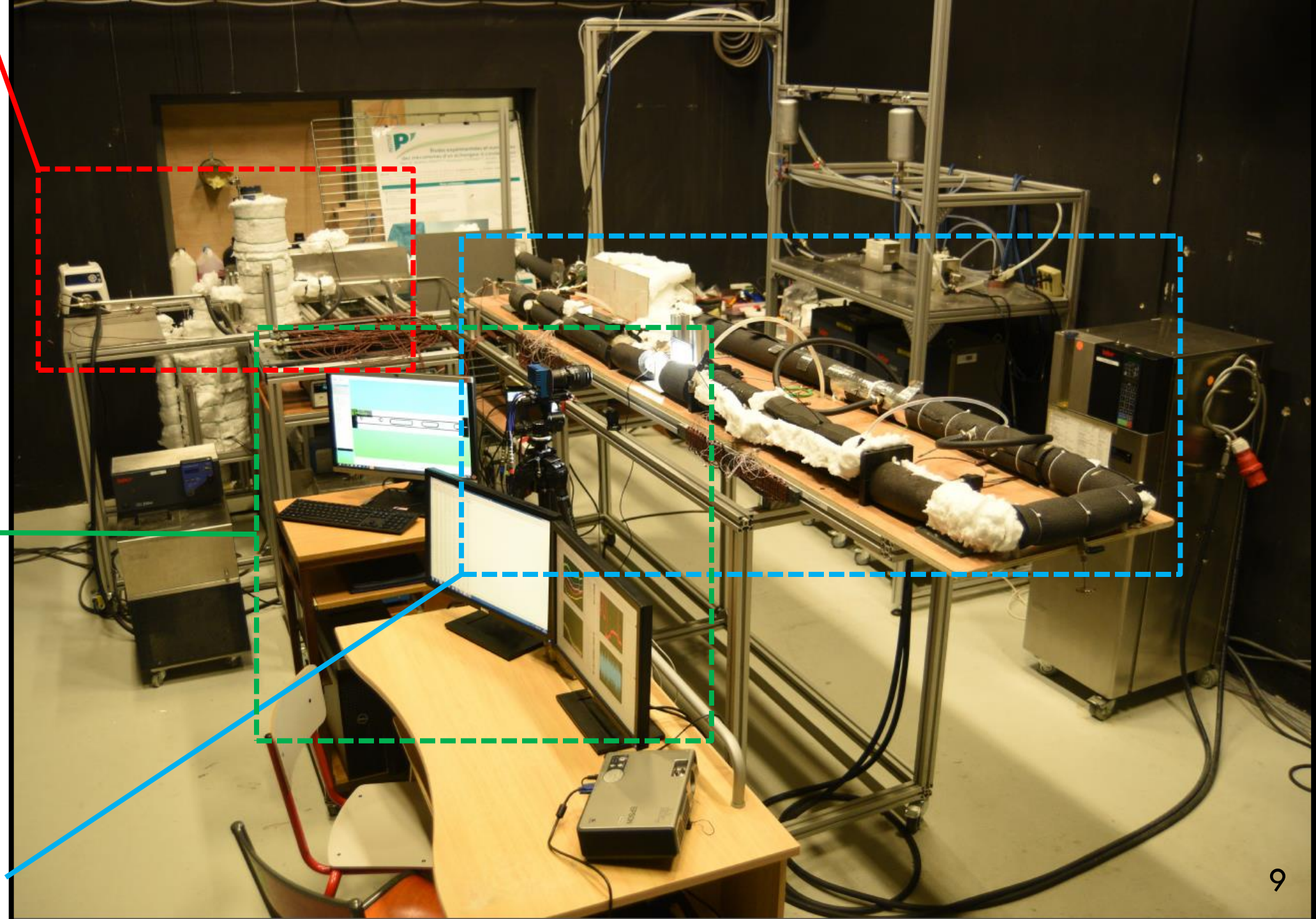
Paramètres	Valeur
Caméra	MIKROTRON EoSens 4CXP
Objectif	NIKON AF Micro Nikkor 60 mm f/2,8
Panneau LED	Phlox LedW-Backlight 100×100
ROI	2336×432 pixels
Frame rate	200 im/s

1. Approche expérimentale

Zone « évaporation »

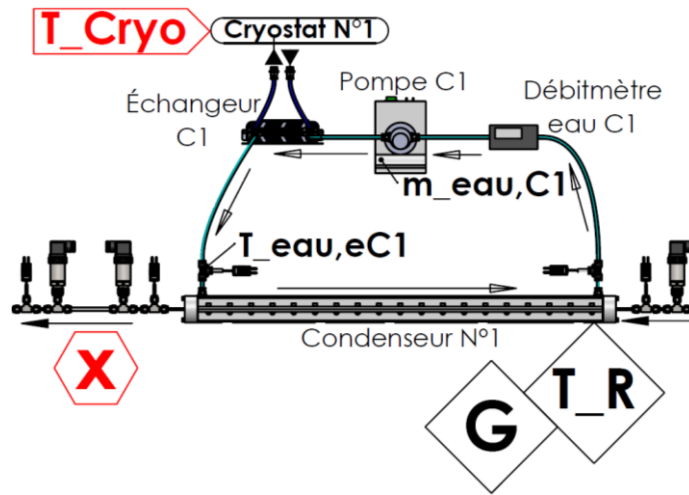
Visualisation et acquisition des données

Zone « condensation »



IDENTIFICATION DES TOPOLOGIES D'ÉCOULEMENTS EN CONDENSATION

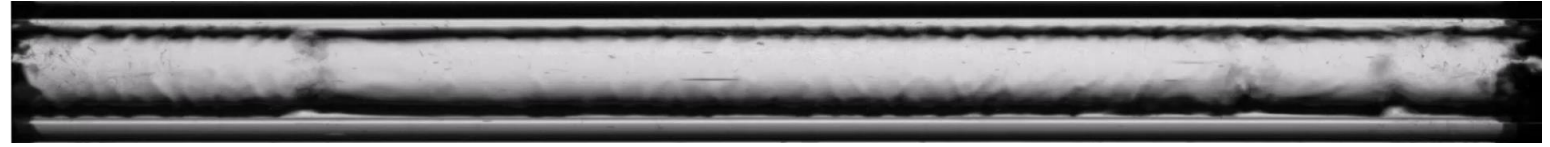
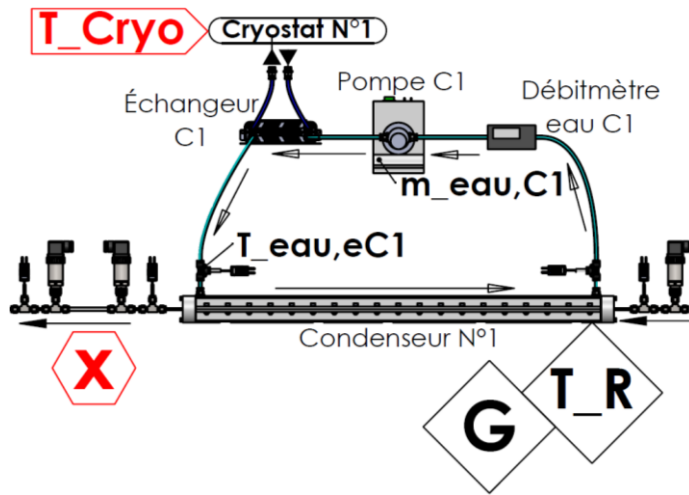
❖ **Visualisation expérimentale**

Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$ 

$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$

Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$

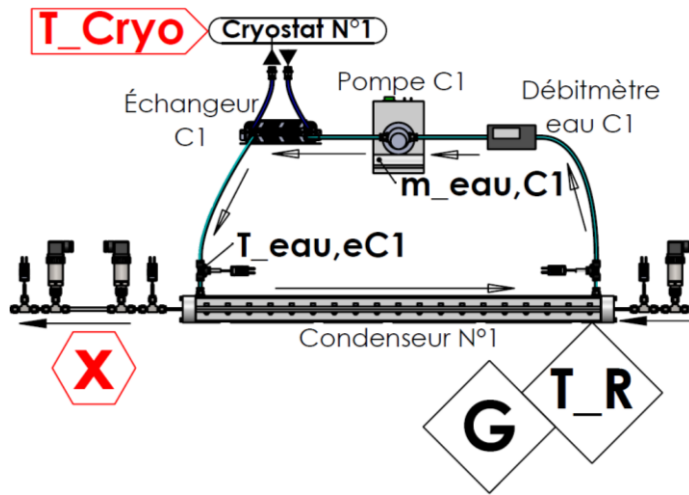


$x = 0,37$

$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

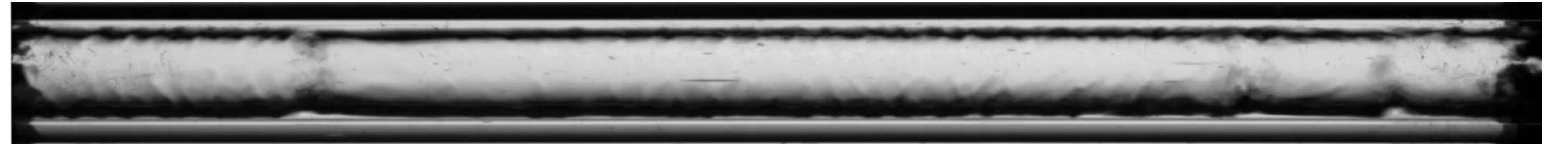
- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$

Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$

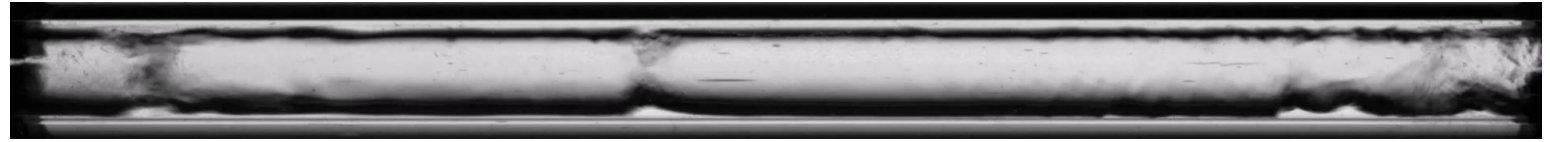


$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

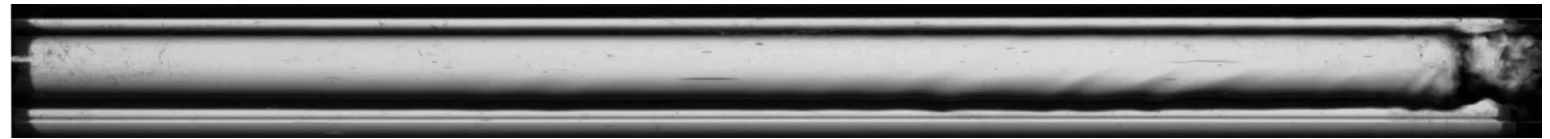
- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$



$x = 0,37$



$x = 0,25$



$x = 0,15$



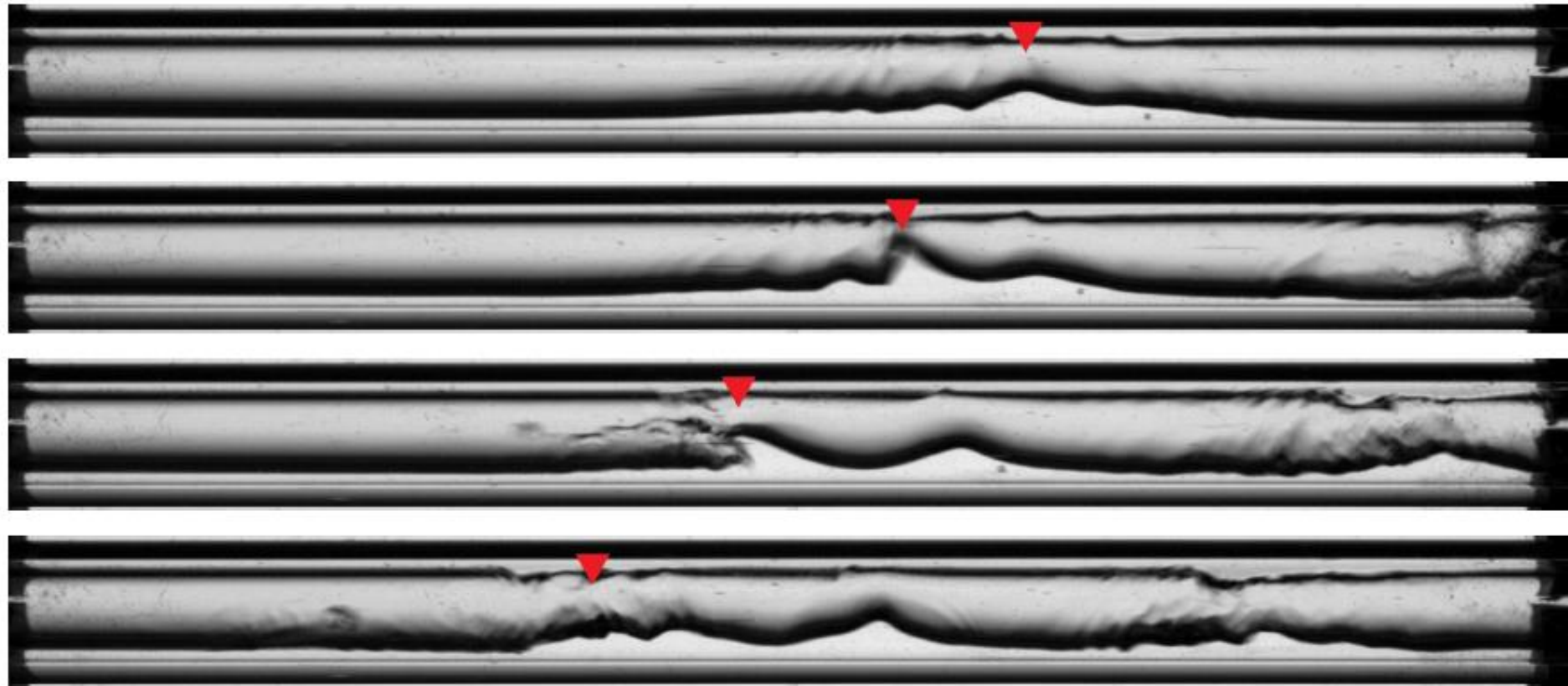
$x = 0,07$

- Apparition des vagues entraînées par la vapeur.
- Plus le titre diminue, plus l'épaisseur du film liquide est importante.

Phase stationnaire : $x = 0,07$

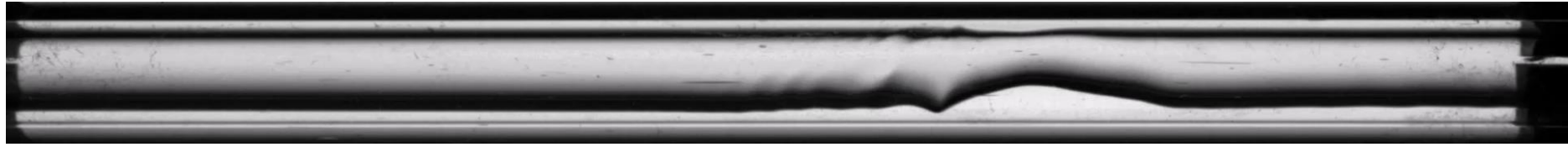
Phase stationnaire : $x = 0,07$

$x = 0,07$

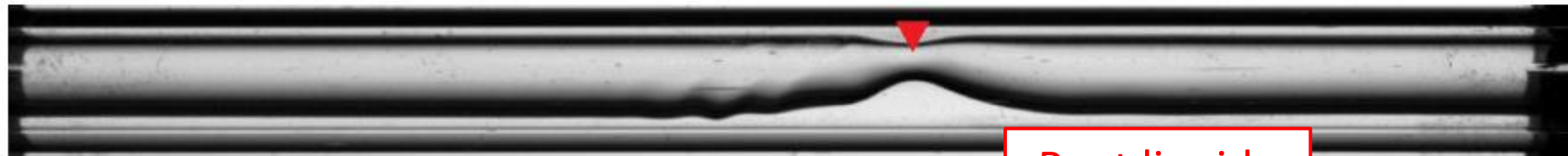


Prédominance des forces de cisaillement

Phase stationnaire : $x = 0,06$



$x = 0,06$



t_0

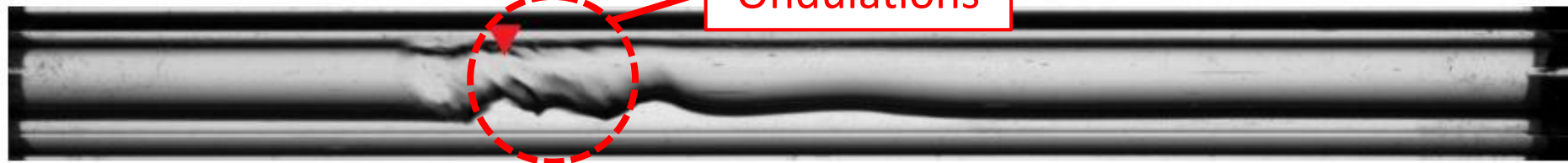


Pont liquide

$t_0 + 5$ ms



$t_0 + 10$ ms

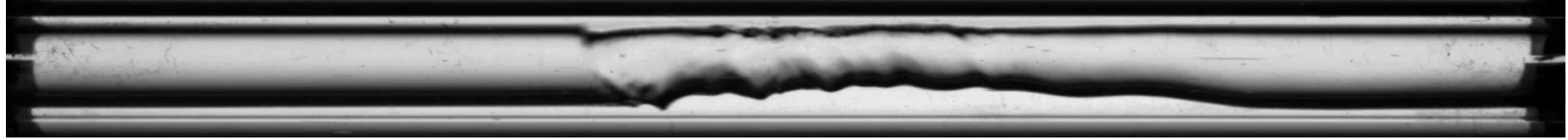


Ondulations

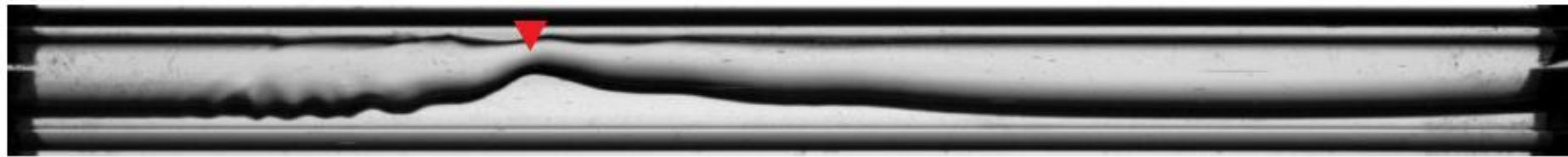
$t_0 + 15$ ms

Compétition entre le cisaillement et la capillarité

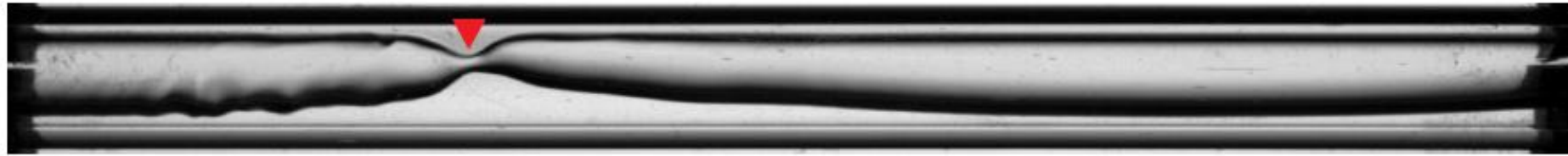
Phase stationnaire : $x = 0,05$



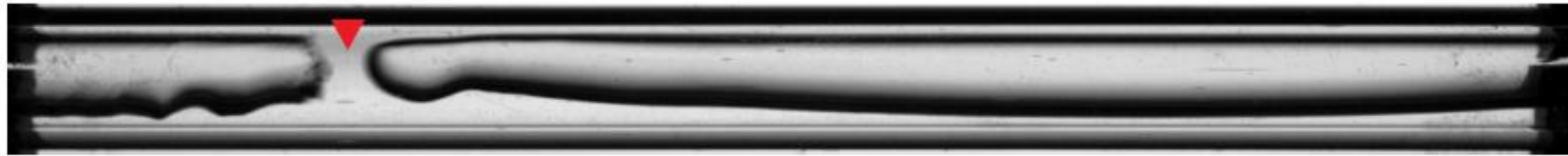
$x = 0,05$



t_0



$t_0 + 5$ ms



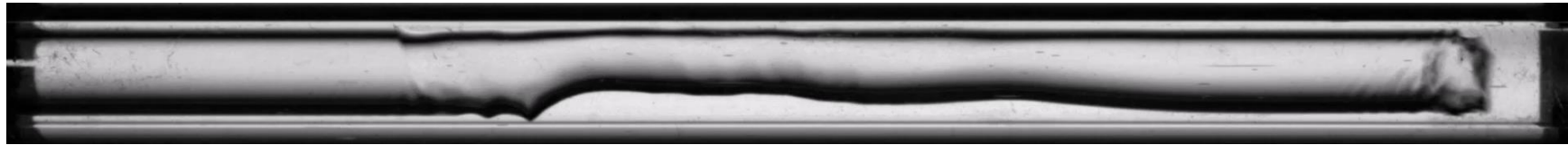
$t_0 + 10$ ms



$t_0 + 15$ ms

Prédominance des forces de capillarité

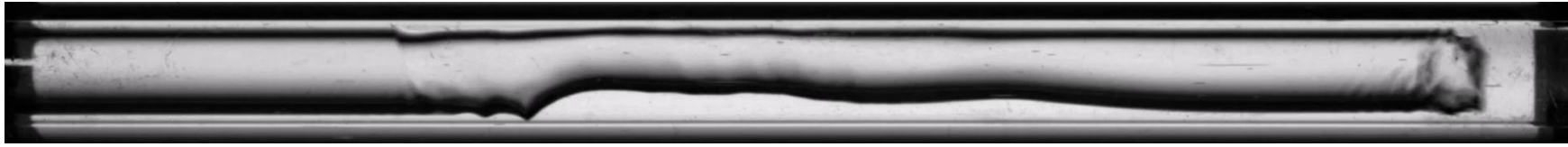
Phase stationnaire : $x < 0,05$



$x = 0,02$

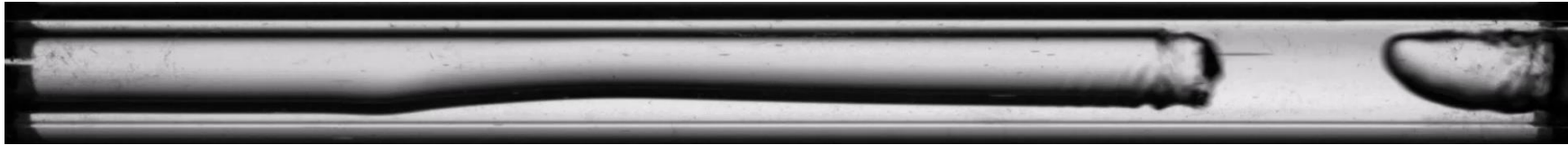
Formation d'un bouchon

Phase stationnaire : $x < 0,05$



$x = 0,02$

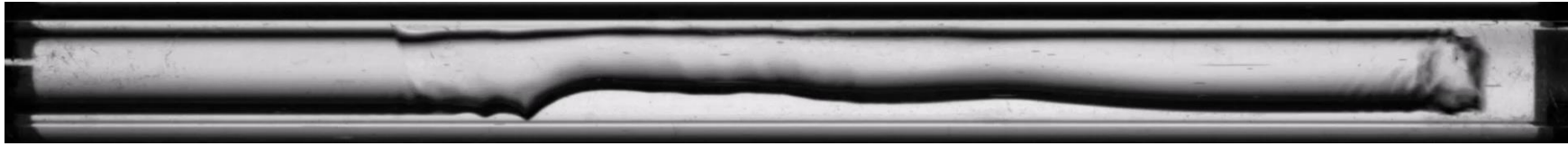
Formation d'un bouchon



$x = 0,01$

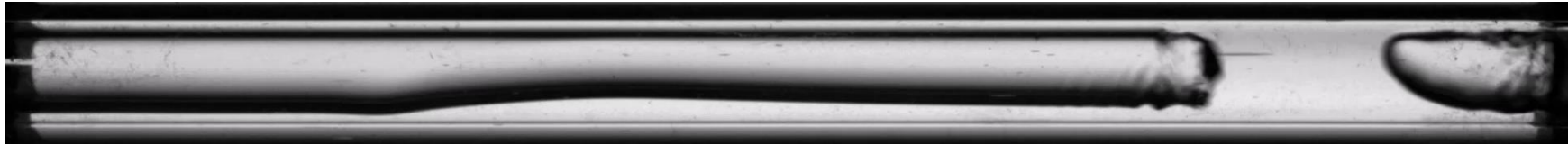
Formation d'une bulle

Phase stationnaire : $x < 0,05$



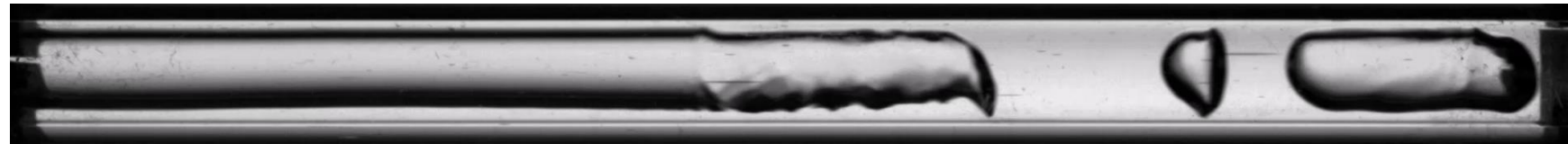
$x = 0,02$

Formation d'un bouchon



$x = 0,01$

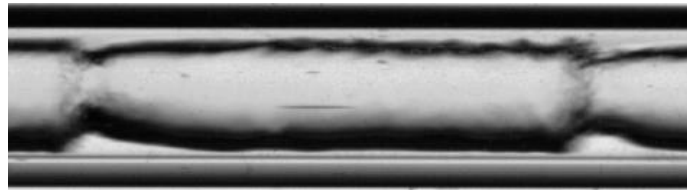
Formation d'une bulle



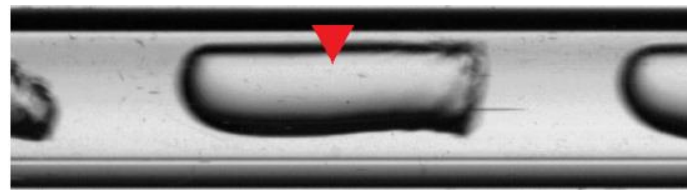
$x = 0,01$

Coexistence des écoulements à poches, à bouchons et à bulles

Cartographie des topologies de l'écoulement



Écoulement annulaire



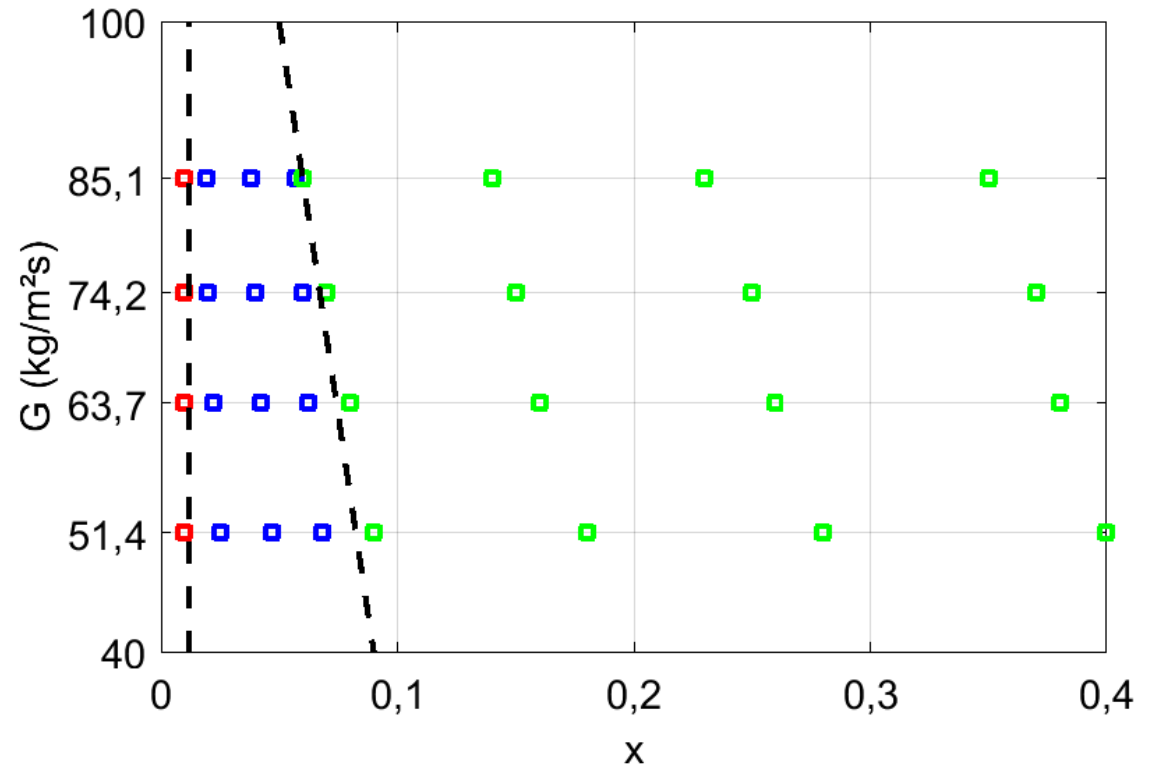
Écoulement à poches



Écoulement à bouchons



Écoulement à bulles

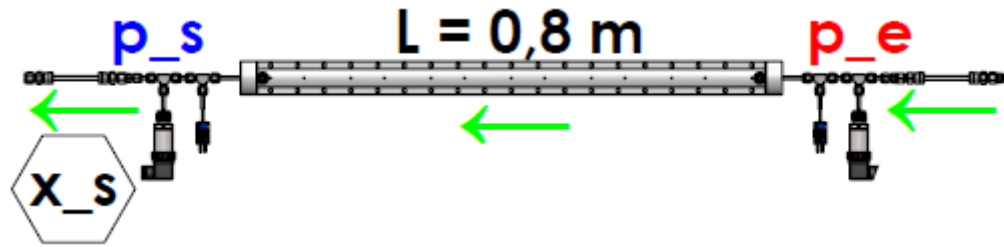


- Topologies de l'écoulement : annulaire, à poches, à bouchons et à bulles.
- Plus le débit de vapeur augmente, la transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches a lieu à un titre de vapeur moins élevé.

QUANTIFICATION DES PERFORMANCES

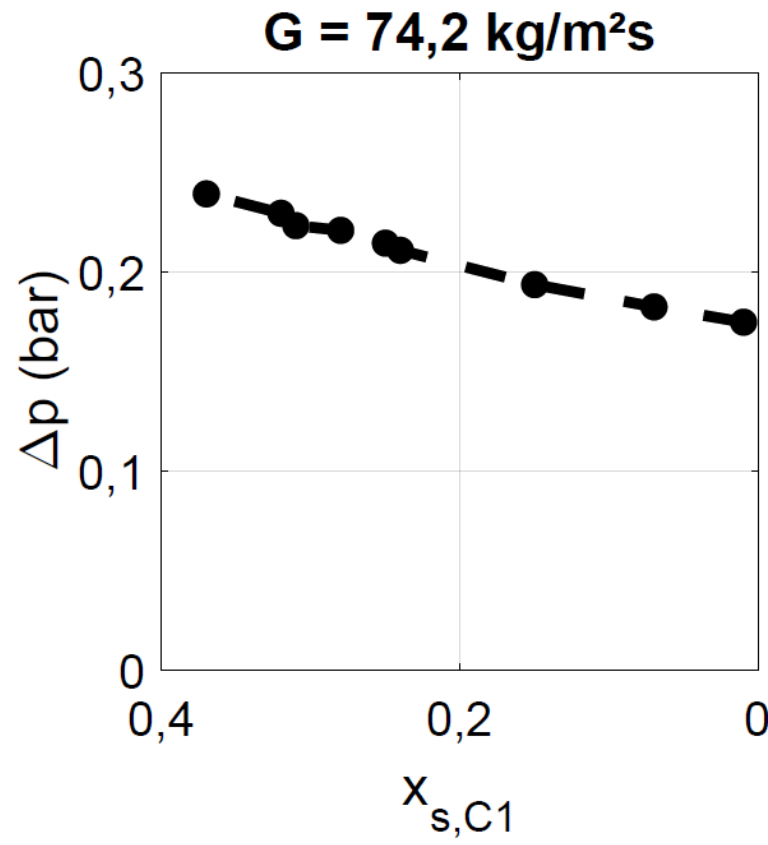
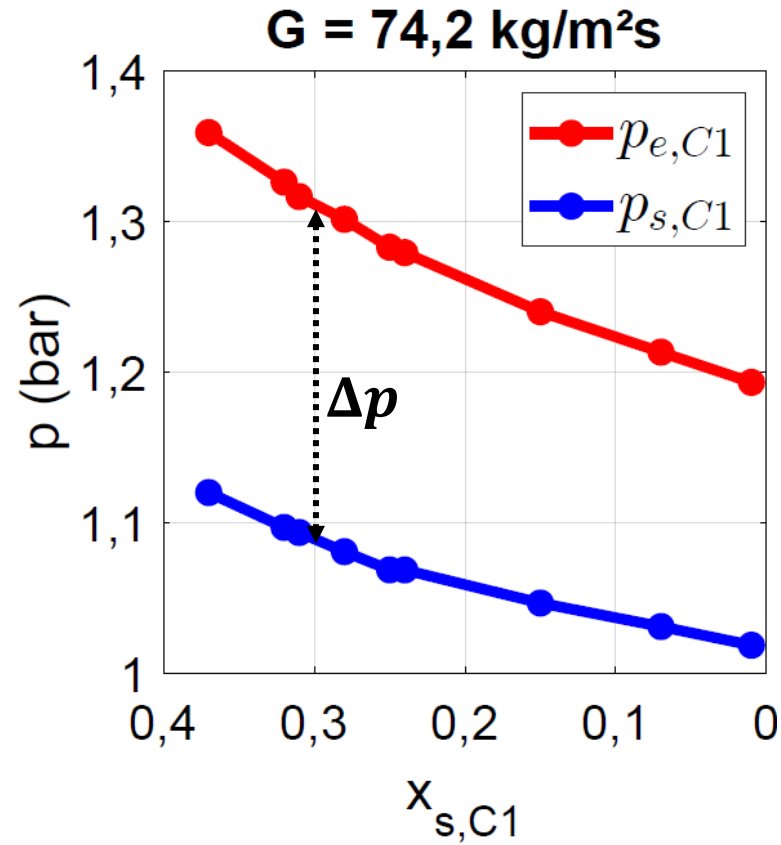
- ❖ Pertes de charge globales Δp
- ❖ Coefficient d'échange local h

Pertes de charge – Cas de référence

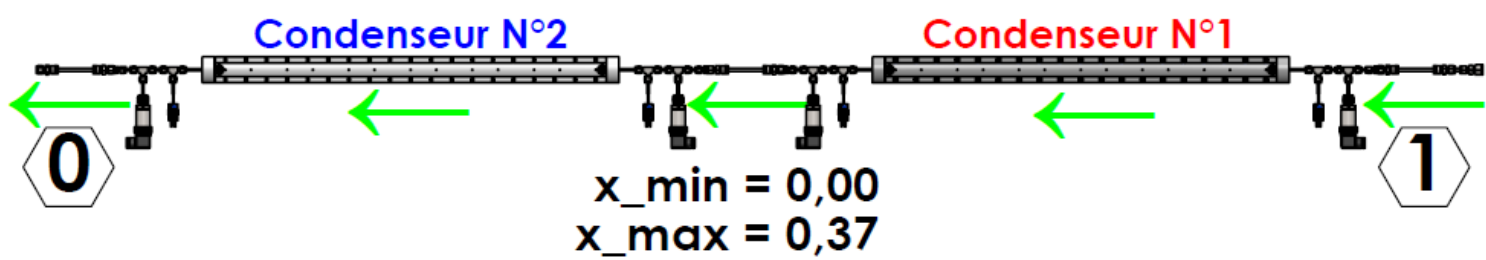


$$\Delta p = p_e - p_s$$

$$X = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

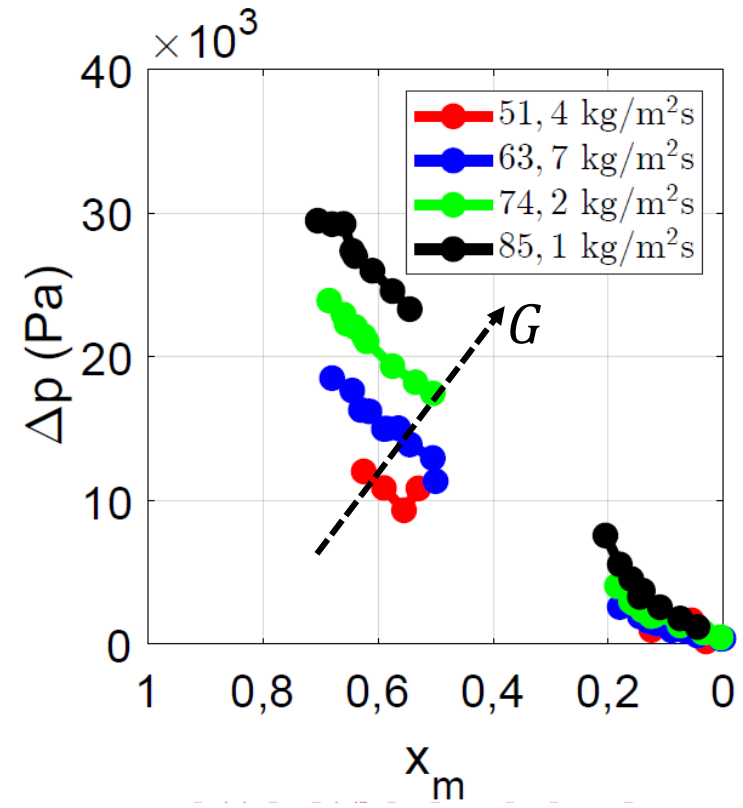
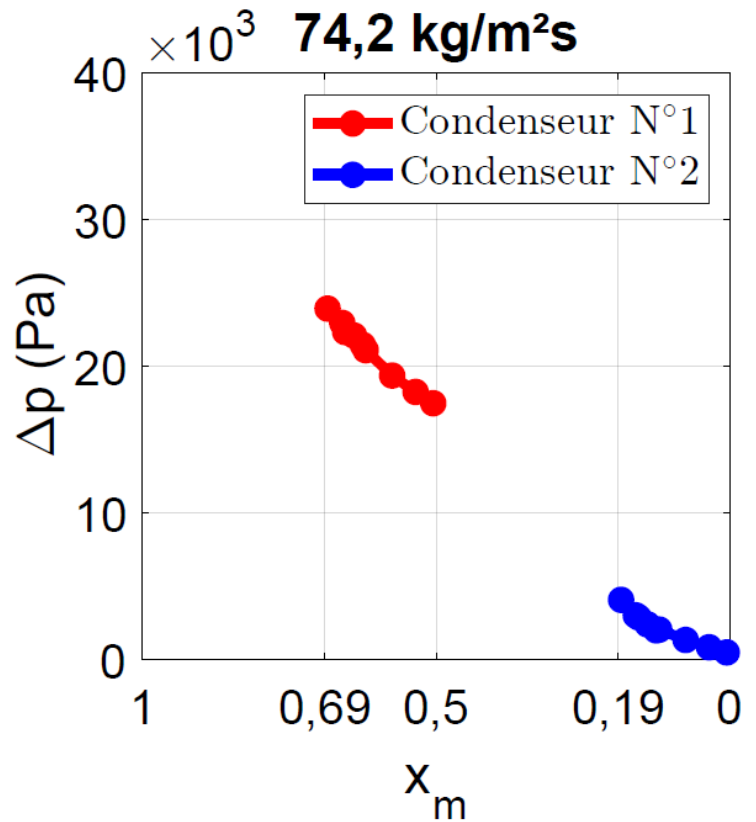


Pertes de charge – Cas de référence



$$\Delta p = p_e - p_s$$

$$x_m = \frac{1}{2} (x_e + x_s)$$



Confrontation aux corrélations empiriques

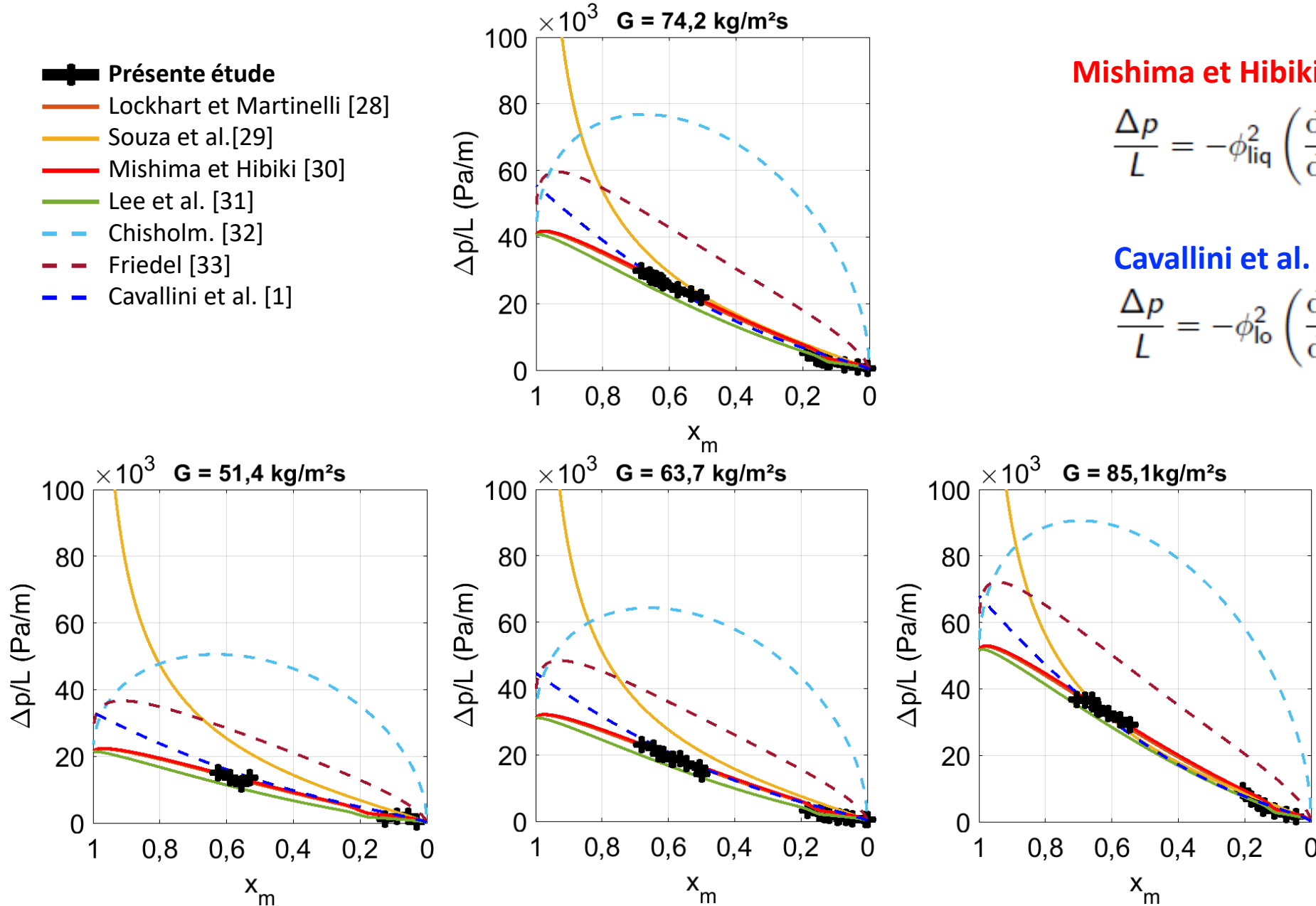
- **Présente étude**
- Lockhart et Martinelli [28]
- Souza et al. [29]
- Mishima et Hibiki [30]
- Lee et al. [31]
- - Chisholm. [32]
- - Friedel [33]
- - Cavallini et al. [1]

Mishima et Hibiki [30]

$$\frac{\Delta p}{L} = -\phi_{liq}^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{liq}$$

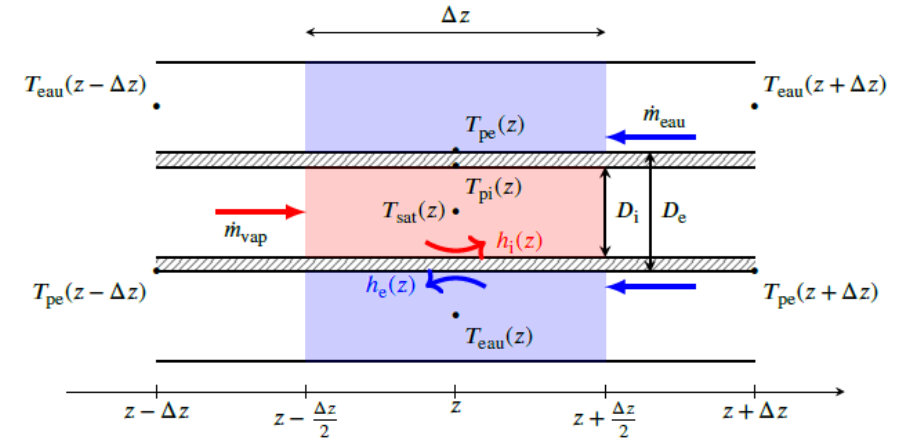
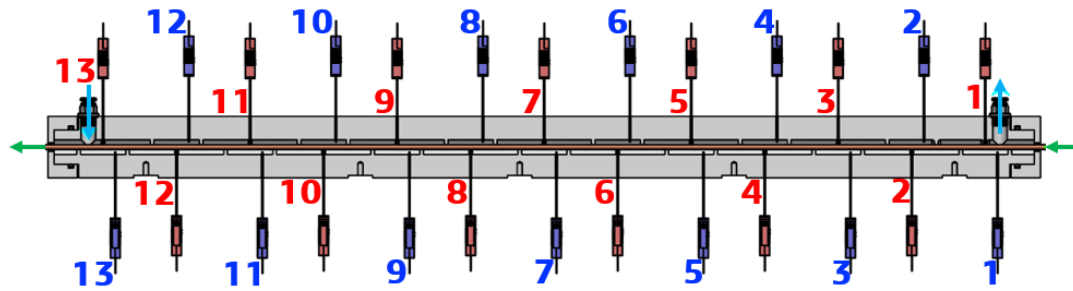
Cavallini et al. [34]

$$\frac{\Delta p}{L} = -\phi_{lo}^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{lo}$$

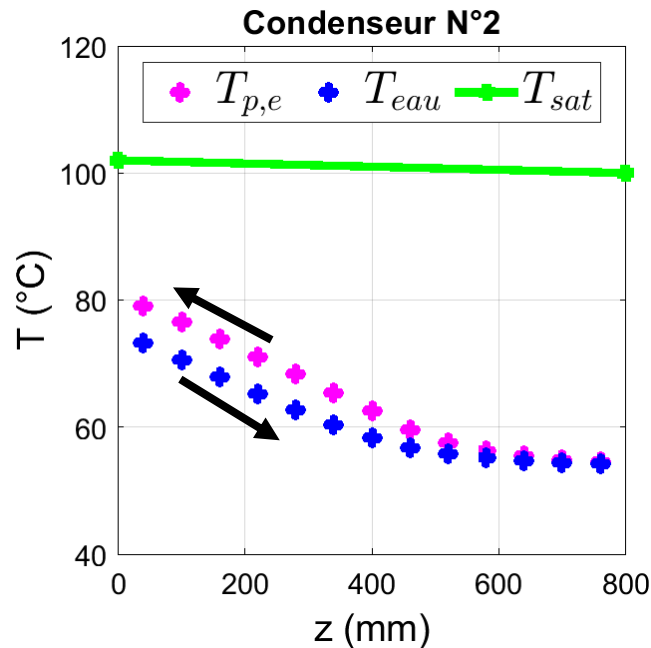
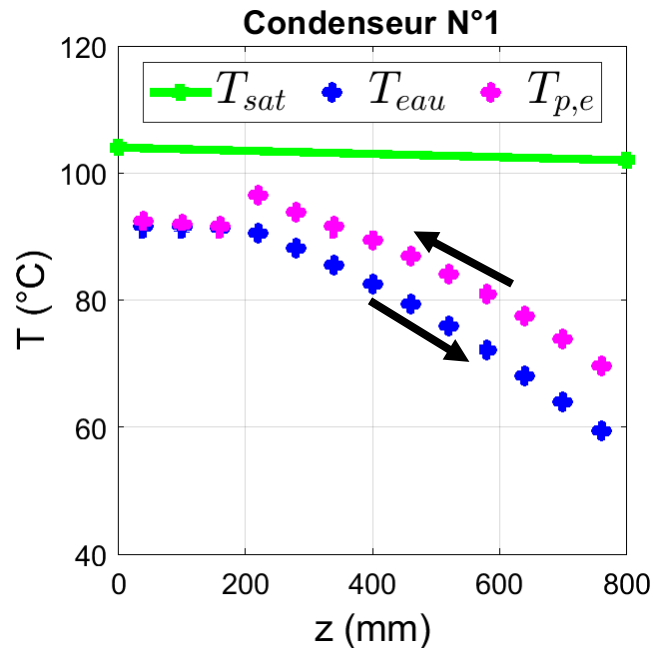


Coefficient d'échange local – Cas de référence

Cas de référence : $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_R = 100 \text{ °C}$



Modèle d'analyse



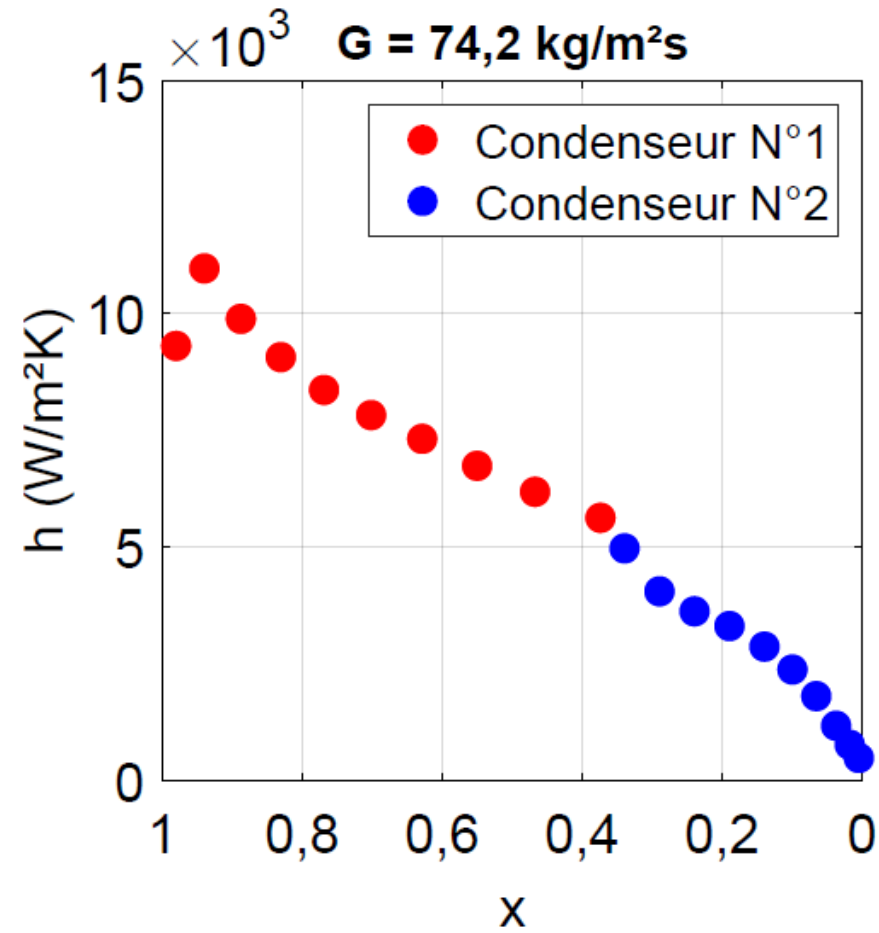
$$\dot{Q}_e(z) = \dot{m}_e c_{p,e} \left[T_e(z - \frac{\Delta z}{2}) - T_e(z + \frac{\Delta z}{2}) \right]$$

$$h_i(z) = \frac{\dot{Q}_e(z)}{\pi D_i \Delta z [T_{sat}(z) - T_{pi}(z)]}$$

$$x(z) = x(z - \frac{\Delta z}{2}) - \frac{\dot{Q}_e(z)}{2 \dot{m}_v L_v}$$

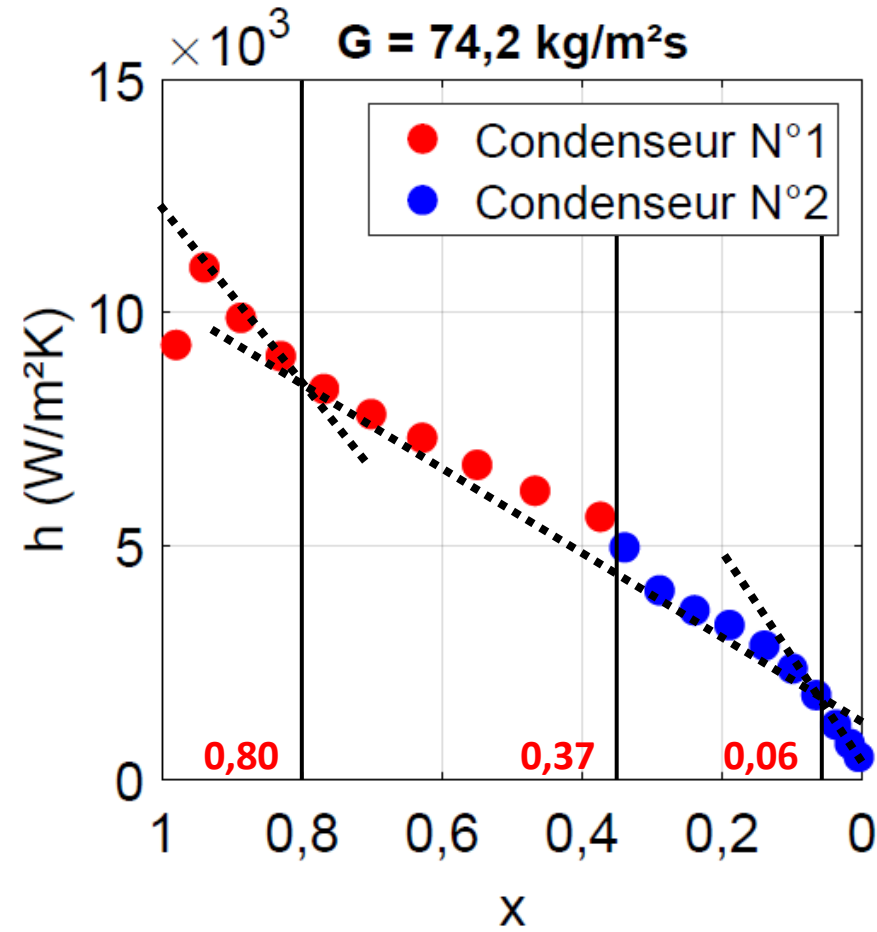
Coefficient d'échange local – Cas de référence

Incertitudes < 10%



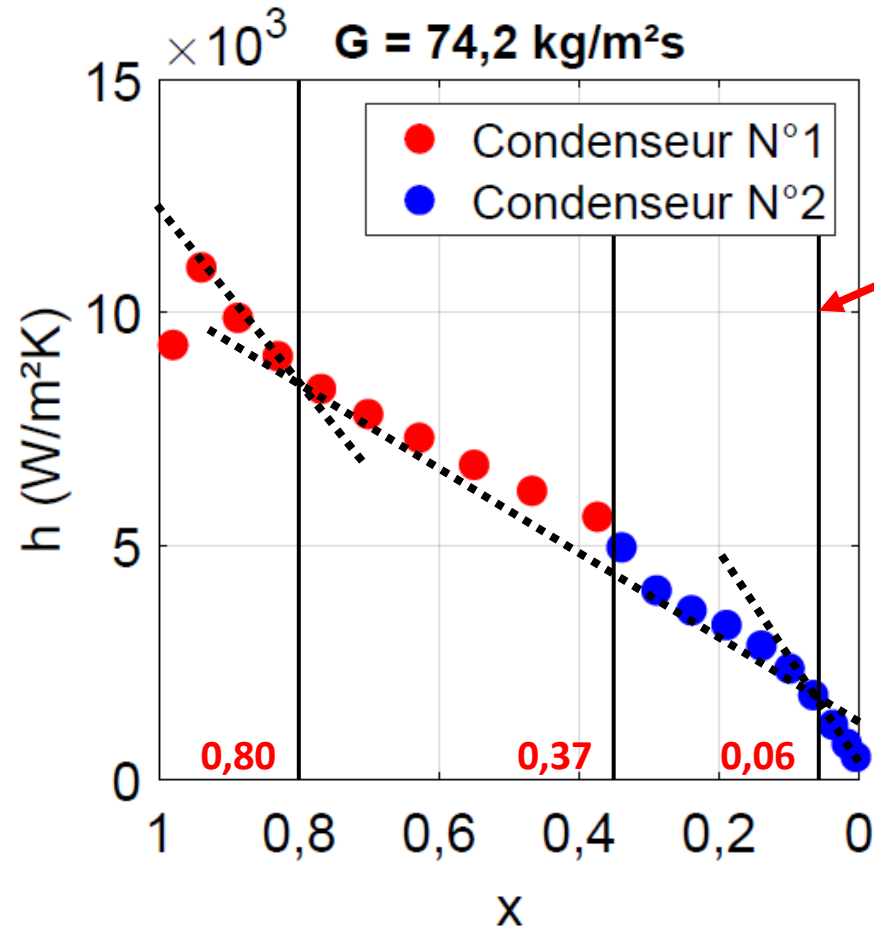
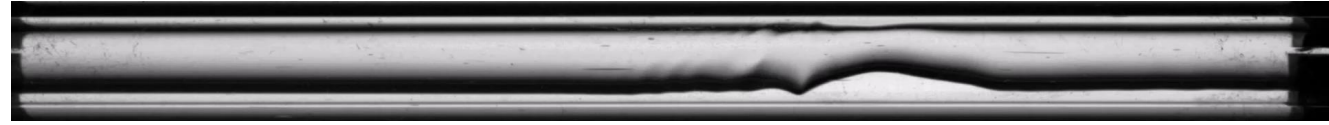
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



Coefficient d'échange – Cas de référence

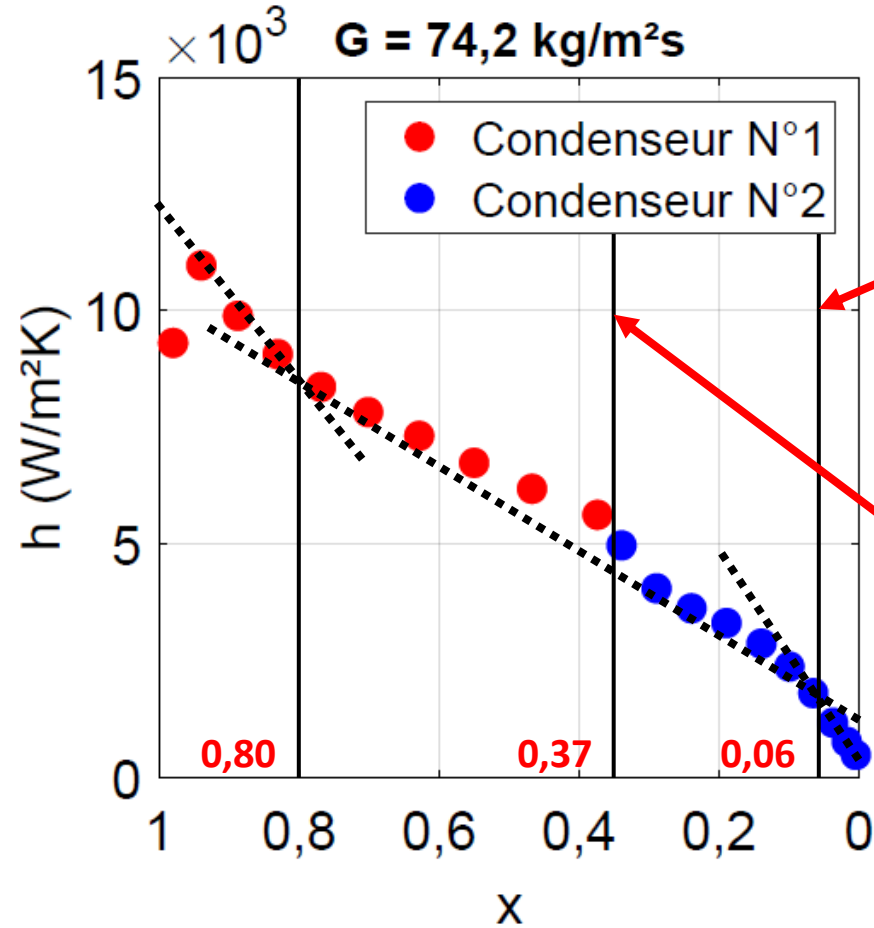
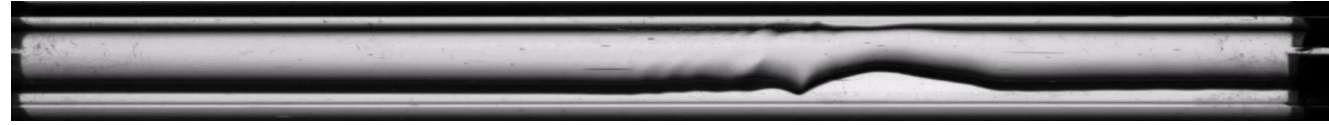
Incertitudes < 10%



$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

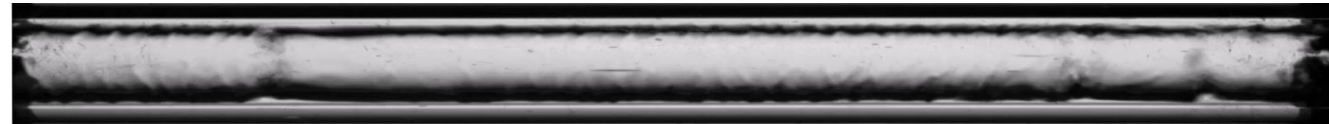
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



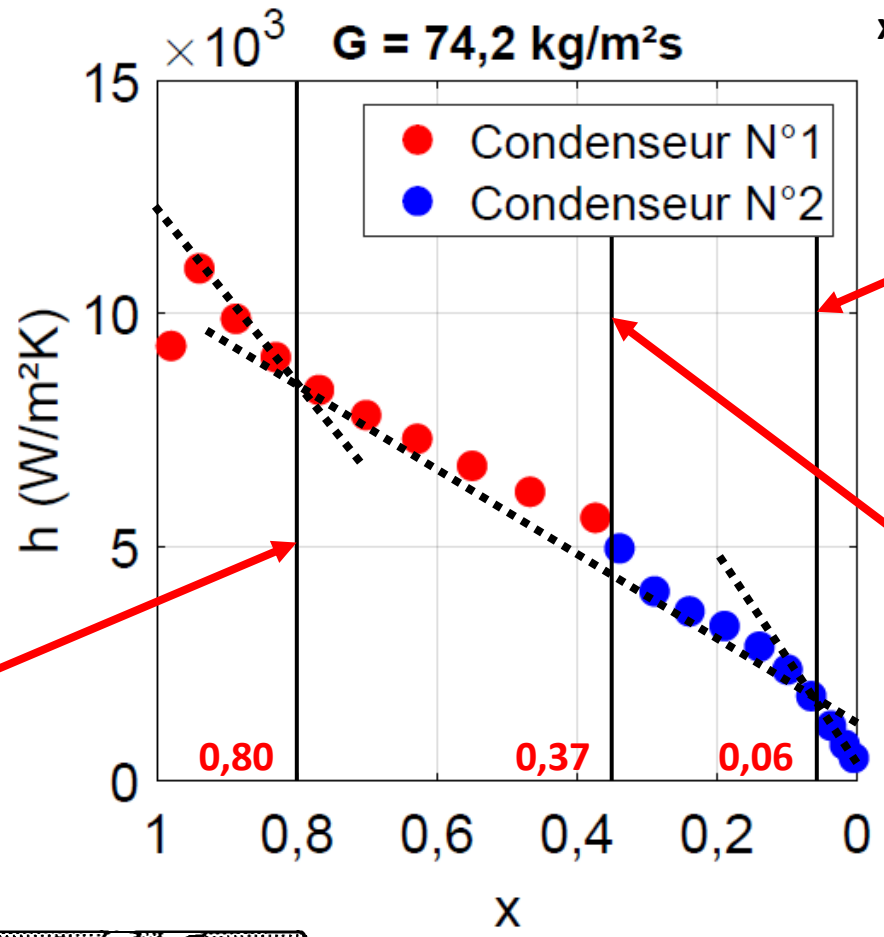
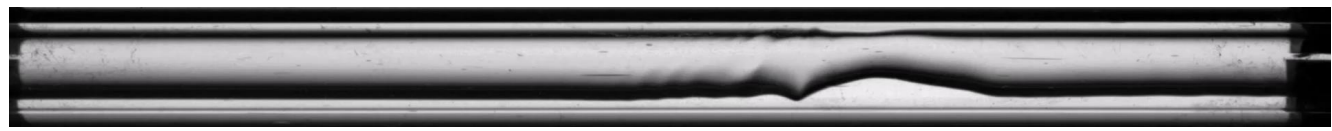
$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

$x = 0,37$: écoulement annulaire



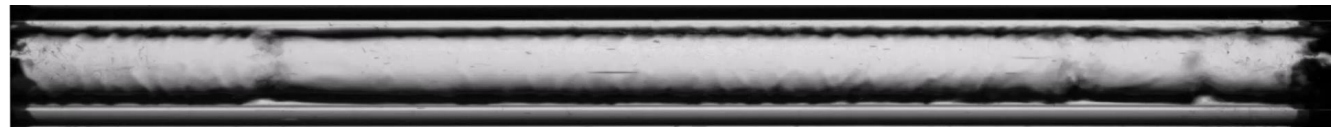
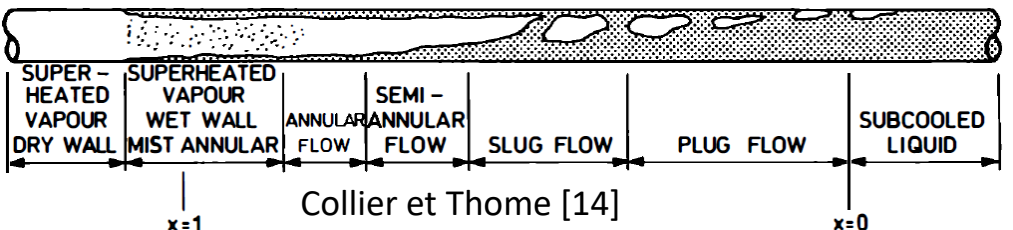
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



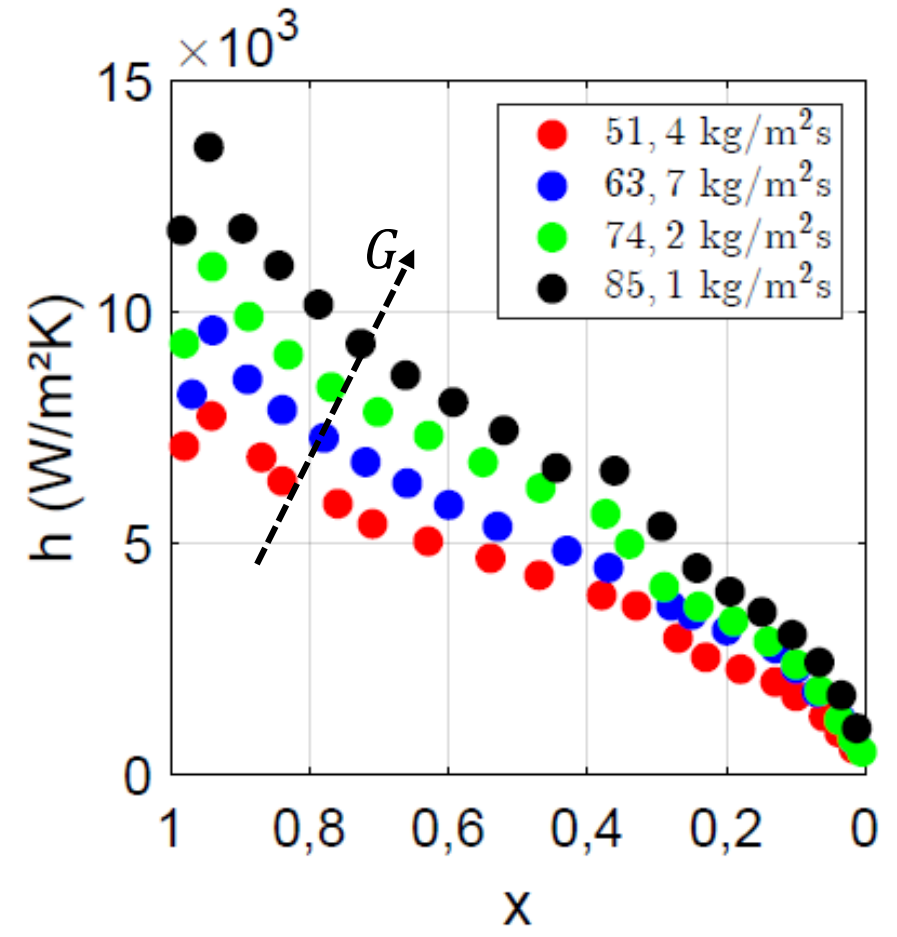
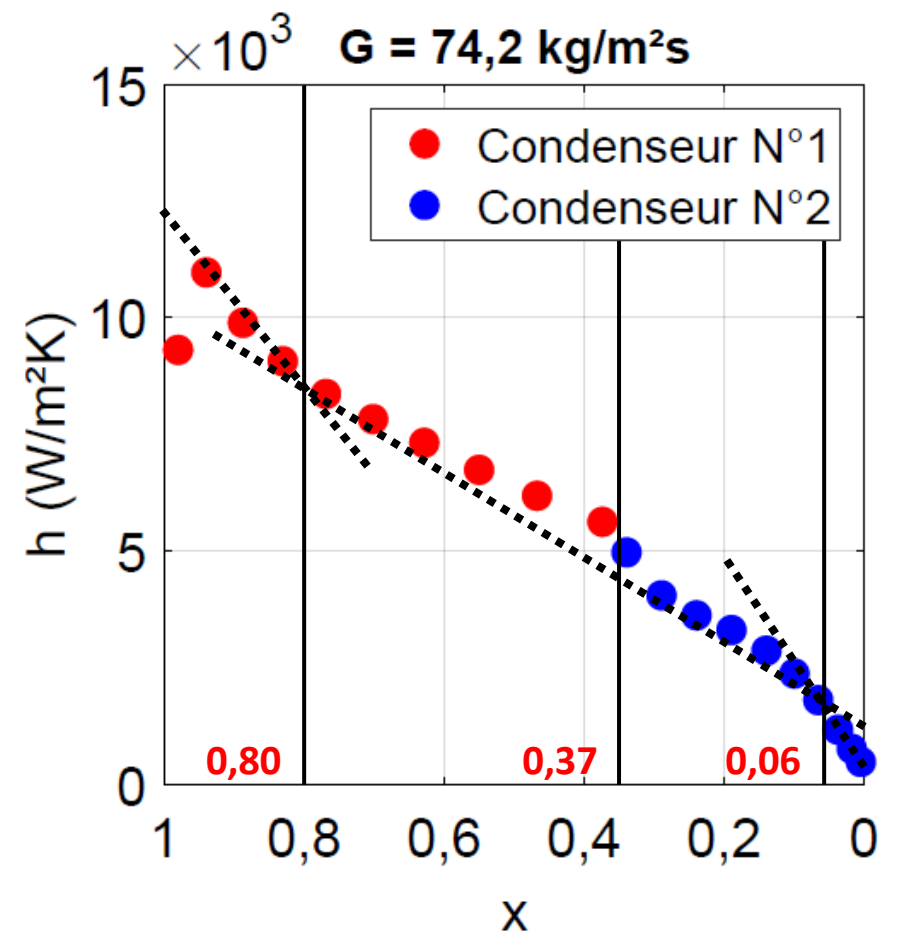
$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

Écoulement à brouillard



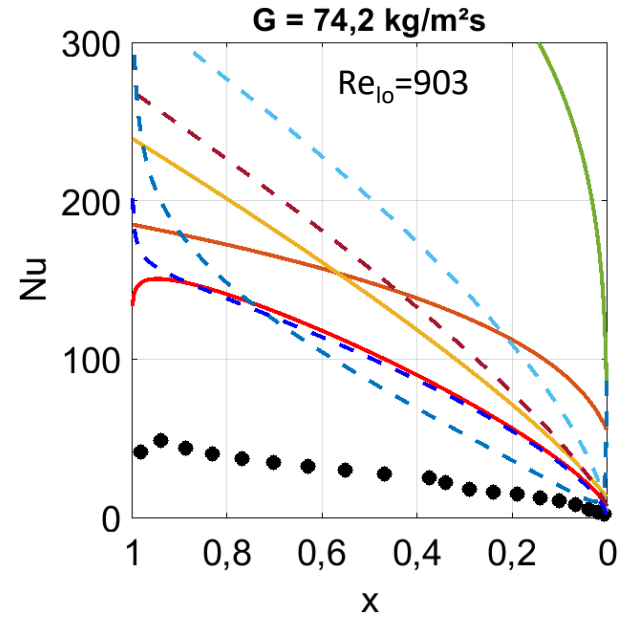
$x = 0,37$: écoulement annulaire

Coefficient d'échange – Cas de référence



Confrontation aux corrélations empiriques

- **Présente étude**
- Akers et al. [34]
- Cavallini et Zecchin [1]
- Shah [35]
- Bohdal et al. [9]
- - Haraguchi et al. [2]
- - Dobson et Chato [3]
- - Koyama et al. [36]
- - Huang et al. [37]



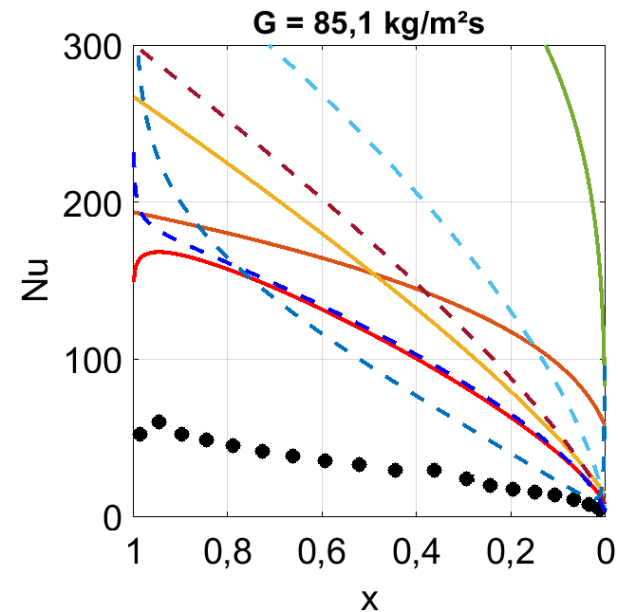
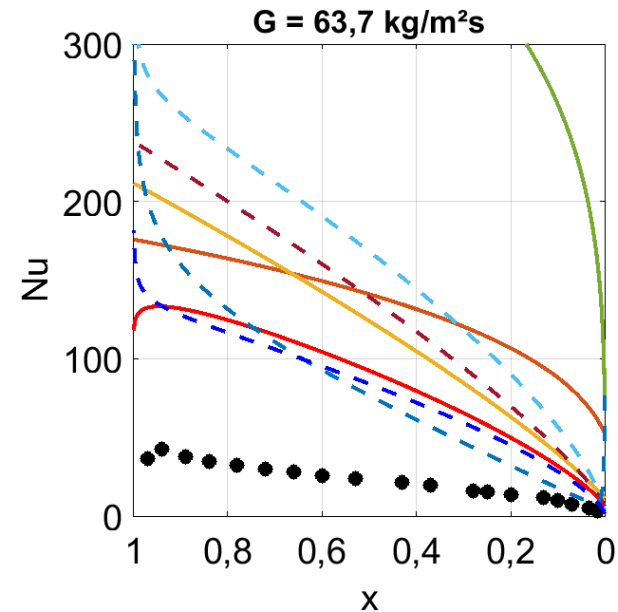
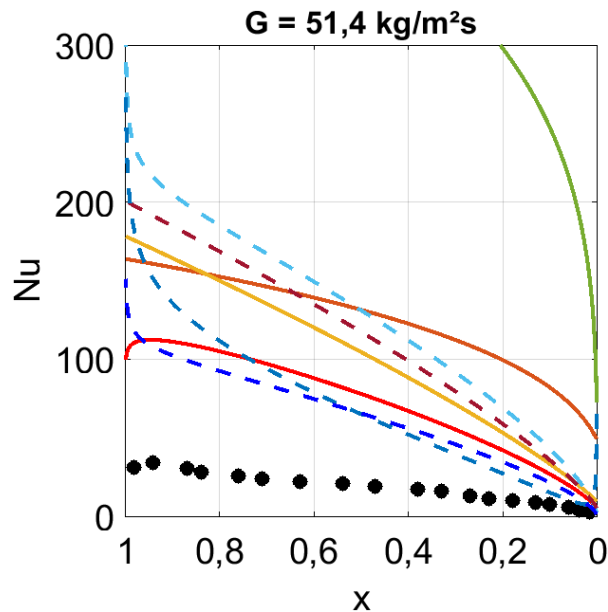
Shah [35]

$$\frac{hD_h}{\lambda_{liq}} = 0,023Re_{lo}^{0,8}Pr_{liq}^{0,4} \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8x^{0,76}(1-x)^{0,04}}{\rho_r^{0,38}} \right]$$

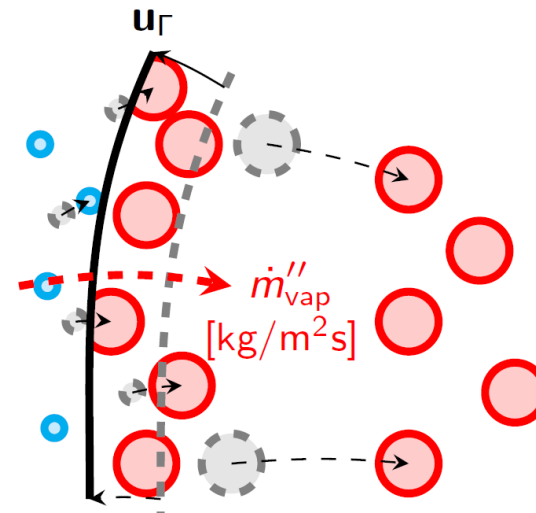
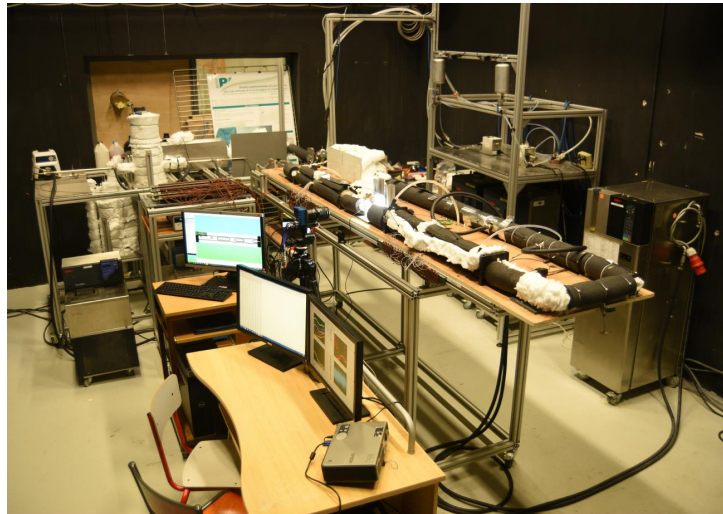
Huang et al. [37] (type Martinelli)

$$\frac{hD_h}{\lambda_{liq}} = 0,0152Re_{liq}^{0,77} \left(-0,33 + 0,83Pr_{liq}^{0,8} \right) \left(\frac{\phi_{vap}}{X_{tt}} \right)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_{vap}}{\rho_{liq}} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_{liq}}{\mu_{vap}} \right)^{0,1}$$



CONCLUSION & PERSPECTIVES

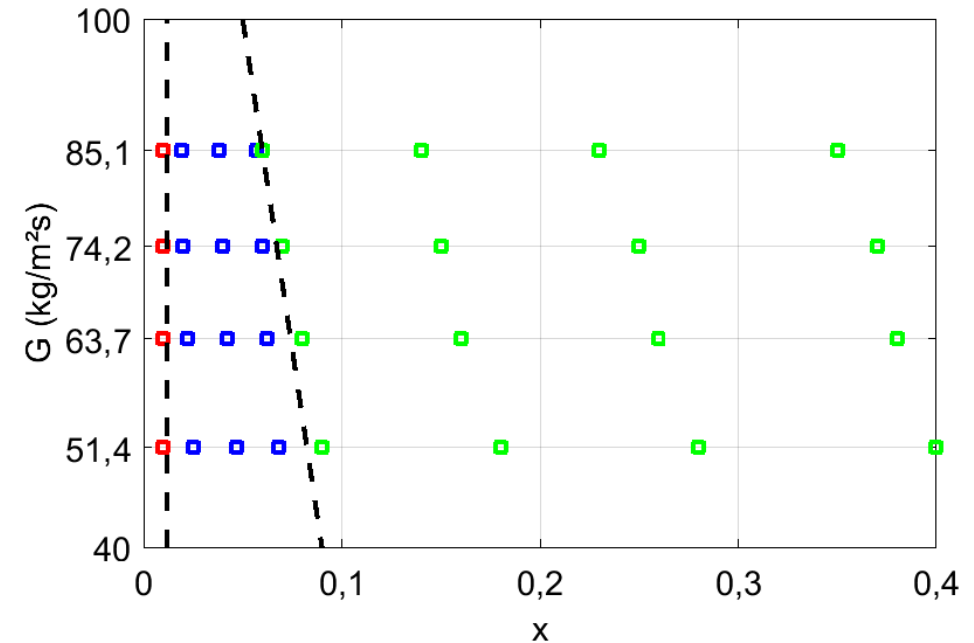
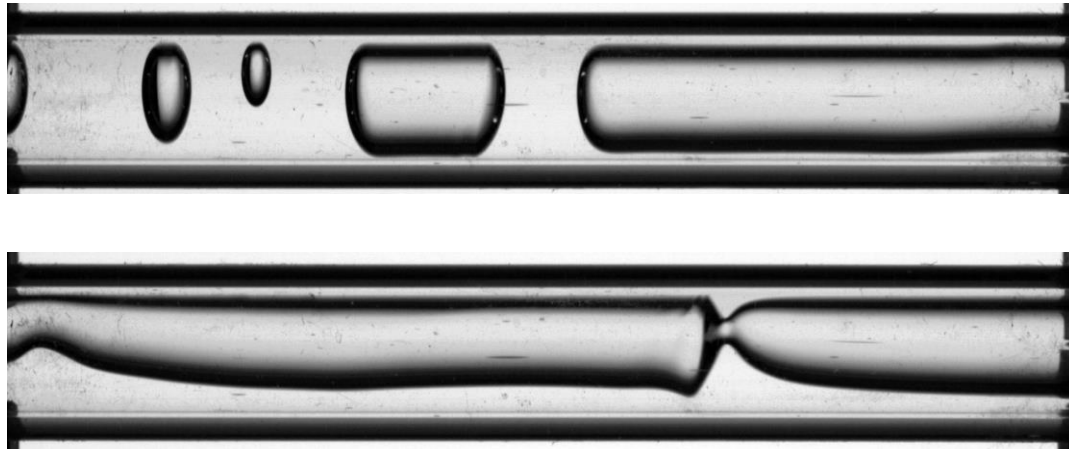


Conclusion

R1 - Identification des topologies de l'écoulement

Visualisation expérimentale

- Topologies d'écoulement : annulaire, poches, bouchons et bulles
- Compétition entre le cisaillement et la capillarité → pont liquide → transition des régimes
- Quantification en fonction du titre de vapeur
- Base de données ...

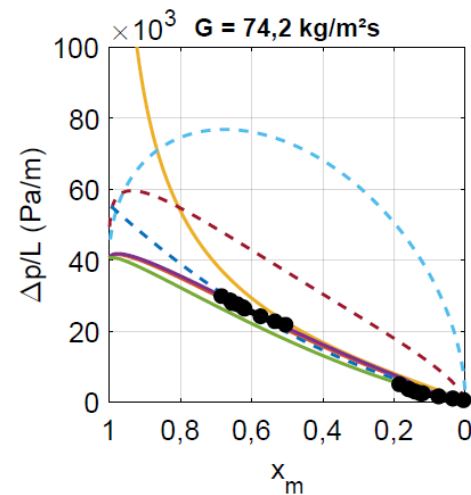
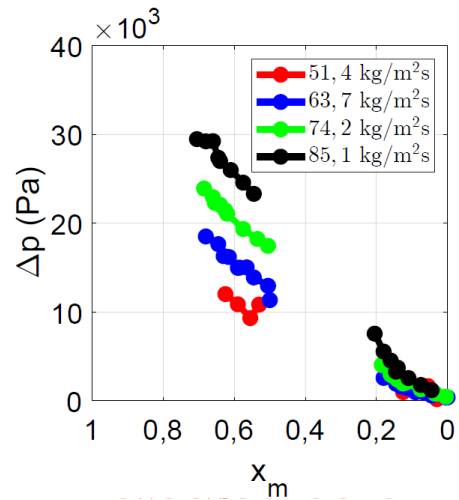


Conclusion

R2 – Evaluation des performances « hydrauliques » et « thermiques »

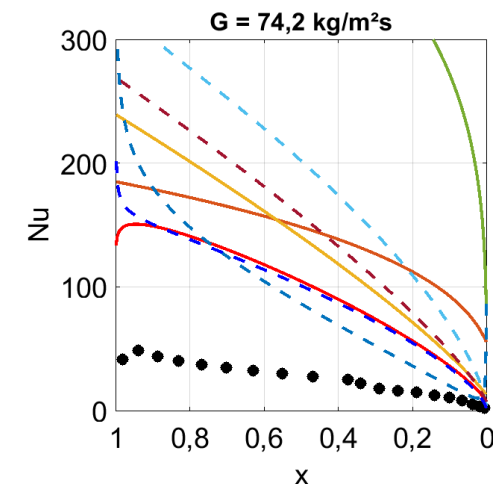
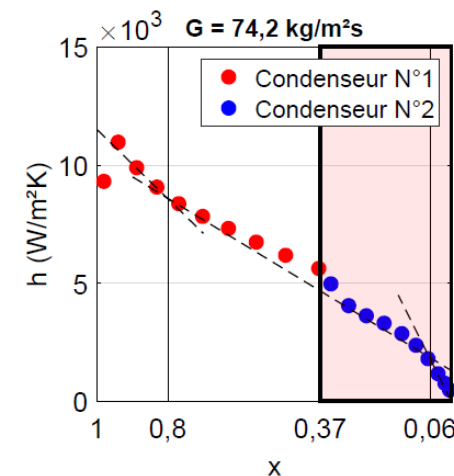
Pertes de charge globales

- Fonction décroissante avec titre de vapeur **moyen**
- En bon accord avec les corrélations empiriques



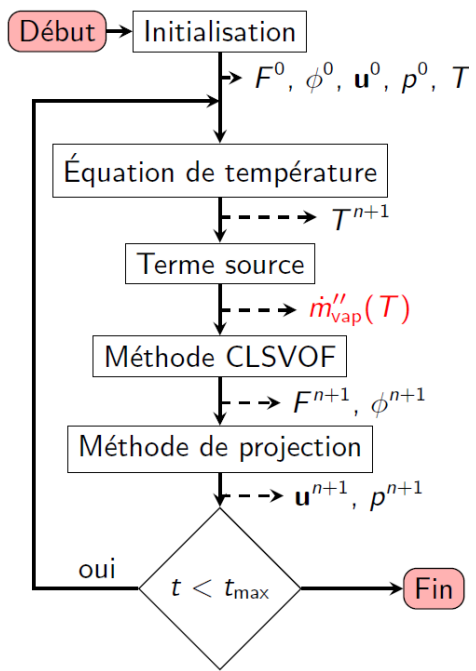
Coefficient d'échange local

- Fonction décroissante avec titre de vapeur **local**
- Changement des pentes dû à la transition des topologies de l'écoulement
- Surestimation par les corrélations empiriques importantes : régime à faible débit massique surfacique

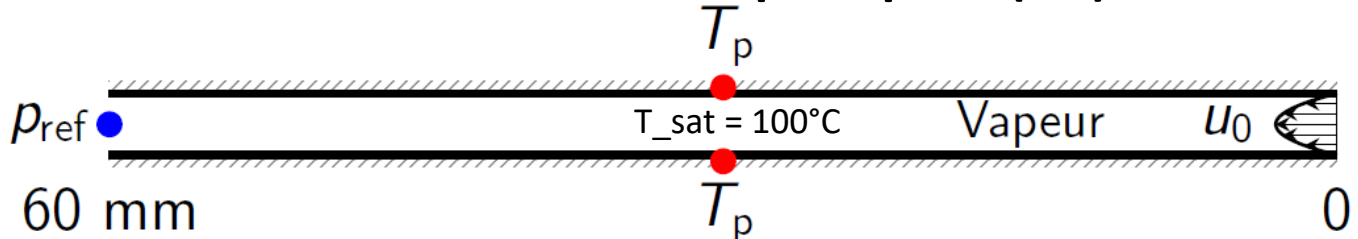


Perspectives

Approche numérique : Développement d'un outil numérique de type VOF (Volum of Fluid) = code maison DFMVOF .../... → thèse à venir ...

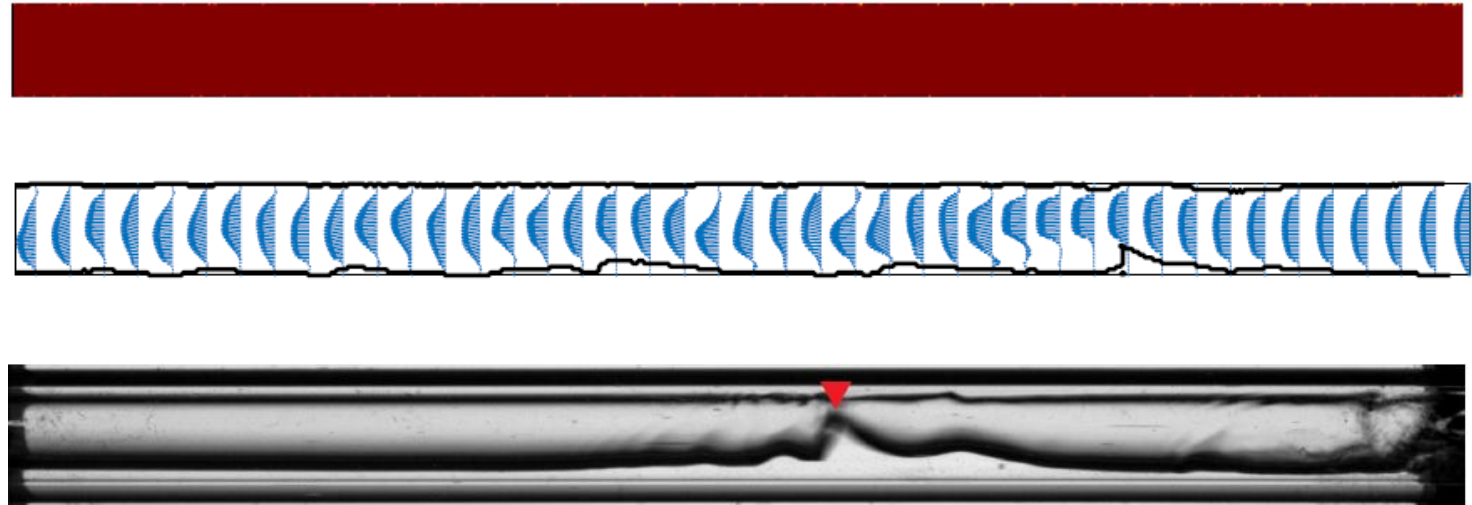


Condensation de la vapeur pure (2D)



- $u_0 = 1,5 \text{ m/s}$
- $T_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maillage : 30×600 , $\Delta t = 1 \mu\text{s}$
- Temps de calcul : ≈ 3 semaines

Paramètres	Valeur
$\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{vap}}$	$957,9 \text{ kg/m}^3 - 0,5978 \text{ kg/m}^3$
$\mu_{\text{liq}} - \mu_{\text{vap}}$	$0,282 \times 10^{-3} \text{ kg/ms} - 1,227 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$
σ	$0,059 \text{ N/m}$
$\lambda_{\text{liq}} - \lambda_{\text{vap}}$	$0,679 \text{ W/mK} - 0,0251 \text{ W/mK}$
$c_{p,\text{liq}} - c_{p,\text{vap}}$	$4217 \text{ J/kgK} - 2029 \text{ J/kgK}$
L_{vap}	$2,257 \times 10^6 \text{ J/kg}$





SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE
Groupe thématique « ECHANGEURS »

Journée thématique – Jeudi 26 janvier 2023

*Échangeurs thermiques et multi-fonctionnels :
récents développements et perspectives*



Etude expérimentale d'un échangeur à condensation à mini-canaux

Nam LE, Dominique COUTON*, Matthieu FENOT, Frédéric PLOURDE

*Institut P' (UPR CNRS 3346) – Dépt. FTC – Equipe COST (Convection,
Optimisation, Systèmes Thermiques)*



MERCI DE VOTRE ATTENTION !



New/Advanced Hybrid Heat Recovery Systems with Integrated Vortex Generators - Numerical and Parametric Studies

January 26, 2023

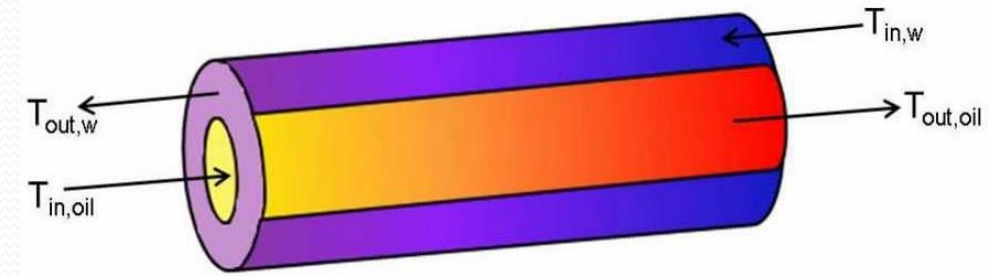
PhD student: Rima Al Aridi

Director: Dr. Thierry Lemenand

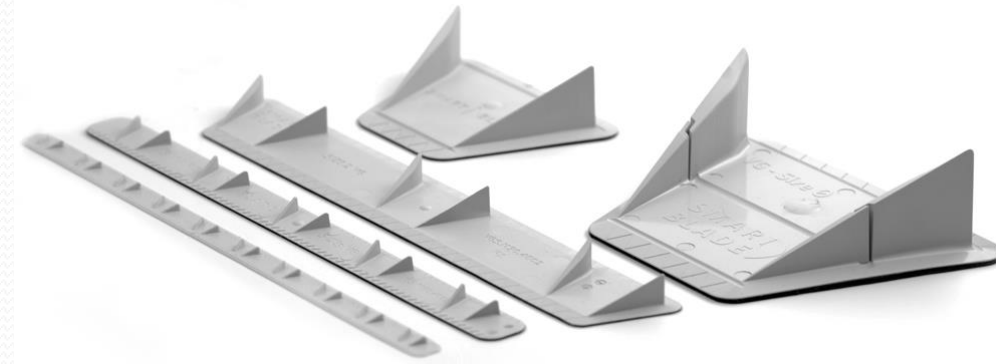
Co-director: Dr. Mahmoud Khaled

Supervisor: Dr. Samer Ali

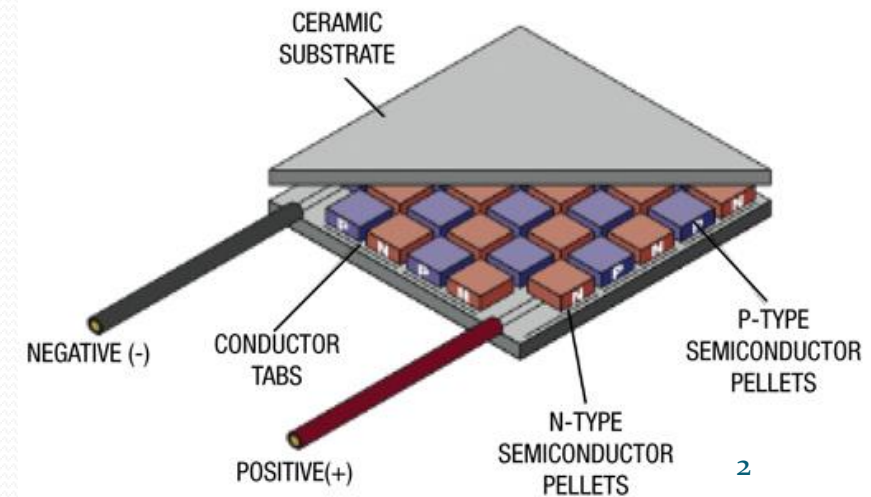
Concentric Tube Heat Exchanger



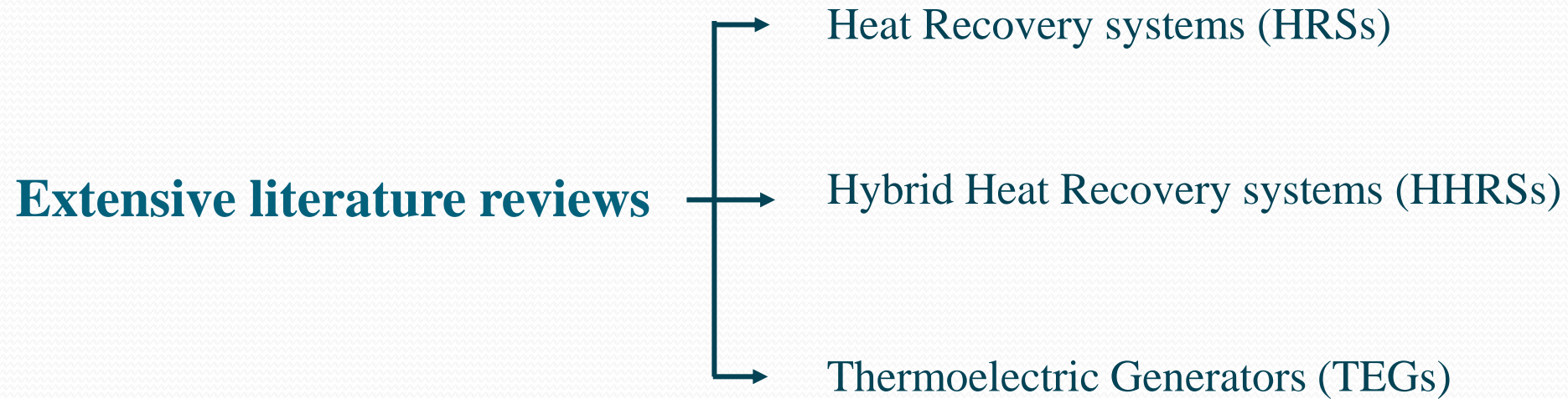
Vortex Generators



Thermoelectric Generators



Context and PhD objectives



Context and PhD objectives

Numerical Studies

- Suggesting a new design for heat recovery system with Vortex Generators (VGs).
- Performing numerical and parametric studies on four different cases of the presented design using Ansys Fluent.
- Applying the design on a heat recovery application to study its economical, environmental, and social impacts using the openLCA software.
- Replacing the VGs in the best design we obtain by TEGs.
- Replacing the tube of the concentric tube heat exchanger by a flexible TEG.

Context and PhD objectives

Objectives

- Tremendous literature reviews on Energy Recovery Systems.
- Effect of vortex generators on heat transfer, to define the enhancement of heat transfer that VGs offer.
- Employing TEGs as VGs in CTHE of the optimal design, to study the power generation TEG may generate.

1. Energy recovery in air conditioning systems: Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis and Potential Recommendations.

Rima Aridi, Jalal Faraj, Samer Ali, Mostafa Gad El-Rab, Thierry Lemenand, and Mahmoud khaled Energies, vol. 14, no. 18, p. 5869, 2021.



- Heat Recovery systems are must in all applications

2. A Comprehensive Review on Hybrid Heat Recovery Systems: Classifications, Applications, Pros and Cons, and New Systems.

Rima Aridi, Jalal Faraj, Samer Ali, Thierry Lemenand, and Mahmoud khaled, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 167, p 112669, 2022. Impact factor: 14,985 Rank 1 out of 44



- Hybrid Heat Recovery Systems are highly used especially with TEG

3. Thermoelectric Generators for Power Generation: Applications, Heat Recovery Methods, and Challenges.

Rima Aridi, Jalal Faraj, Samer Ali, Thierry Lemenand, and Mahmoud khaled, Electricity, vol.2, no. 3, pp. 359-386, 2021



- TEG is promising
- TEG was mainly used with HE

Energy Recovery Systems

Heat
Recovery
System



Hybrid Heat Recovery Systems

TEGs in
HHRS



TEG in
Heat
Exchangers

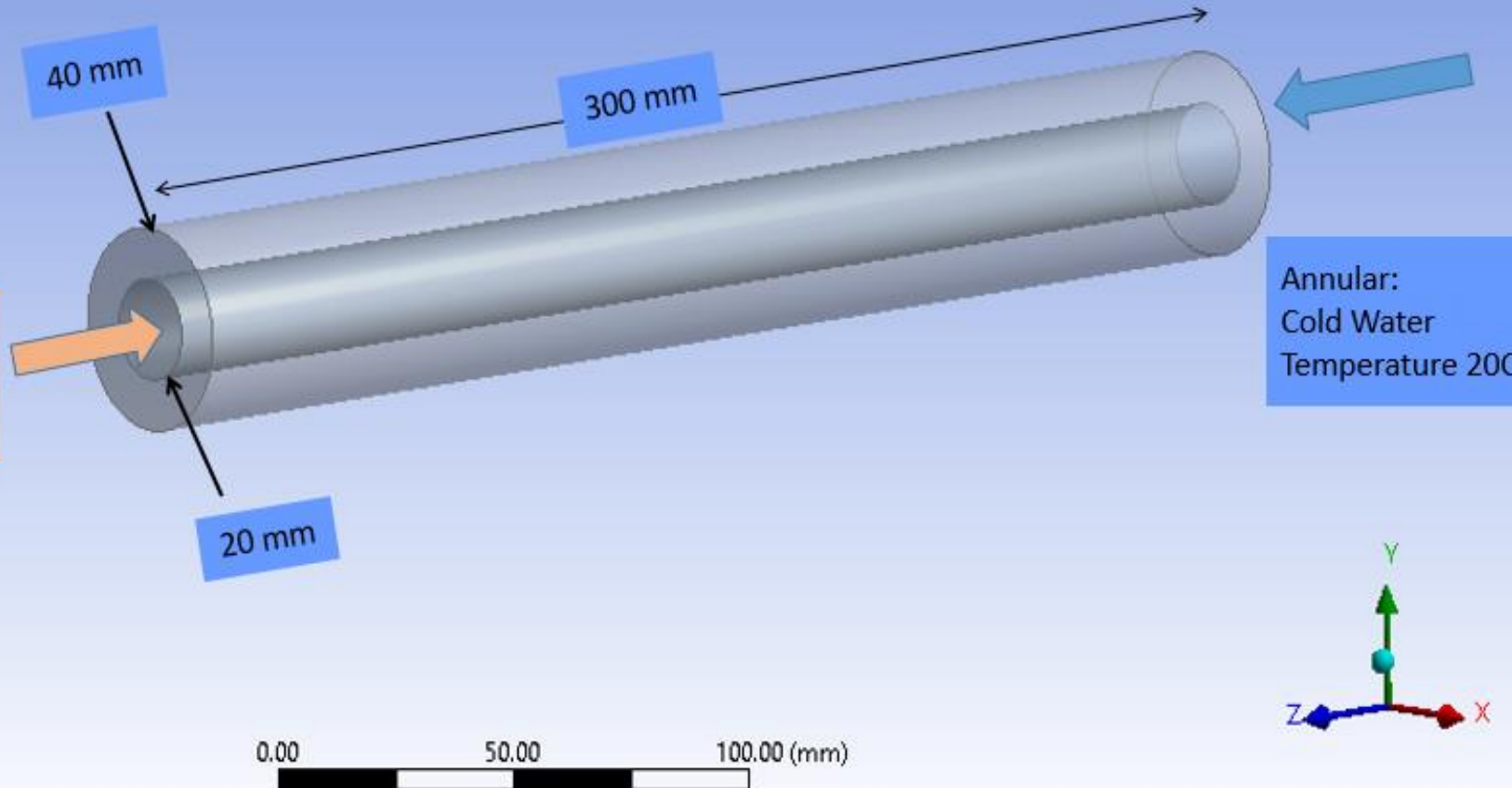


Thermoelectric Generators

TEGs
favorable
advantages

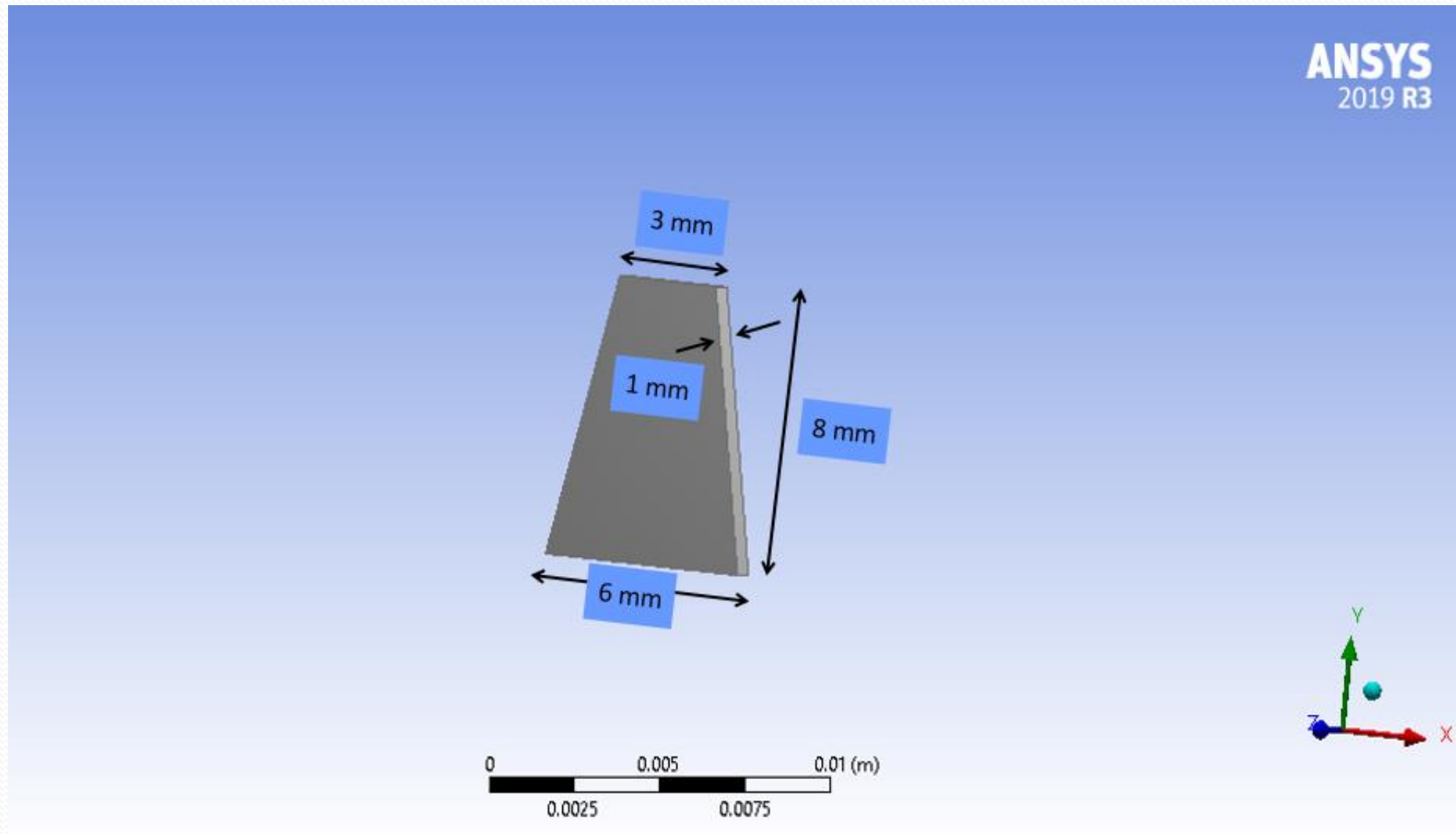
Numerical Achievements

ANSYS
2019 R3



Concentric Tube Heat Exchanger design

Numerical Achievements



VG design

Numerical Achievements

Case 0:



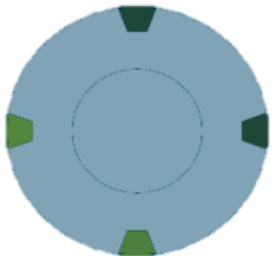
Case 1:



Case 2:



Case 3:



30°

Four different cases under study

Reynolds Number (Re)

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu}$$

ρ is the density of the fluid (kg/m^3)

L is the linear dimension (m)

ν is the kinematic viscosity of the fluid (m^2/s)

u is the velocity of the fluid (m/s)

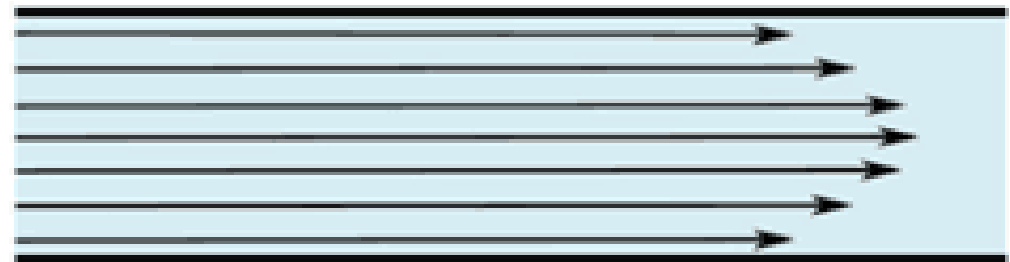
μ is the dynamic viscosity of the fluid $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$

$Re < 2000$ the flow is said to be laminar

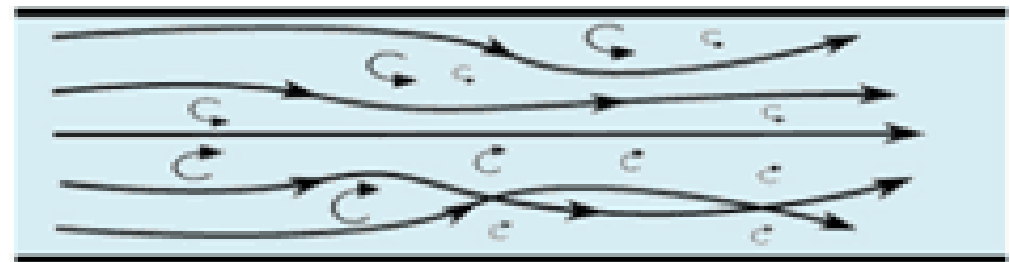
$2000 < Re < 4000$ the flow is in transition

$Re > 4000$ the flow is said to be turbulent

laminar flow



turbulent flow



HW (tube)			CW (annular)			HW (tube)			CW (annular)			
Laminar	i=1	500	Laminar	j=1	500	Turbulent	i=4	4000	Laminar	j=1	500	Reynolds number variation
				j=2	1000					j=2	1000	
				j=3	2000					j=3	2000	
			Turbulent	j=4	4000				Turbulent	j=4	4000	
				j=5	6000					j=5	6000	
				j=6	8000					j=6	8000	
	i=2	1000	Laminar	j=1	500	Turbulent	i=5	6000	Laminar	j=1	500	
				j=2	1000					j=2	1000	
				j=3	2000					j=3	2000	
			Turbulent	j=4	4000				Turbulent	j=4	4000	
				j=5	6000					j=5	6000	
				j=6	8000					j=6	8000	
	i=3	2000	Laminar	j=1	500	Turbulent	i=6	8000	Laminar	j=1	500	
				j=2	1000					j=2	1000	
				j=3	2000					j=3	2000	
			Turbulent	j=4	4000				Turbulent	j=4	4000	
				j=5	6000					j=5	6000	
				j=6	8000					j=6	8000	
					18 simulations						18 simulations	
					18 simulations						36 simulations	
					18 simulations						36 x 4 = 144 simulations	

Numerical Achievements

U/U₀ overall heat transfer

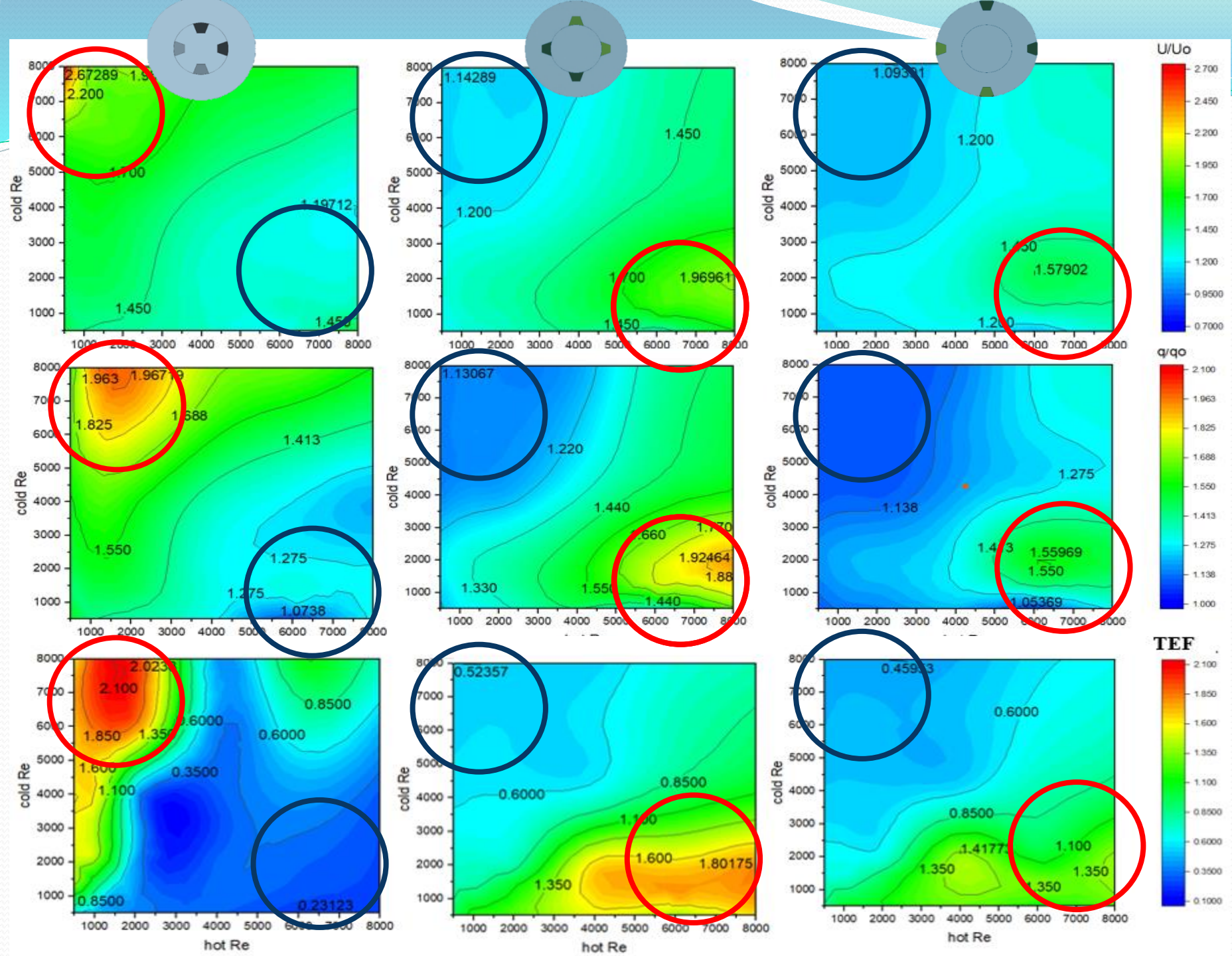
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{annular}} + \frac{1}{h_{tube}}}$$

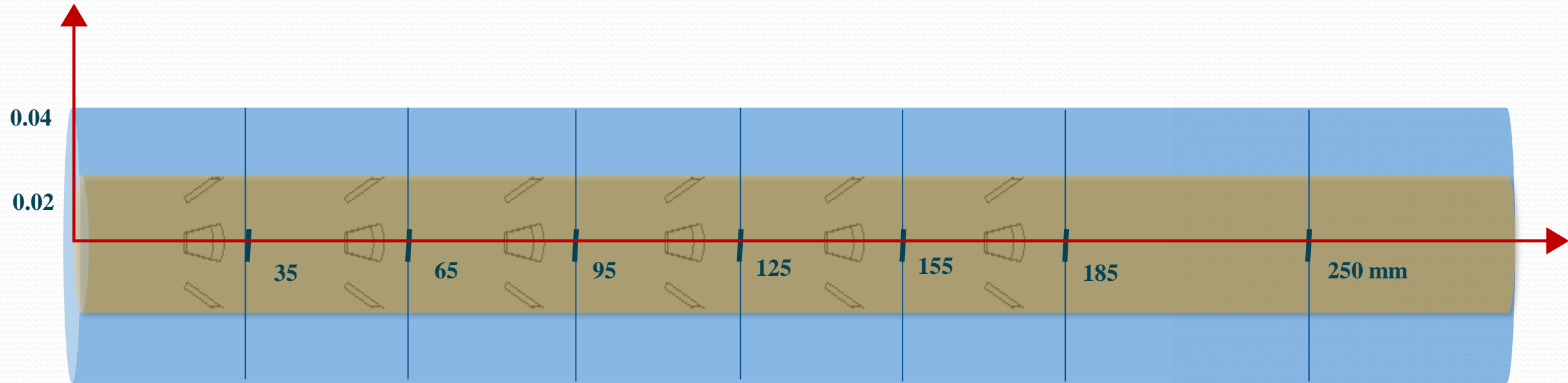
q/q₀ heat transfer ratio that quantifies the enhancement in heat transfer when adding VGs to the empty design

$$q = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_i - T_o)$$

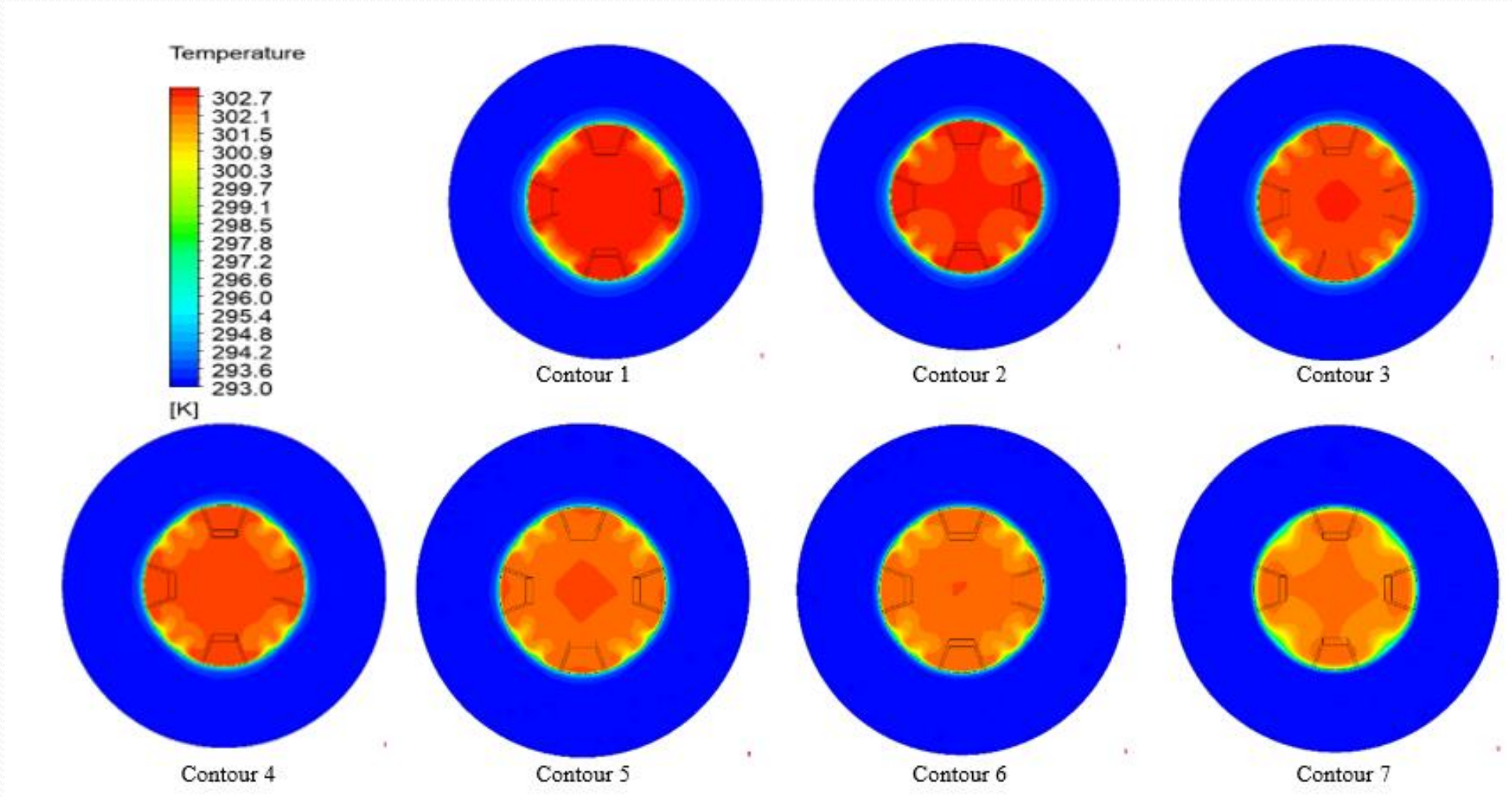
TEF Thermal Enhancement Factor quantifies the relative enhancement in heat transfer to the increasing in pumping power

$$TEF = \frac{q/q_0}{P/P_0} \text{ with } P/P_0 = \frac{(\Delta P_{hw} \cdot \dot{m}_{hw} + \Delta P_{cw} \cdot \dot{m}_{cw})}{(\Delta P_{hw,0} \cdot \dot{m}_{hw,0} + \Delta P_{cw,0} \cdot \dot{m}_{cw,0})}$$

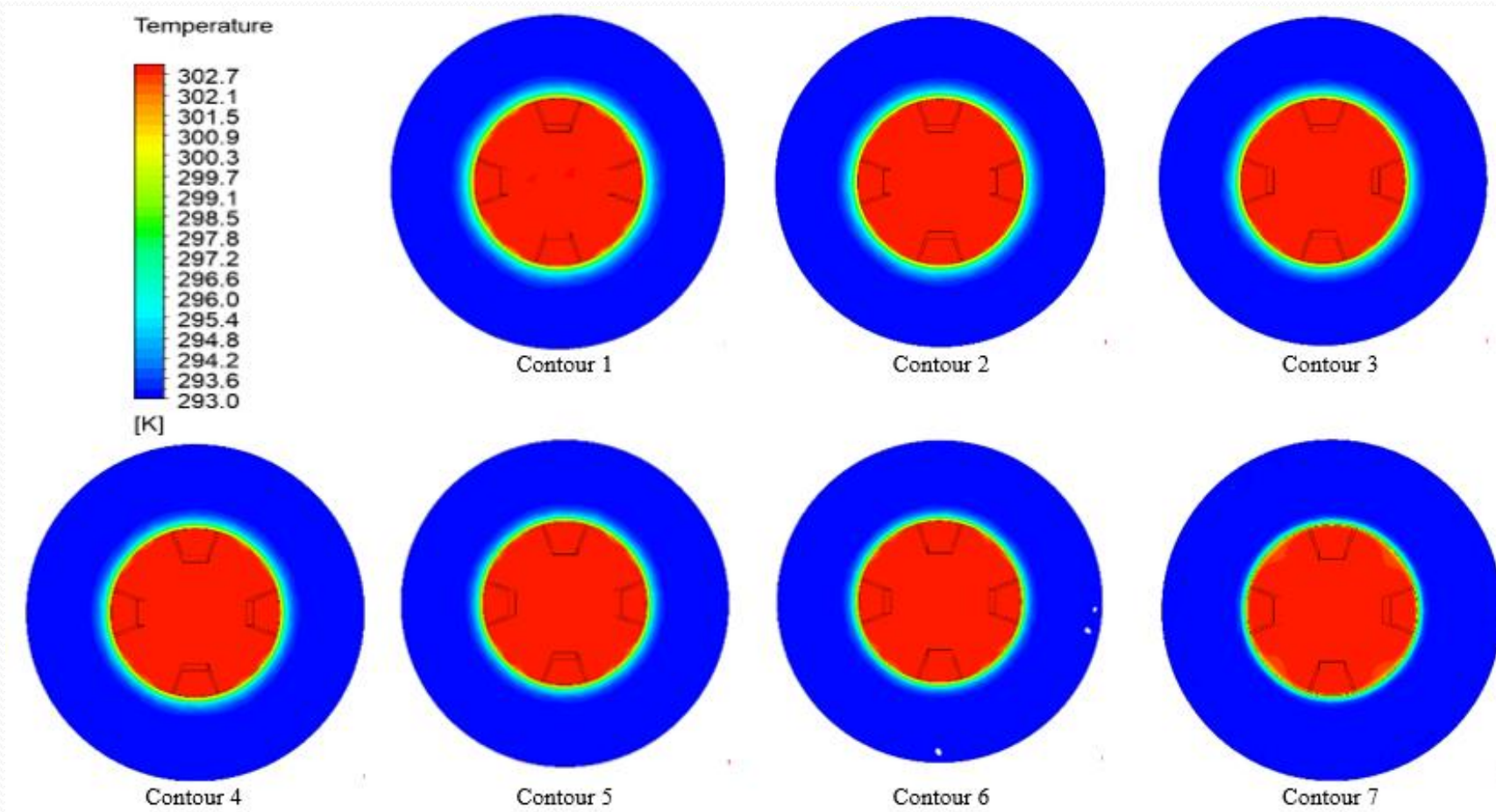




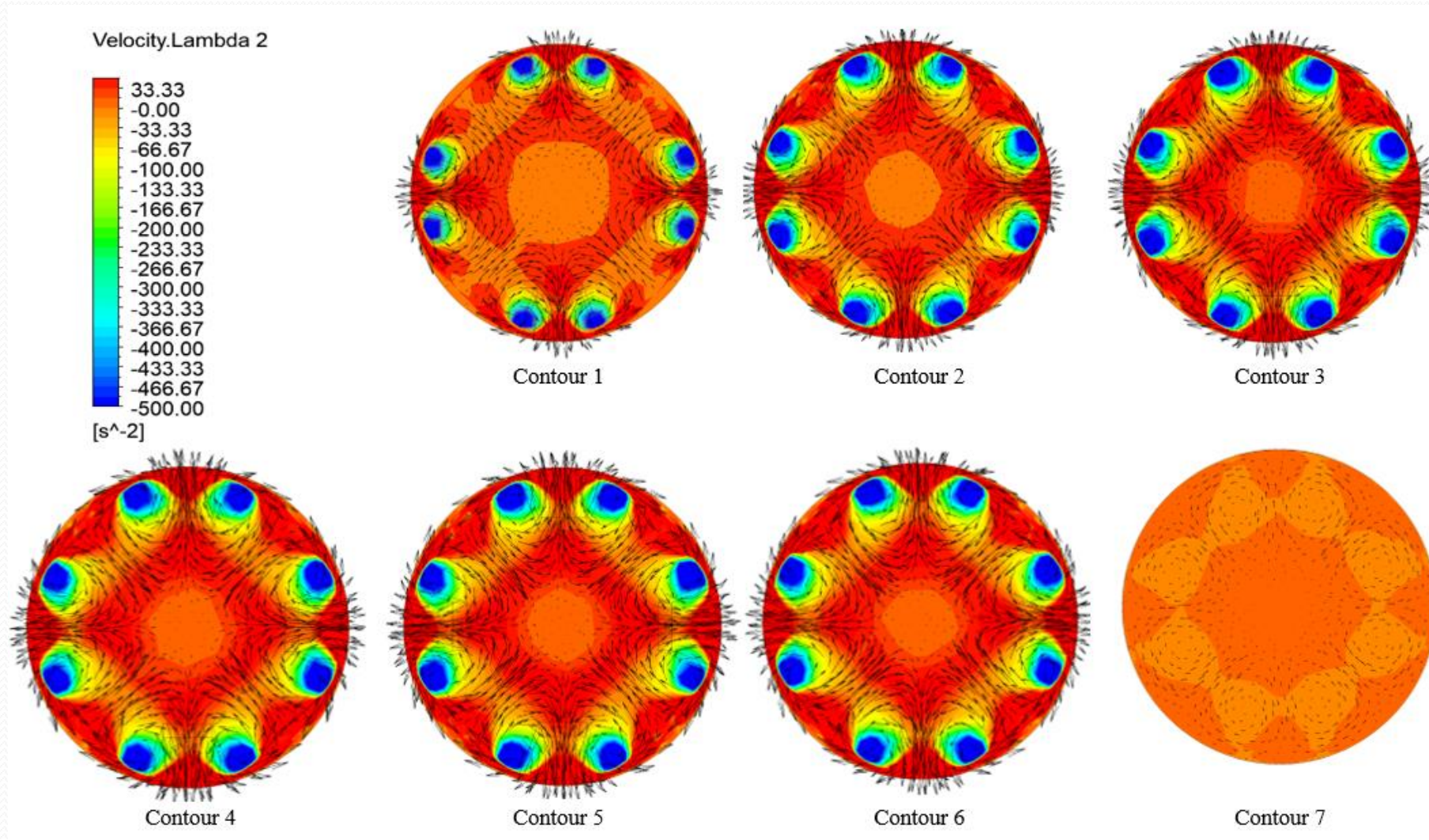
Temperature profiles of case 1 for $Re_{hw} = 2000 - Re_{cw} = 8000$.



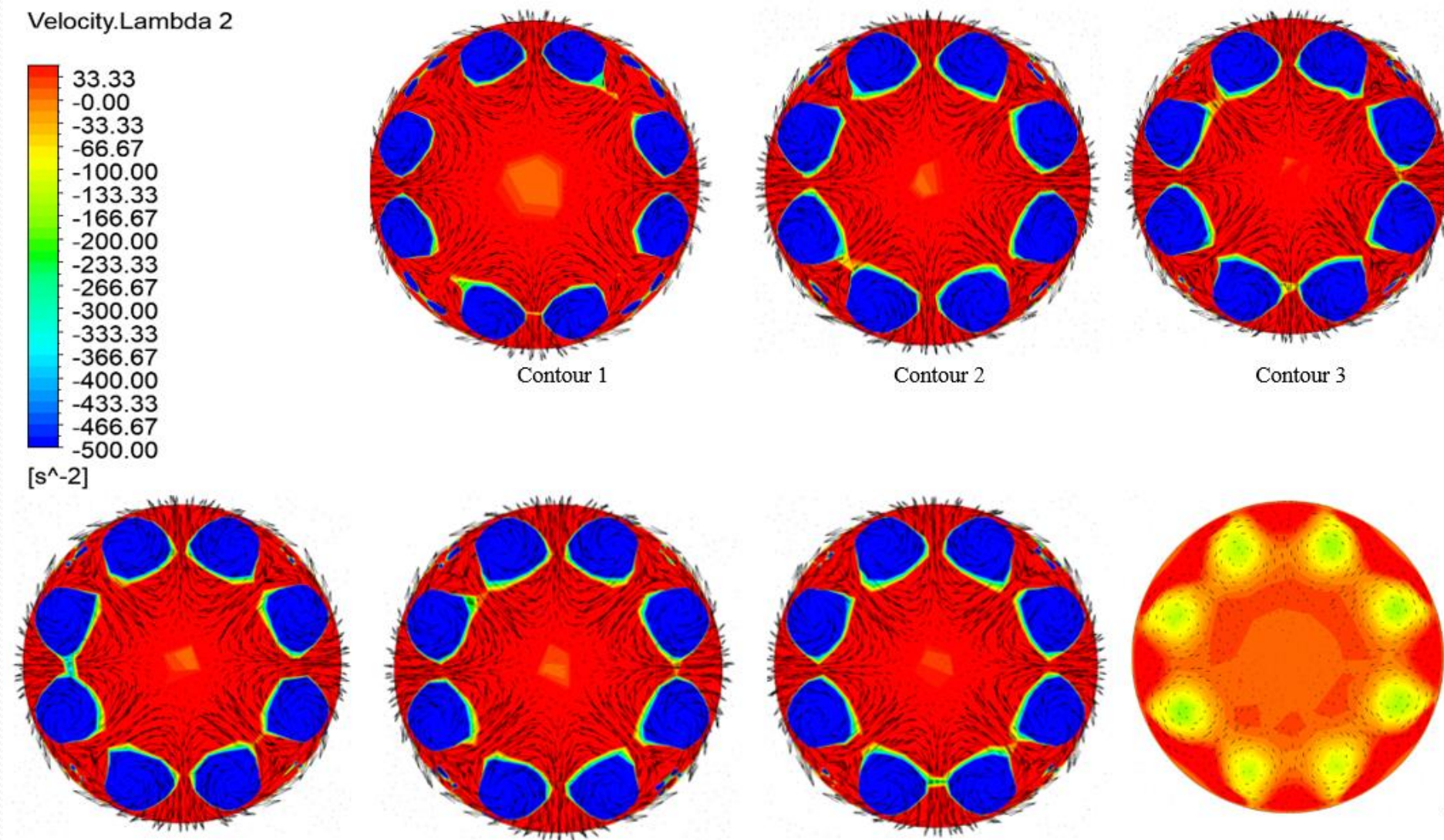
Temperature profiles of case 1 for $Re_{hw} = 8000 - Re_{cw} = 2000$.

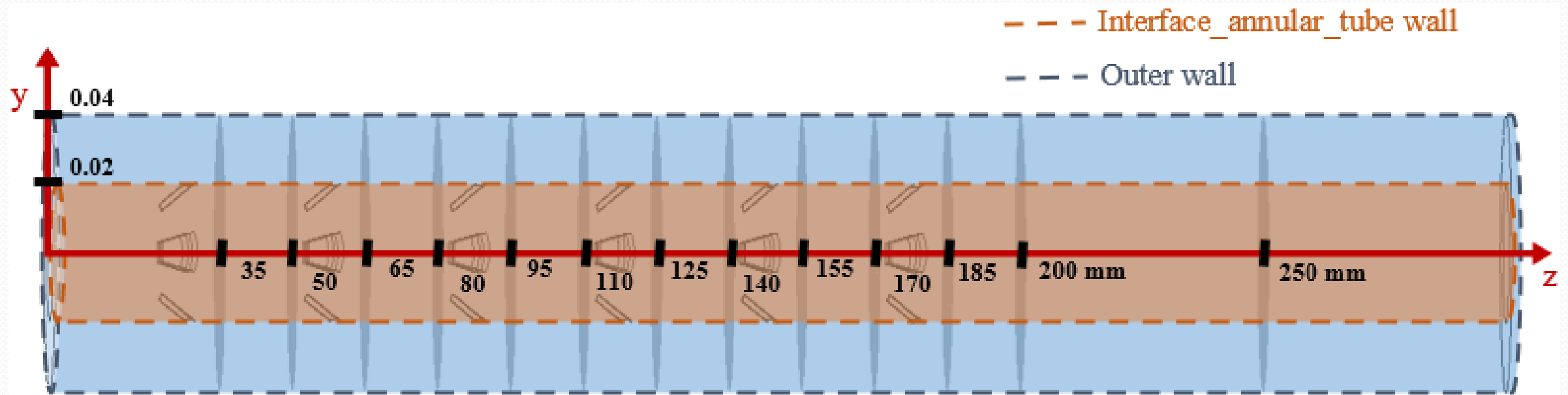


Velocity profiles of case 1 for $Re_{hw} = 2000 - Re_{cw} = 8000$.

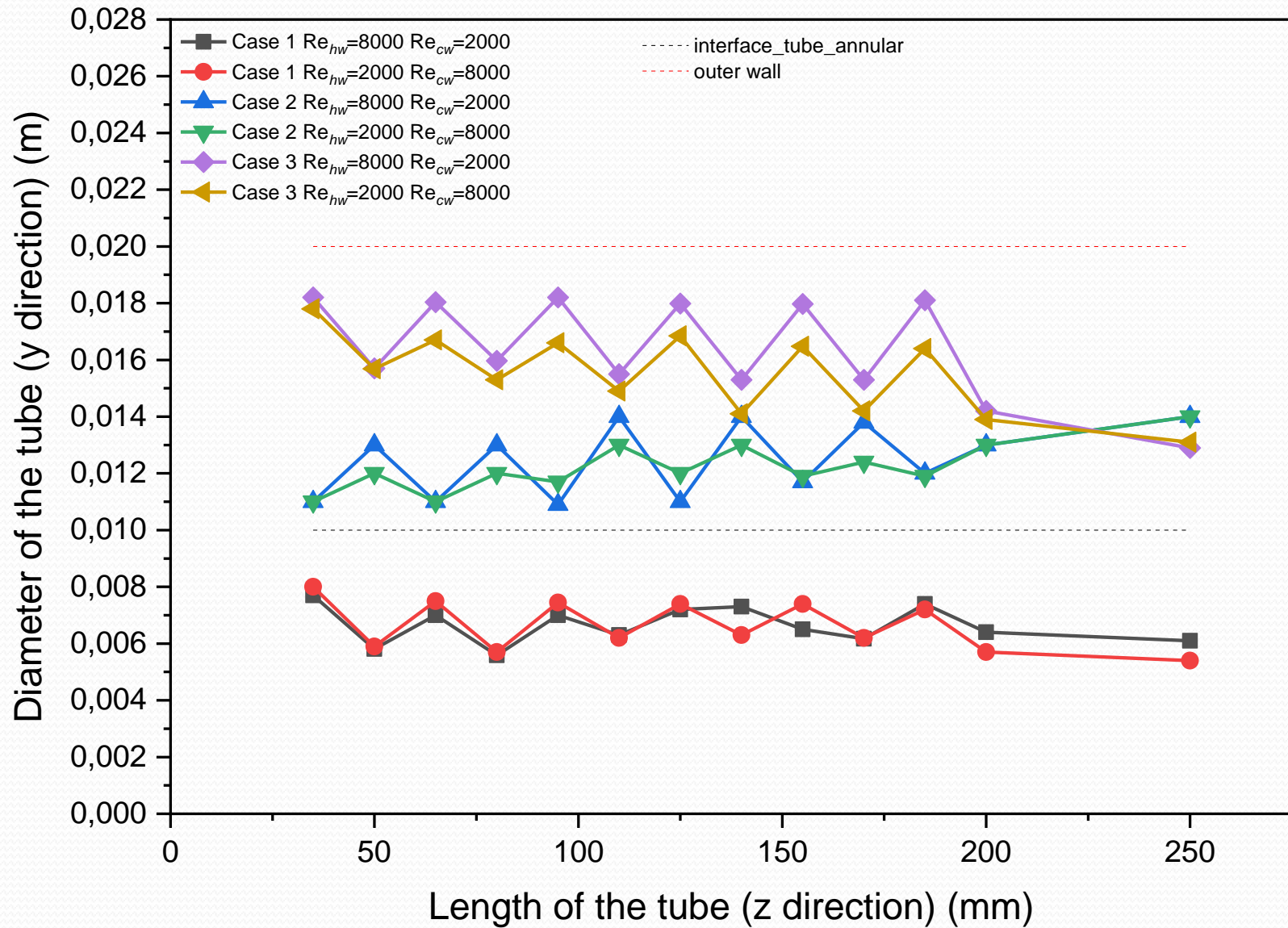


Velocity profiles of case 1 for $Re_{hw} = 8000 - Re_{cw} = 2000$.

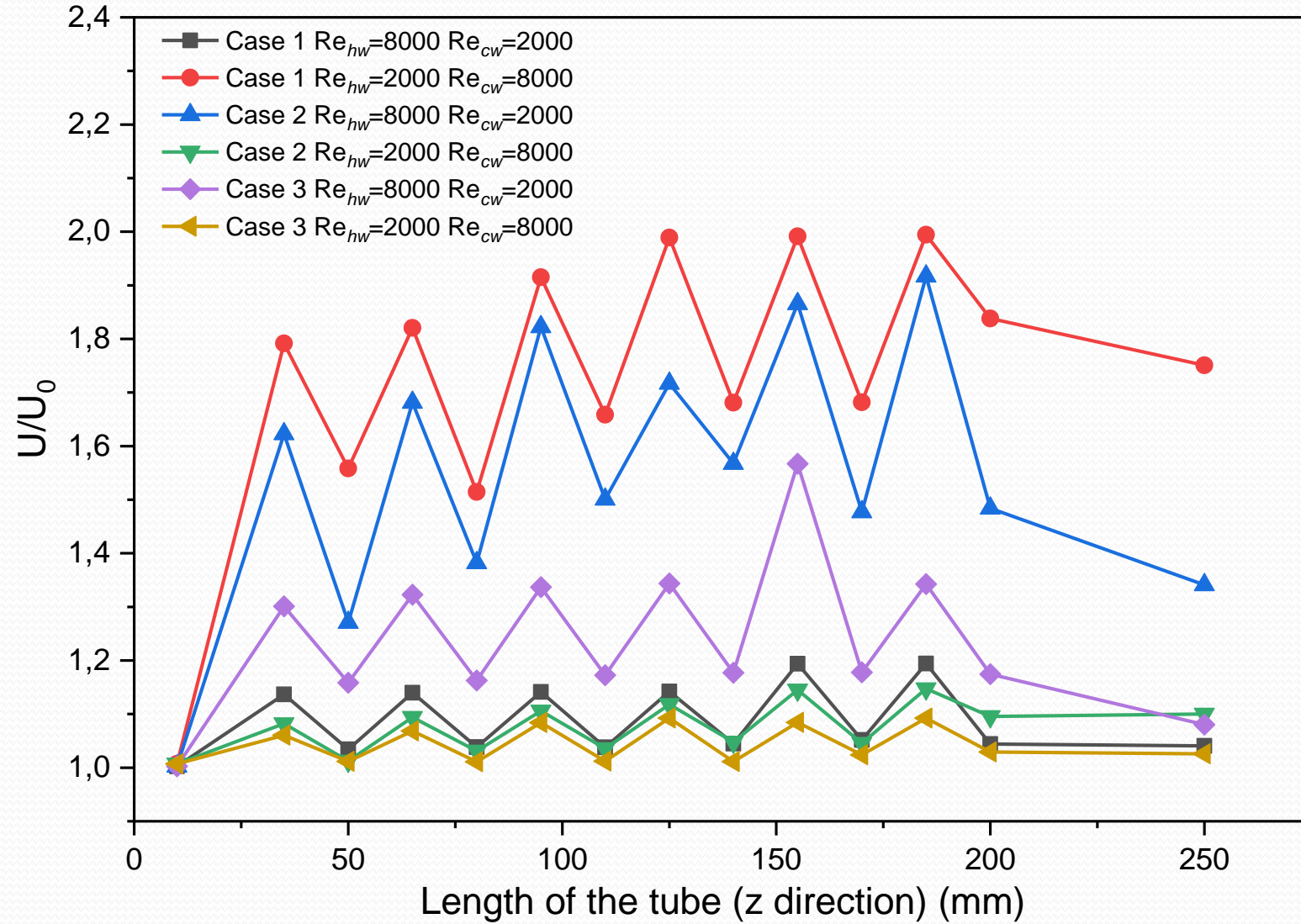




Second year work

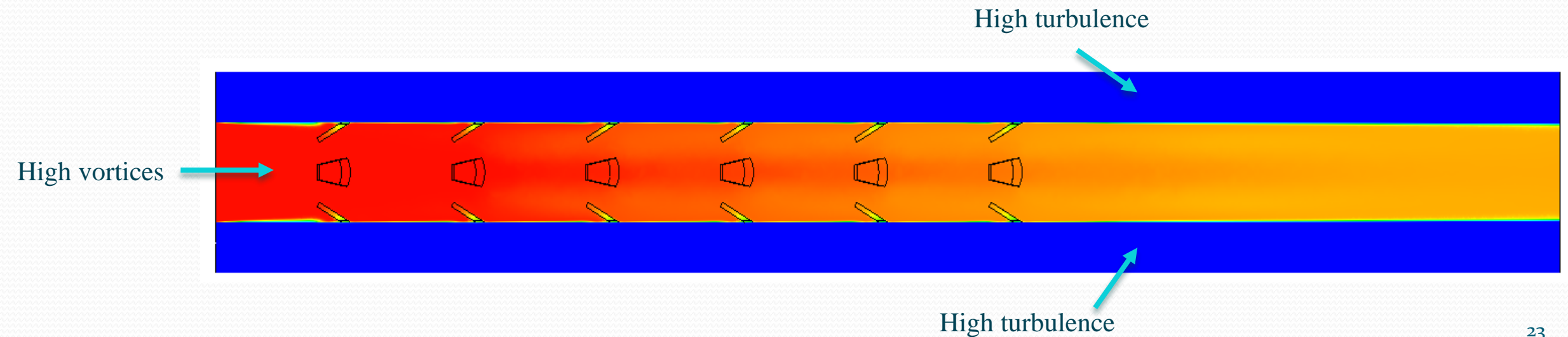


Second year work

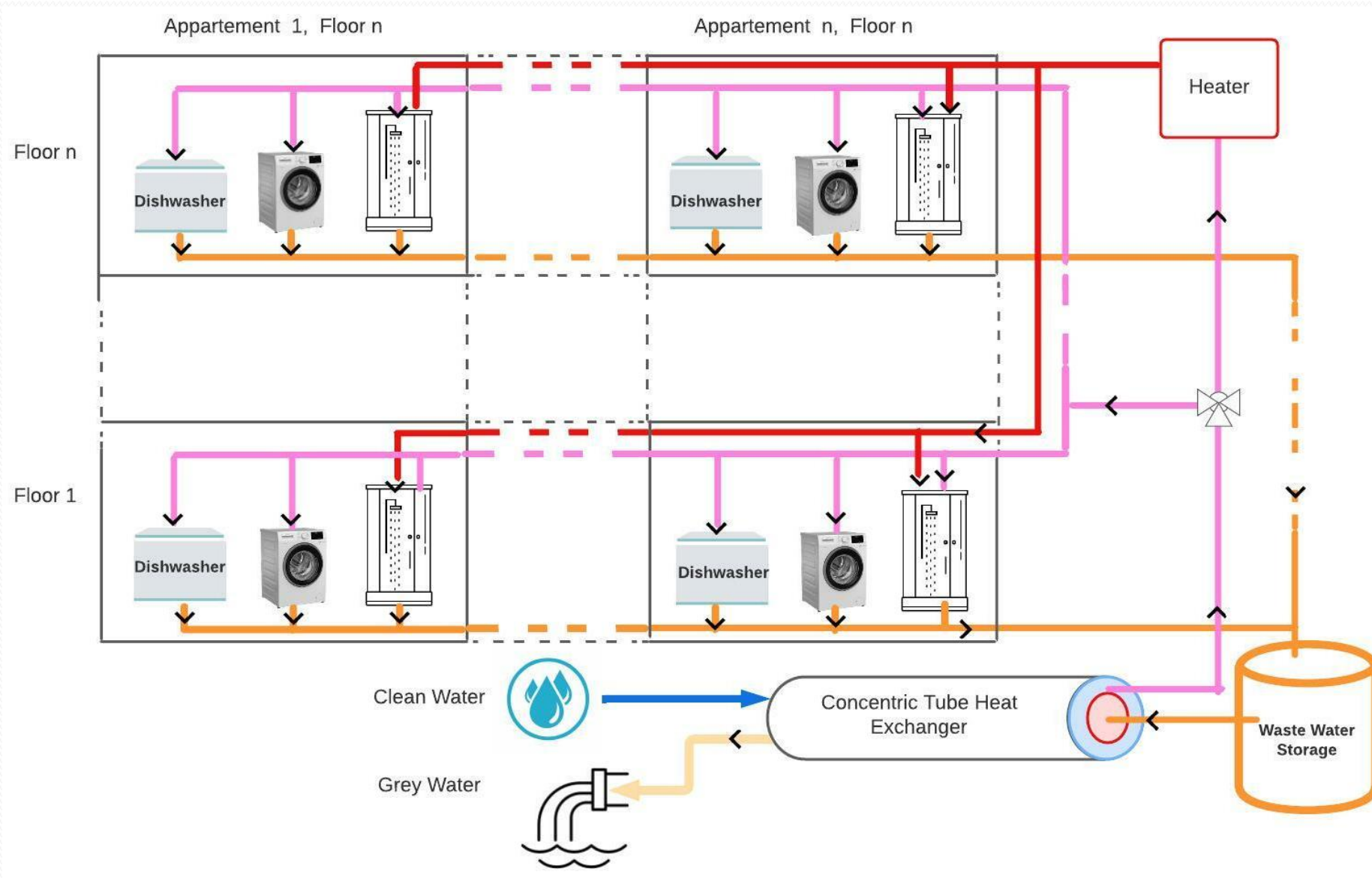


Conclusion

- VGs enhance heat transfer in all the three cases.
- Turbulence in both regions not just one region.
- Having vortices in hot region and turbulence in cold region is the optimal case for this study.



Practical Study



Economical

Environmental

Social



Impacts of the HRS

Published work

1. ~~A Comprehensive Review on Hybrid Heat Recovery Systems: Classifications, Applications, Pros and Cons, and New Systems.~~

Rima Aridi, Jalal Faraj, Samer Ali, Thierry Lemenand, and Mahmoud khaled, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol 167, p 112669, 2022. Impact factor: **14,985** Rank **1 out of 44**

2. Energy recovery in air conditioning systems: Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis and Potential Recommendations.

Rima Aridi, Jalal Faraj, Samer Ali, Mostafa Gad El-Rab, Thierry Lemenand, **Energies**, vol. 14, no. 18, p. 5869, 2021. Impact factor: **3,004**

3. Thermoelectric Generators for Power Generation: Applications, Heat Recovery Methods, and Challenges.

Rima Aridi, Samer Ali, Thierry Lemenand, Jalal Faraj, and Mahmoud khaled, **Electricity**, vol.2, no. 3, pp. 359-386, 2021. Impact factor: **2,62**

4. CFD analysis on the spatial effect of Vortex Generators in Concentric Tube Heat Exchangers – A comparative study.

Rima Aridi, Samer Ali, Thierry Lemenand, Jalal Faraj, and Mahmoud khaled, **International Journal of Thermofluids**, Impact Factor: **9,47**,

5. Thermoeconomic, environmental, and social analysis of vortex generator-equipped multi-drain heat recovery systems

Rima Aridi, Samer Ali, Thierry Lemenand, Jalal Faraj, and Mahmoud khaled, **to be submitted**

Literature review

Numerical analysis



**THANK YOU FOR
LISTENING**

Contrôle en ligne des échangeurs
par excitation/réponse transitoires en température

Denis Maillet, Benjamin Rémy, Benoît Pfortner, Vincent Schick

Université de Lorraine & CNRS, Nancy
Laboratoire **E**nergies et **M**écanique **T**héorique et **A**ppliquée (LEMETA)

Journée SFT
Echangeurs thermiques et multifonctionnels:
récents développements et perspectives

Paris, 26 janvier 2023

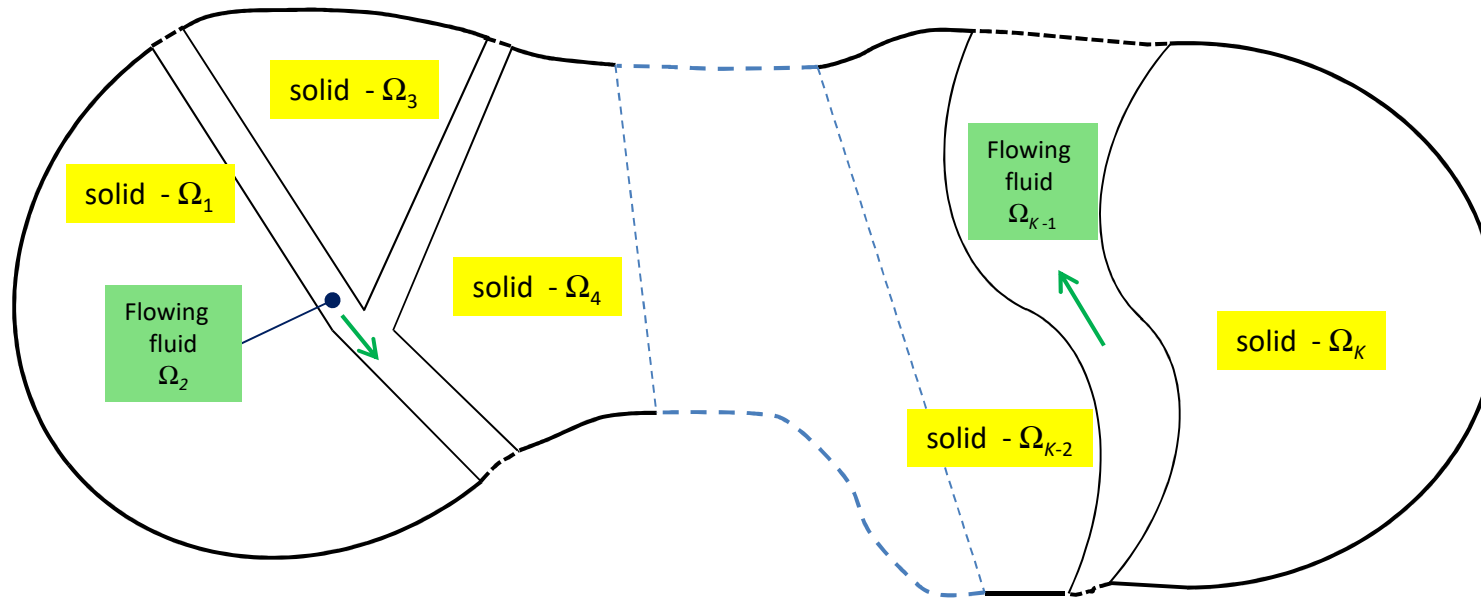


Plan de l'exposé

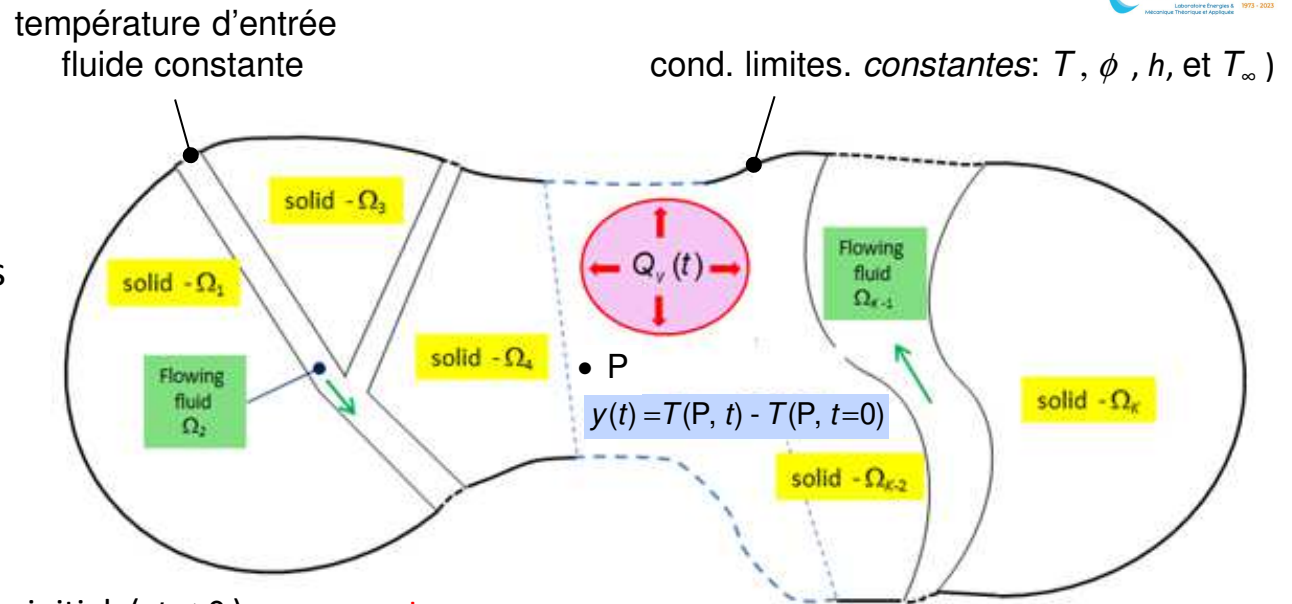
1. Introduction: modèles convolutifs en transfert thermique transitoire
2. Identification des réponses impulsionnelles d'un échangeur à plaque et efficacités thermiques en permanent pour un fonctionnement co-courant
3. Application expérimentale à la quantification de l'encrassement
4. Autre approche explorée : le modèle ARX :
applications contrôle de la maldistribution ou d'une variation de débit en contre-courant
3. Conclusion et perspectives

1.1. Modèles convolutifs en transfert thermique transitoire

Système physique **multicomposant** = K domaines solides ou fluides



Ensemble de solides **et** fluide(s):
 conduction et convection forcée
 interne 3D avec vitesses constantes
 (en temps mais pas en espace)
 P = point **quelconque** du système



Hypothèses :

- champ de température initial ($t \leq 0$) **permanent**
- à $t = 0^+$, une **seule** excitation thermique définie par son support géométrique, **separable en temps/espace**
- aucun changement des cond. limites, ni de température fluides externe, ni de temp. fluide entrée
- les paramètres thermophysiques ainsi que le champ des vitesses restent invariable en temps
- système mathématique (équ. chaleur + cond. limites) **Linéaire à coefficients Indépendants du Temps (LIT)**

Cas particulier d'une **excitation volumique** à l'instant $t = 0$

- Equation de la chaleur en transitoire: $T(P, t) \rightarrow \theta(P, t) = T(P, t) - T(P, t=0)$

$$\boxed{\rho c(P) \frac{\partial \theta}{\partial t}(P, t)} + \boxed{\rho c(P) \vec{u}(P) \cdot \vec{\nabla} \theta(P, t)} = \boxed{\vec{\nabla} \cdot (\lambda(P) \vec{\nabla} \theta(P, t))} + \boxed{\frac{f(P)}{V_{\text{source}}} Q_v(t)}$$

Transitoire
Advection
Conduction
Source interne

support (espace)

$$\boxed{\rho c(P) \frac{\partial \theta}{\partial t}(P, t)} + \boxed{\rho c(P) \vec{u}(P) \cdot \vec{\nabla} \theta(P, t)} = \boxed{\vec{\nabla} \cdot (\lambda(P) \vec{\nabla} \theta(P, t))} + \boxed{\frac{f(P)}{V_{\text{source}}} Q_v(t)}$$

Transitoire
Advection
Conduction
Source interne

Élévation température en point P **quelconque** :

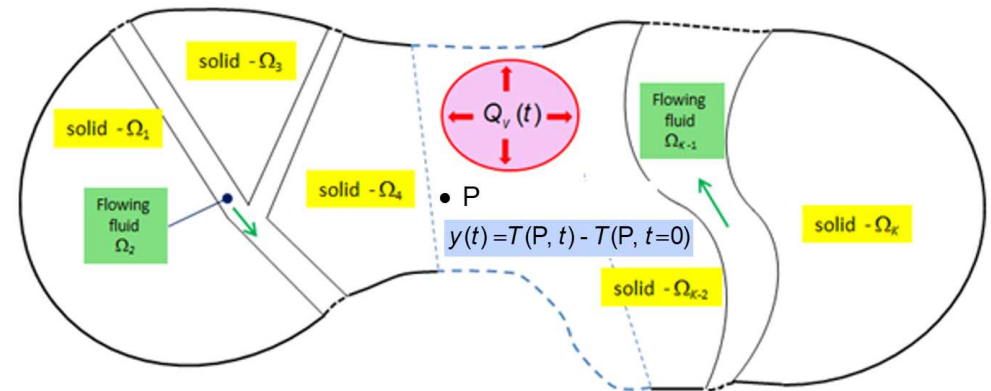
$$\theta(P, t) = T(P, t) - T_{\text{init}}(P)$$

Sa transformée de Laplace :

$$\bar{\theta}(P, p) = \int_0^\infty \exp(-pt) \theta(P, t) dt$$



paramètre de Laplace



Conséquence : Equation de la chaleur dans le domaine de Laplace¹ (**disparition de la dérivée temporelle**)

$$\boxed{\rho c(P) p \bar{\theta}(P, p)} + \boxed{\rho c(P) \vec{u}(P) \cdot \vec{\nabla} \bar{\theta}(P, p)} = \boxed{\vec{\nabla} \cdot (\lambda(P) \vec{\nabla} \bar{\theta}(P, p))} + \boxed{\frac{f(P)}{V_{\text{source}}} \bar{Q}_v(p)}$$

Transitoire
Advection
Conduction
Source interne

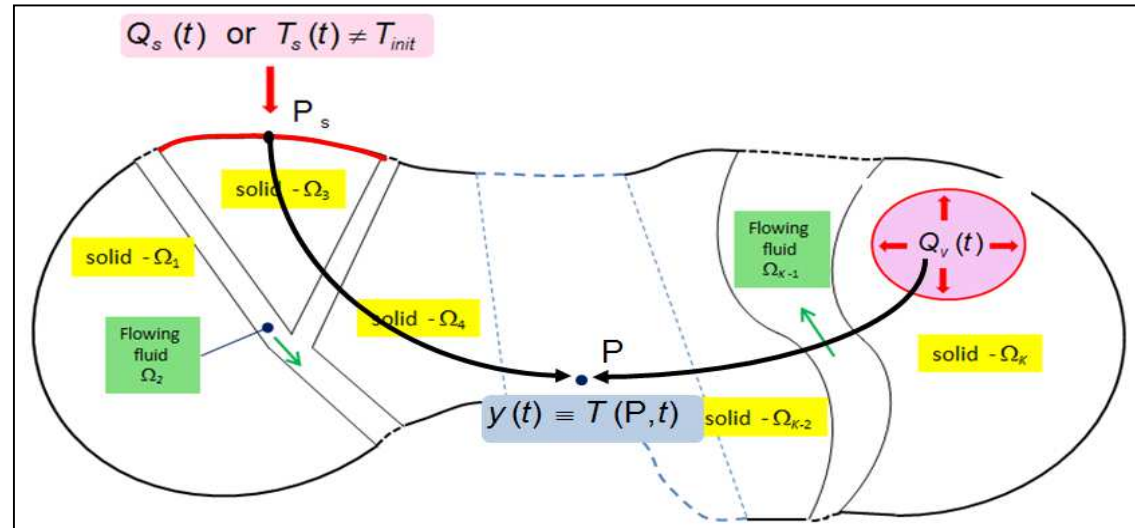
[1] W. Al Hadad, D. Maillet, Y. Jannot, Modeling unsteady diffusive and advective heat transfer for linear dynamical systems: A transfer function approach, International Journal of Heat and Mass Transfer 115 (2017) 304–313. 5

Linear PDE system
with a single excitation $\bar{Q}(p)$

\Rightarrow input : $\bar{u}(p) \equiv \bar{Q}(p)$

Temperature or flux response
at any point P in system

$$\bar{y}(P, p) = \bar{h}(P, p) \bar{u}(p)$$



or convolution product (time domain)

Forced response \leftarrow

$$y(P, t) = h(P, t) * u(t) = \int_0^t h(P, t-t') u(t') dt'$$

excitation \rightarrow

Transient variation of excitation :

$$u(t) = Q_v(t) - Q_v^{init} \text{ or } Q_s(t) - Q_s^{init}$$

$$\text{or } T_s(t) - T_{init}(P_s) \text{ or } T_\infty(t) - T_\infty^{init}$$

$$\text{or } T_b^{in}(t) - T_b^{in,init}$$

Impulse response

$$h(P, t)$$

« init » = initial steady state

Transient variation of temperature at point P

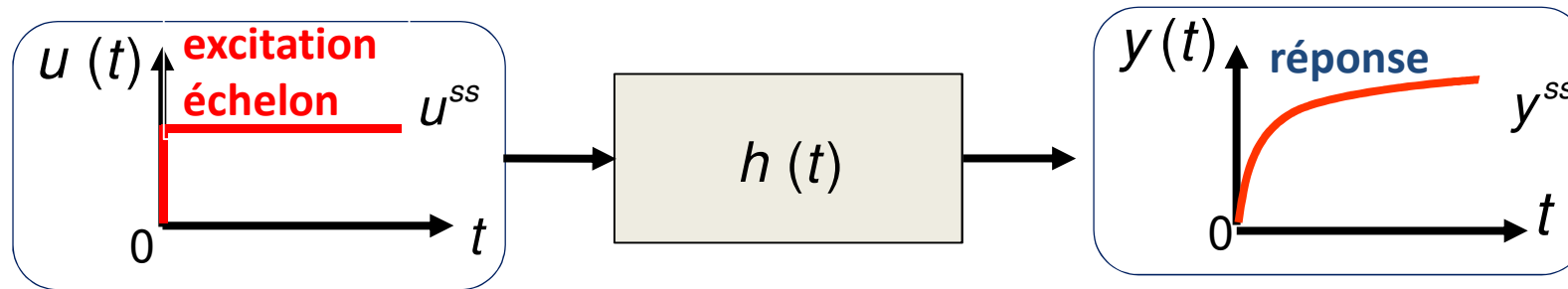
$$y(t) = T(P, t) - T_{init}(P)$$

or variation of local heat flux $\phi_x(P, t)$
in any direction x

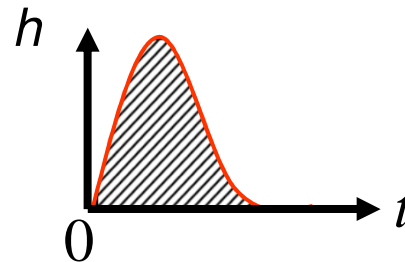
Excitation u	Response y	Transfer function H
Power source Q (watts)	Temperature difference θ (kelvins)	Impedance Z ($K.J^{-1}$)
Temperature difference θ (kelvins)	Temperature difference θ (kelvins)	Transmittance W (s^{-1})
Power source Q (watts)	Rate of heat flow Φ (watts)	Transmittance W (s^{-1})
Temperature difference θ (kelvins)	Rate of heat flow Φ (watts)	Admittance Y ($W.K^{-1}.s^{-1}$)

1.2. Fonctions de transfert en permanent et résistances généralisées

$$y(P, t) = h(P, t) * u(t) = \int_0^t h(P, t-t') u(t') dt'$$



Version permanente (ss)
d'une fonction de transfert



$$h^{ss} = \int_0^{\infty} h(t) dt$$

dispersion
transitoire

$$y^{ss} = h^{ss} u^{ss}$$

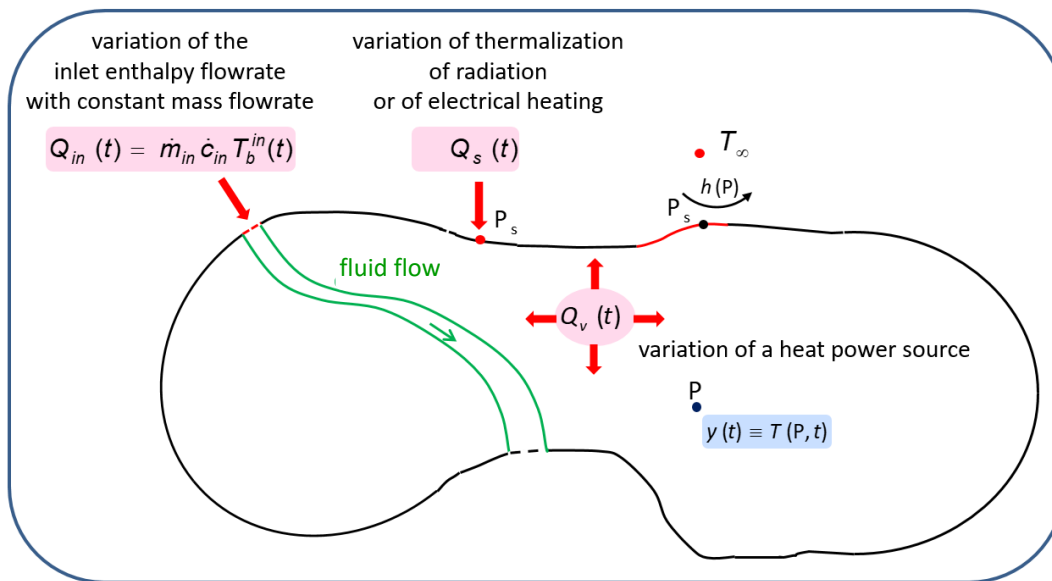
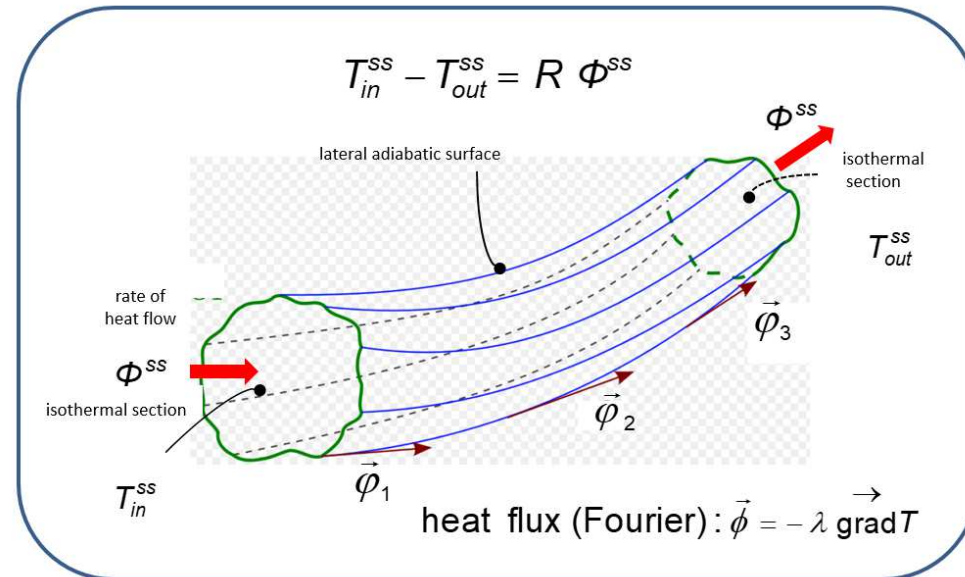
valeurs
asymptotiques

Définition traditionnelle d'une résistance thermique en régime permanent

Hypothèses :

un tube de flux existe entre 2 surface isothermes

Φ^{SS} : flux de chaleur en permanent



Résistance généralisée entre 2 régimes permanents: pas de tube de flux, pas de surface isotherme

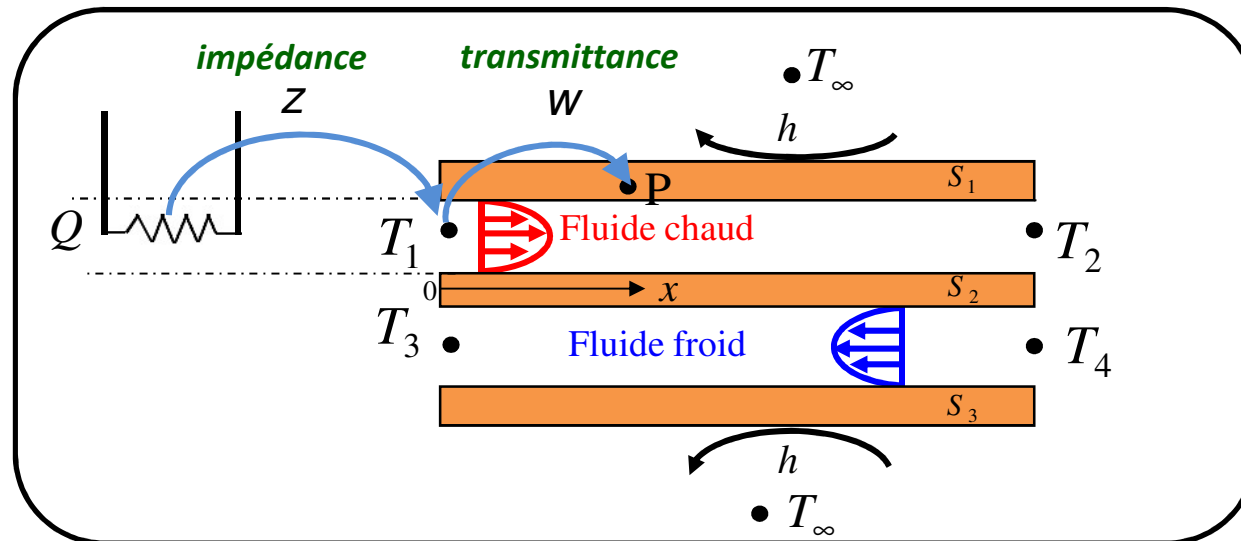
Q^{SS} : source en permanent (= cause)

$$T_2^{SS} - T_1^{SS} = Z^{SS} (Q_2^{SS} - Q_1^{SS})$$

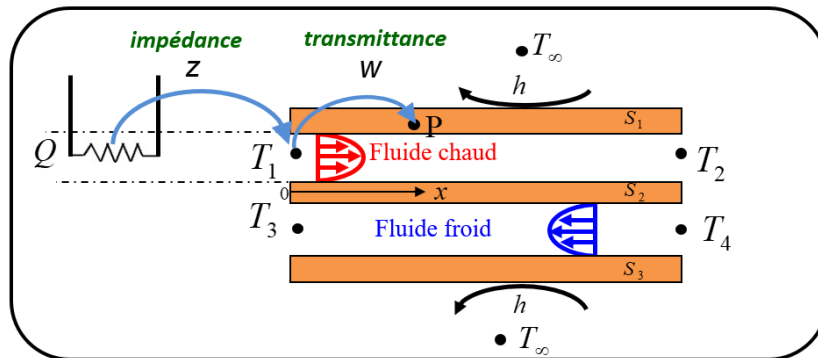
variation d'une puissance thermique (watts) (conversion **thermodynamique en chaleur sensible** à partir d'une **énergie différente**) pour passer d'une **température initiale locale** à sa **valeur finale**, ces 2 températures ₈ correspondant à des régimes permanents

2 - Identification des réponses impulsionnelles d'un échangeur à plaque propre et de son efficacité en régime permanent

Principe de la méthode: Perturbation de la température en entrée d'un fluide à débits fixés



- Echangeur de chaleur à 2 fluides (débits constants, laminaire ou turbulent) en régime thermique permanent)
- Pertes thermiques vers l'extérieur
- Perturbation thermique : source instationnaire de puissance $Q(t)$ en amont (watts), activée à $t = 0$



Propriété générale des systèmes linéaires invariants en temps:

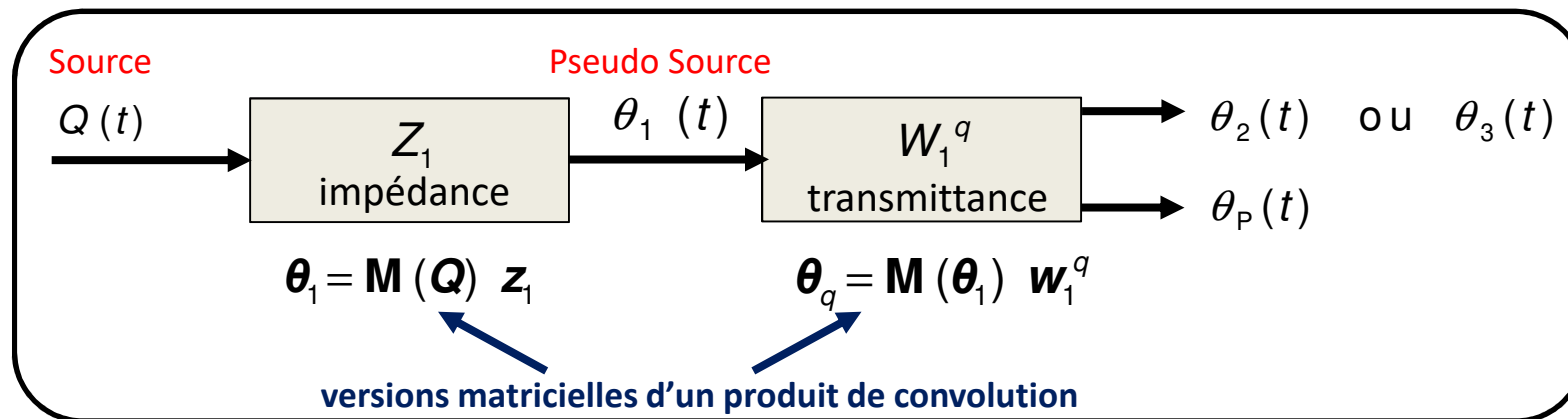
Réponse en température en tout point q de l'échangeur à une perturbation (/régime permanent)

$$\theta_q(t) = T_q(t) - T_q(t=0)$$

= **produit de convolution** entre:

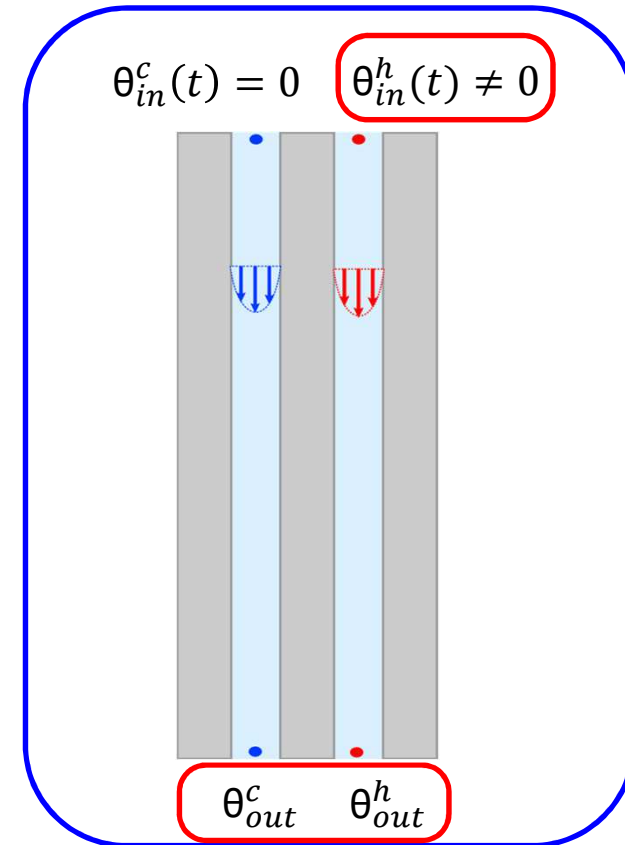
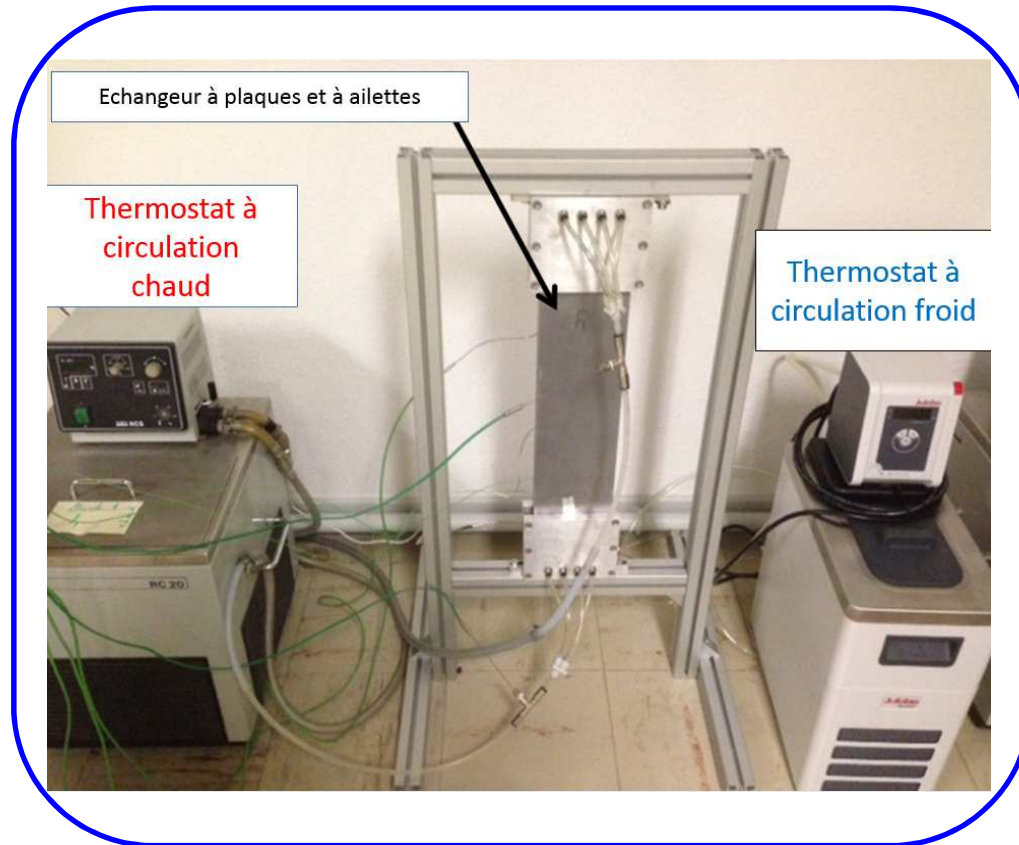
- la perturbation $Q(t)$ (en **watts**) et une réponse impulsionnelle (**impédance Z**)

- la perturbation $\theta_1(t)$ (en **kelvins**) et une réponse impulsionnelle (**transmittance W**)

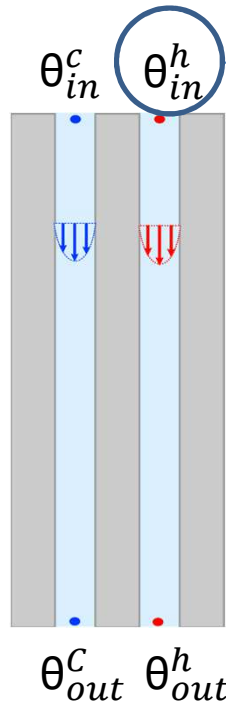


$$\mathbf{M}(z) \equiv \Delta t (\mathbf{N}(f))^2 \mathbf{N}(z) \quad \text{with } f = \frac{1}{2} [1 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$$

Montage expérimental (identification de système pour échangeur propre, en co-courant)



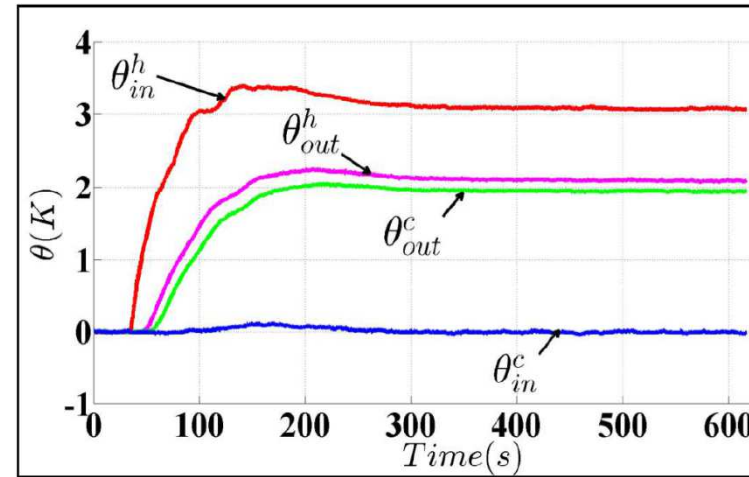
Fluides = eau



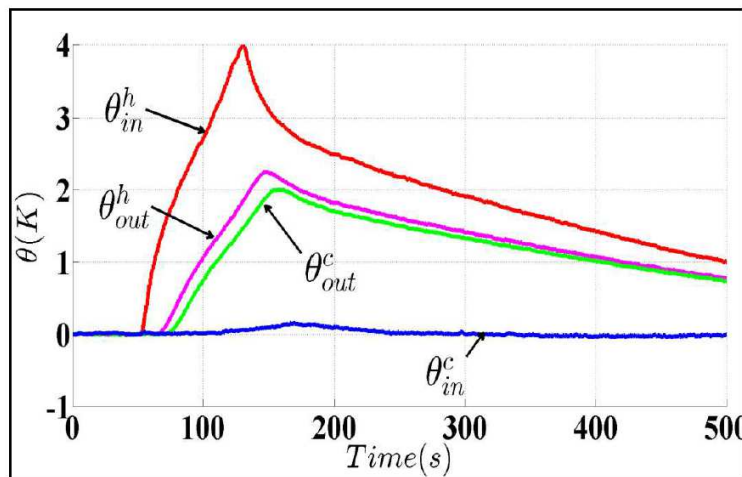
Commande manuelle
via changement
température consigne
thermostat
à circulation
(débits inchangés)

$$\dot{m}_h = 1,73 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$$

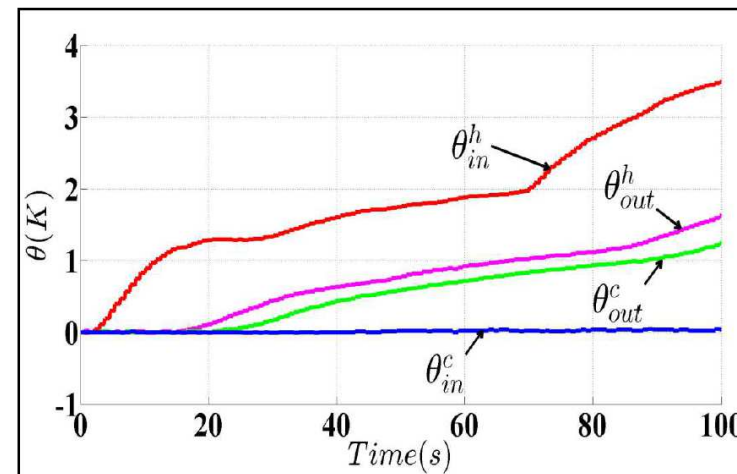
$$\dot{m}_c = 0,95 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$$



Thermogrammes entrées et sorties : *Expérience 1*

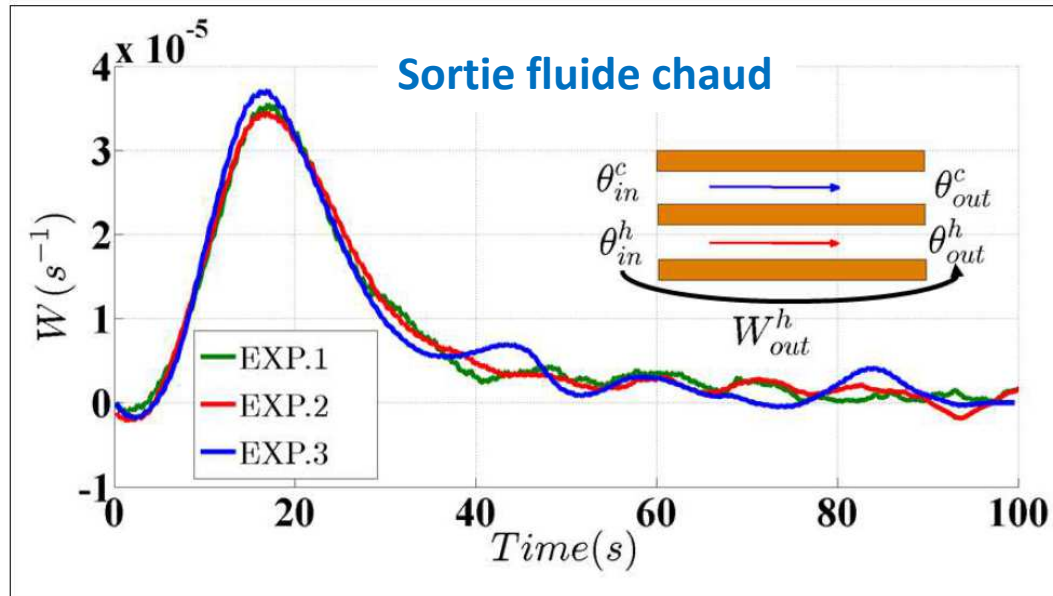


Thermogrammes entrées et sorties : *Expérience 2*



Thermogrammes entrées et sorties : *Expérience 3*

Réponses impulsionnelles (transmittances) identifiées²



$$\theta_{out}^h = \mathbf{M}(\theta_{out}^h) w_{out}^h$$

Transmittance sortie chaude

Inversion régularisée de la matrice $\mathbf{M}(\cdot)$:

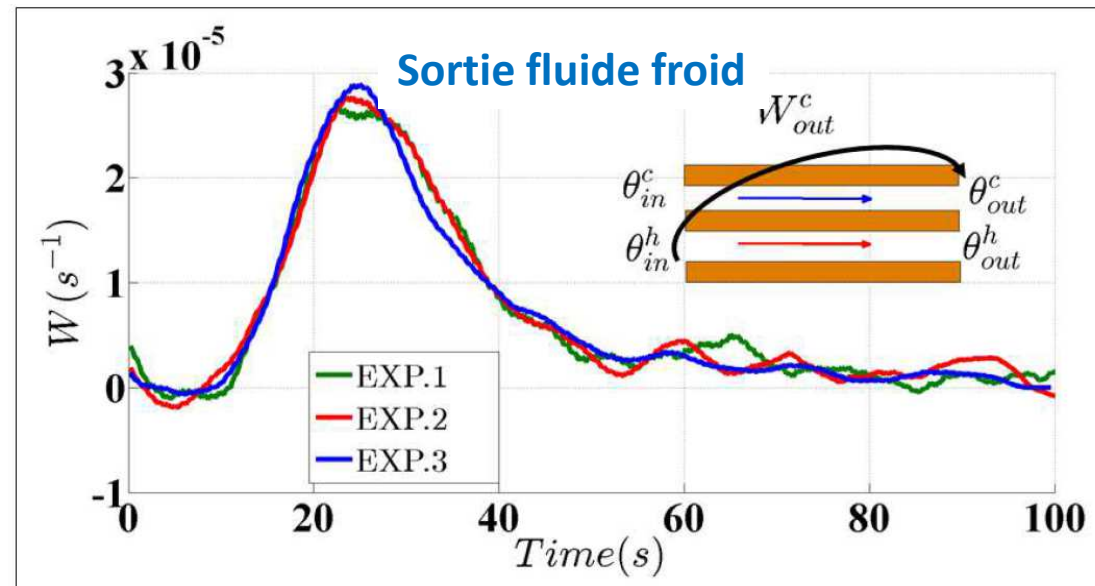
$$w_{out,identifiée}^h = \left(\mathbf{M}(\theta_{in,mesurée}^h) \right)^{-1} \theta_{out,mesurée}^h$$

$$\theta_{out}^c = \mathbf{M}(\theta_{out}^c) w_{out}^c$$

Transmittance sortie froide

Conclusion (validation): au bruit près, et aux erreurs d'inversion près,

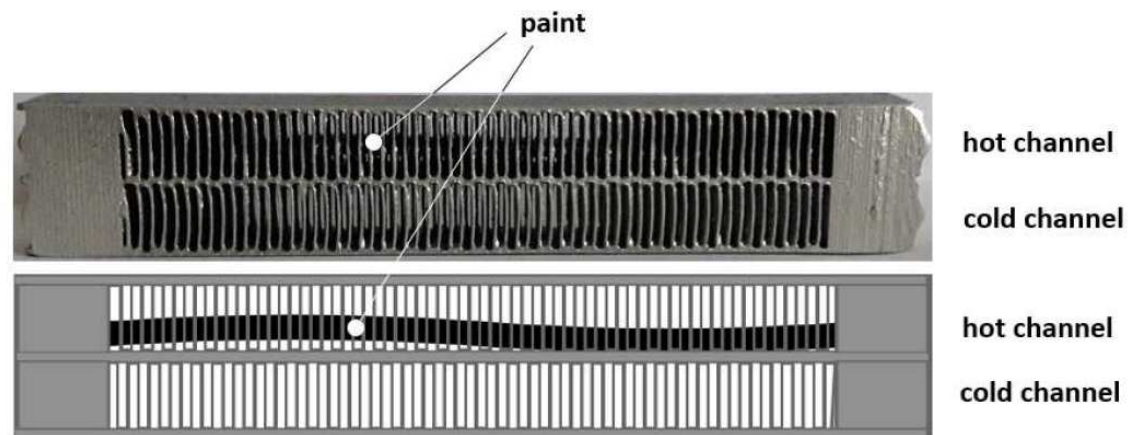
les transmittances identifiées sont **indépendantes** de la forme temporelle de l'excitation (**température entrée chaude**)



[2] W. Al Hadad, Y. Jannot, V. Schick, B. Rémy, D. Maillet, Transient characterization of a heat exchanger through identification of its transfer functions, Paper IHTC16-21381, Proceedings of the International Heat Transfer Conference (IHTC-16), Beijing, August 10-15, 2018.

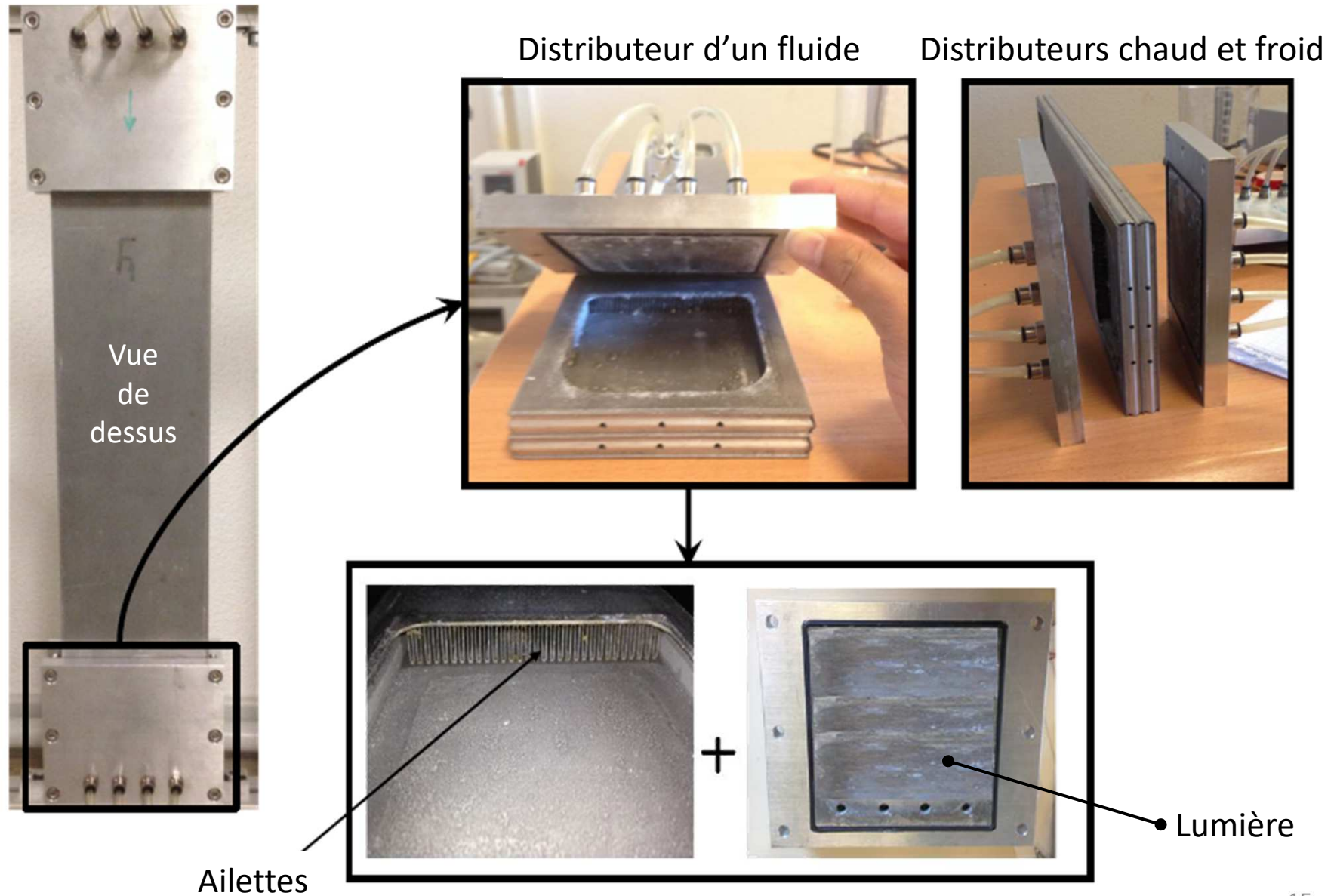
3. Application expérimentale à la quantification de l'encrassement

Encrassement synthétique: mise en peinture de l'intérieur de l'échangeur à plaque et ailettes



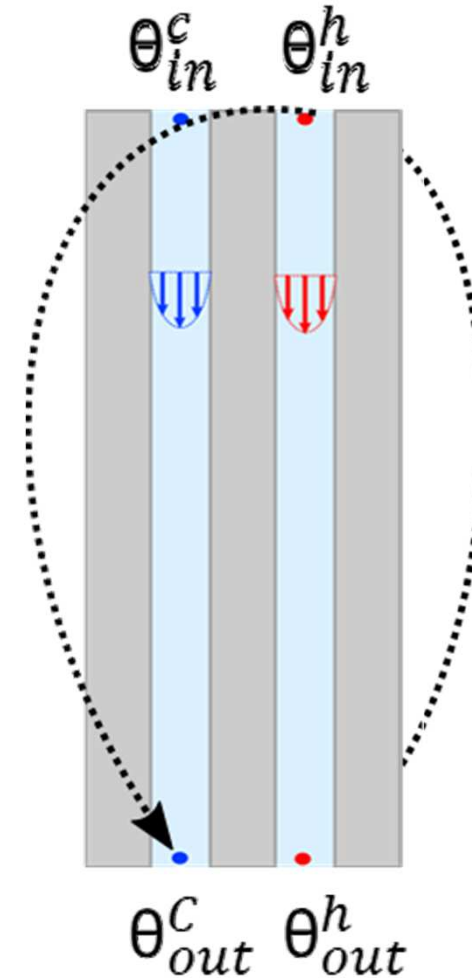
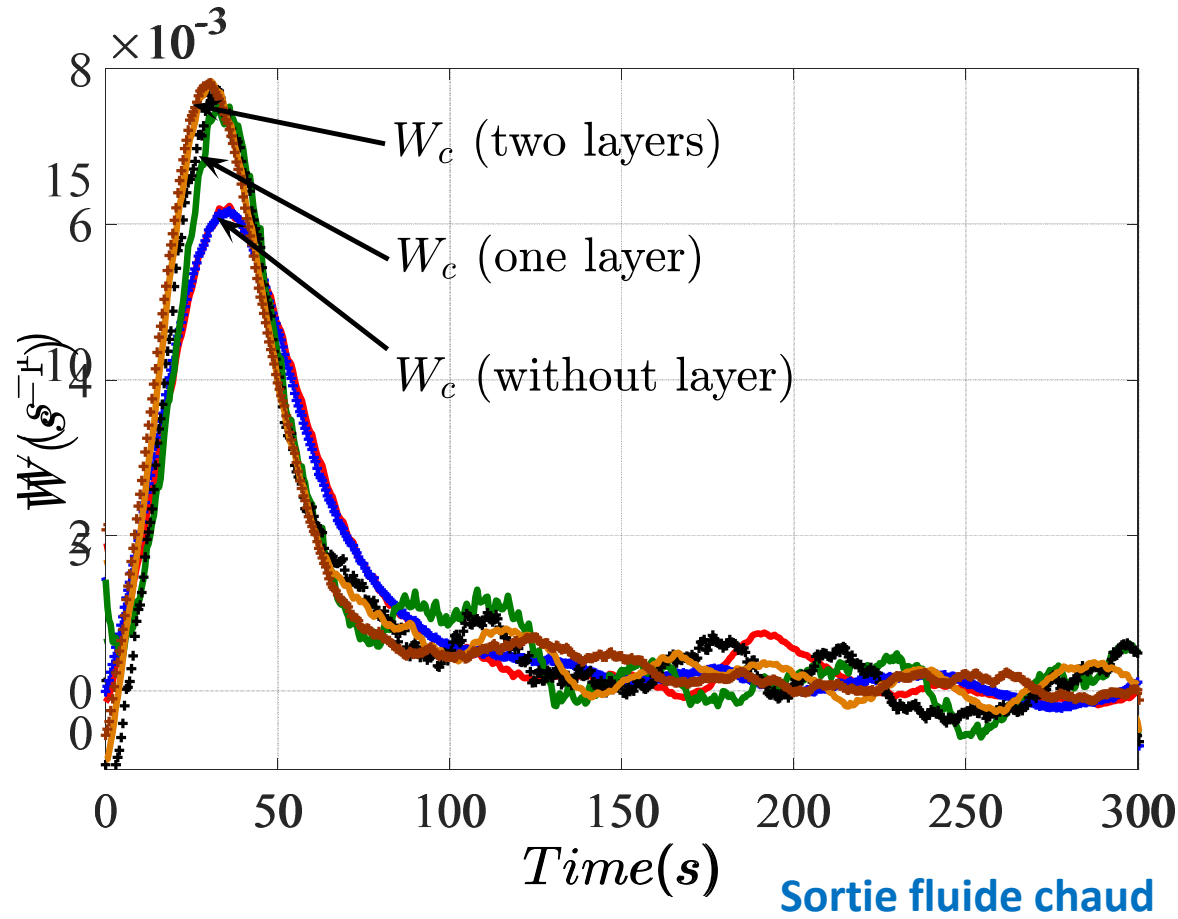
- ⇒ Changement de structure du système (n'est plus linéaire à **coefficients invariants en temps**)
- ⇒ Changement des 2 transmittances
- ⇒ Détection de l'encrassement

Réalisation pratique de la mise en peinture



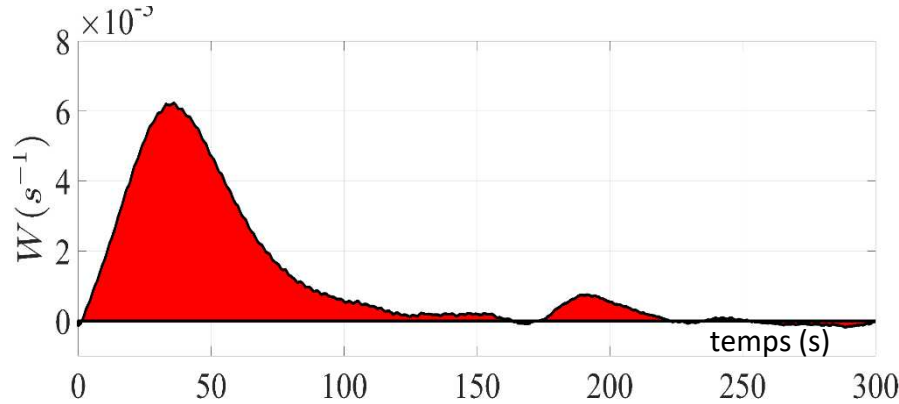
6 expériences de calibration avec 0, 1 ou 2 couches de peinture
 et avec à chaque fois 2 excitations différentes

Transmittances identifiées



Efficacité et transmittances en sortie

Calcul de l'efficacité en régime permanent (ss = steady state) par intégration temporelle des transmittances



transmittance en permanent :
$$W_{\alpha}^{ss} \equiv \frac{1}{t_{final}} \int_0^{t_{final}} W_{\alpha}(t) dt$$

pour $\alpha = c$ ou h

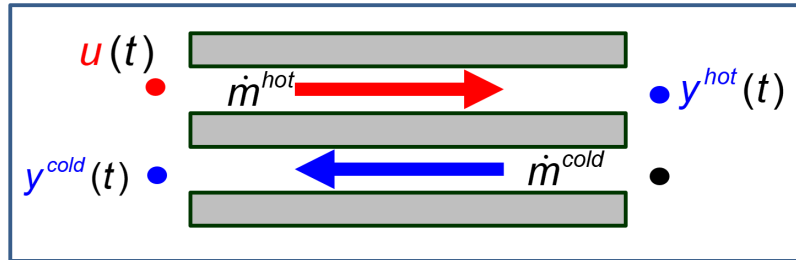
efficacité :
$$\eta_{\alpha} = \frac{(\dot{m}c)_c \left| \theta_{out}^{ss,\alpha} - \theta_{in}^{ss,\alpha} \right|}{(\dot{m}c)_{min} \left(\theta_{in}^{ss,h} - \theta_{in}^{ss,c} \right)}$$

Efficacités η_2 déduites de l'intégration de la transmittance froide w_c

		Débit froid inchangé			
		Débit chaud doublé			
Perturbation		$\dot{m}_h = \dot{m}_c / 2 = 1 \text{ kg / mn}$	$\dot{m}_h = \dot{m}_c = 2 \text{ kg / mn}$	$\dot{m}_h = \dot{m}_c = 2 \text{ kg / mn}$	$\dot{m}_h = \dot{m}_c = 2 \text{ kg / mn}$
		$\eta_h = (1 - W_h^{ss})$	$\eta_c = 2W_c^{ss}$	$\eta_h = (1 - W_h^{ss})$	$\eta_c = W_c^{ss}$
without fouling	1	0.66	0.62	0.48	0.44
	2	0.65	0.62	0.47	0.45
with fouling (one layer)	1	0.66	0.62	0.48	0.45
	2	0.65	0.62	0.48	0.45
with fouling (two layers)	1	0.65	0.58	0.47	0.41
	2	0.64	0.58	0.46	0.41

- Conclusions**
- efficacités côté chaud et côté froid **différentes** (transfert de chaleur conjugué pris en compte): $\eta_h > \eta_c$
 - effet de présence de la **monocouche** de peinture **indiscernable** sur l'efficacité
 - présence de **2 couches détectée et quantifiées** par la baisse d'efficacité
 - limitations: la méthode ne permet pas de différencier les variations de débit d'un possible encrassement

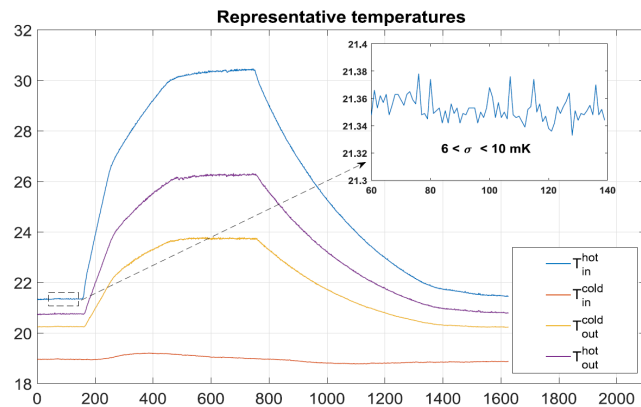
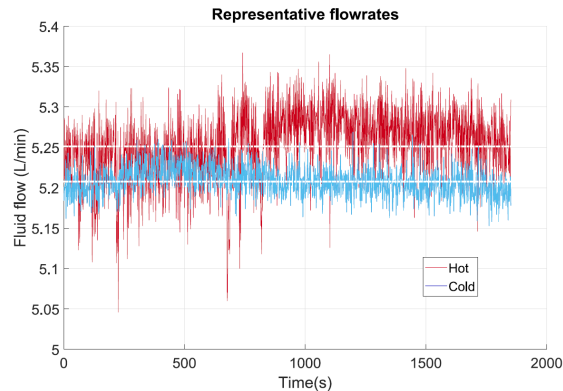
4. Echangeur à plaques et ailettes (contre-courant) : identification avec modèle ARX³



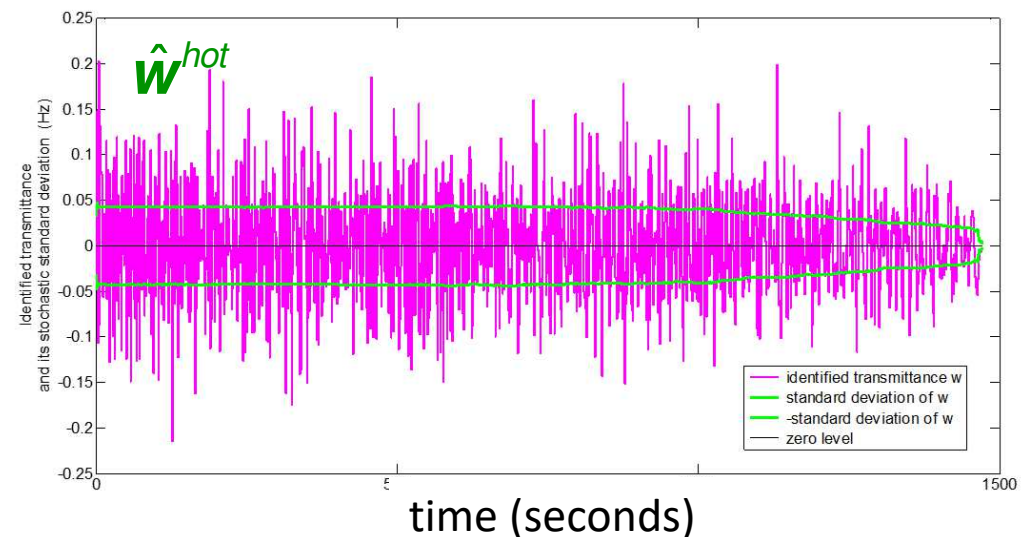
$$u(t) = T_{in}^{hot}(t) - T_{in}^{hot}(t=0) ; y^{hot}(t) = T_{out}^{hot}(t) - T_{out}^{hot}(t=0)$$

$$T_{in}^{cold}(t) = T_{in}^{cold}(t=0) ; y^{cold}(t) = T_{out}^{cold}(t) - T_{out}^{cold}(t=0)$$

$$y^{hot} = \mathbf{M}(u) w^{hot} ; y^{cold} = \mathbf{M}(u) w^{cold}$$



Régularisation TSVD inefficace: $m = 1471$ temps
924 valeurs singulières conservées pour $\mathbf{M}(y^{hot})$



[3] D. Maillet, C. Zacharie, B. Rémy,, Reduced ARX models and convolution product for heat transfer in times invariant systems (in French), *Proceedings of Congrès Français de Thermique 2021*, <https://doi.org/10.25855/SFT2021-049>

- Estimation d'une réponse impulsionnelle: PB inverse mal-posé du fait du bruit de mesure

- (biais sur maximum et oscillations)

$$\theta_{out}^{h,exact} = \mathbf{M}(\theta_{in}^{h,exact}) \mathbf{w}_{out}^{h,exact} \Rightarrow \hat{\mathbf{w}}_{out}^h = \left(\mathbf{M}(\theta_{in}^h) \right)^{-1} \theta_{out}^h$$

sortie y
entrée u
réponse impuls. h
estimation
bruit

- Alternative: remplacer $h(t)$ (rép. impuls.) par 2 jeux de coefficients, les a_i et les b_j avec éventuel retard τ (modèle **ARX** = **A**uto **R**egressive model with **eX**ternal input)

$$y_k = - \underbrace{\sum_{i=1}^{na} a_i y_{k-i}}_{\text{autoregressive terms}} + \underbrace{\sum_{j=0}^{nb-1} b_j u_{k-j-nk}}_{\text{external input terms}} + \underbrace{e_k}_{\text{equation error}}$$

m : nombre de temps de mesure
 $na \leq m$; $nb \leq m$; $n = na + nb \leq m$

$$t_k = k \Delta t ; y_k = y(t_k) ; u_k = u(t_k) ; \tau = n_k \Delta t$$

- Liens forts avec modèle convolutif⁴

- cas d'une transmittance:

$$w^{ss} = \frac{\sum_{j=1}^{n_b} b_j}{1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i} = \frac{\sum_{k=1}^m y_k}{\sum_{k=1}^m u_k}$$

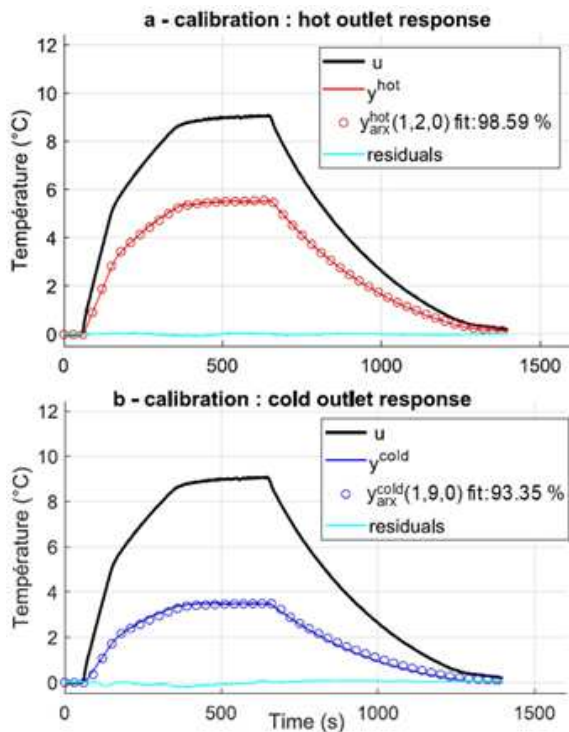
[4] D.Maillet, C. Zacharie, B. Rémy, Identification of an impulse response through a model of ARXstructure, Proceedings of the Intern. Conference of Inverse Problems in Engineering 2022 – To be published in Journal of Physics: Conference Series

- Identification des a et des b 's: expérience de calibration
- choix des na , nb and nk – Ici: balayage 2D des couples (na, nb) avec $nk = 0$ et $b_0 = 0$, pour $na + nb = 10$
- problème d'estimation linéaires ⁵ (moindres carrés): résidus faibles (% of fit) et stables mais solution non-unique

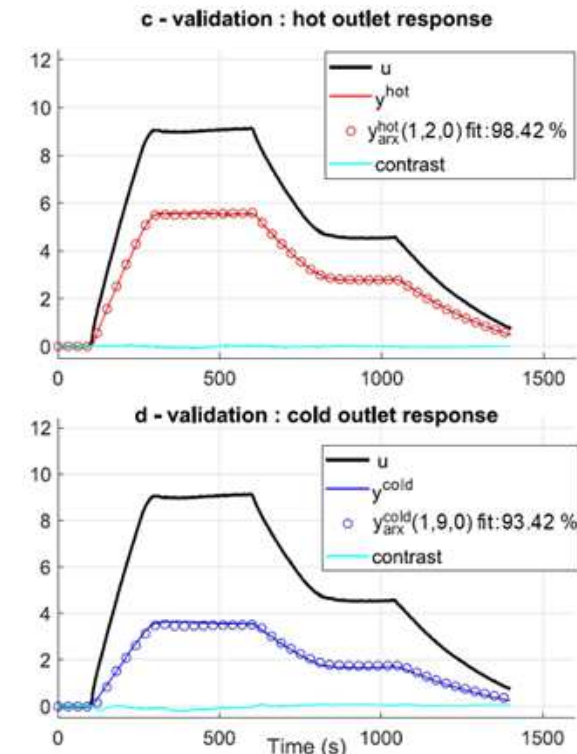
	a_1	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
Hot output model ARX (1,2,0)	-0.8956	0.1049	-0.0409	0	0	0	0	0	0	0
Cold output Model ARX (1,9,0)	-0.9716	0.0402	0.0029	0.0011	0.0426	-0,0880	0.0001	0.0551	0.0600	-0,1031

- besoin d'une expérience de validation : faible contraste/modèle identifié au départ

CALIBRATION EXPERIMENT



VALIDATION EXPERIMENT



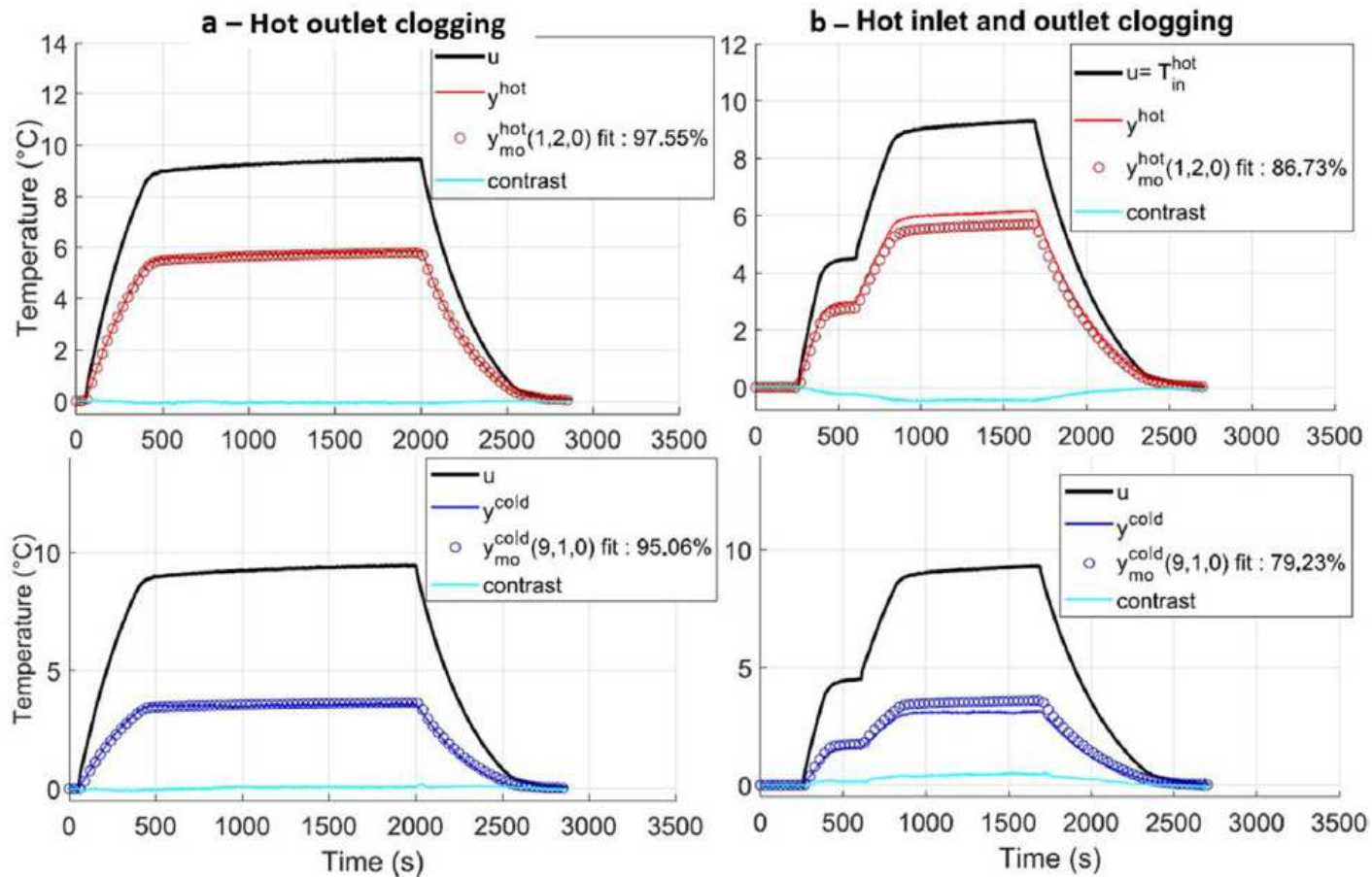
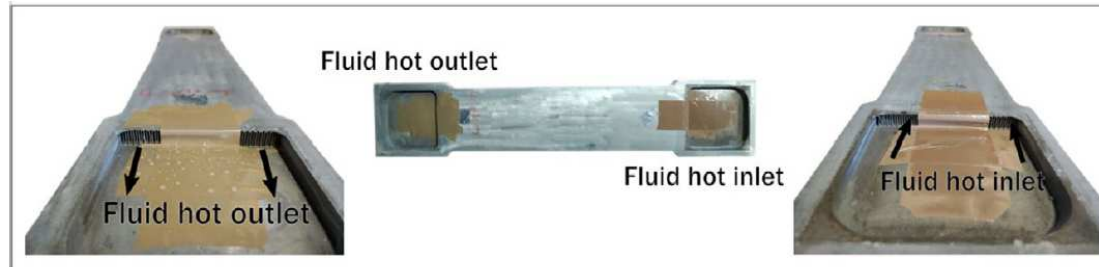
Le jeu de paramètres a et b estimés peut être « exporté » pour expliquer la sortie d'une autre expérience avec une autre entrée



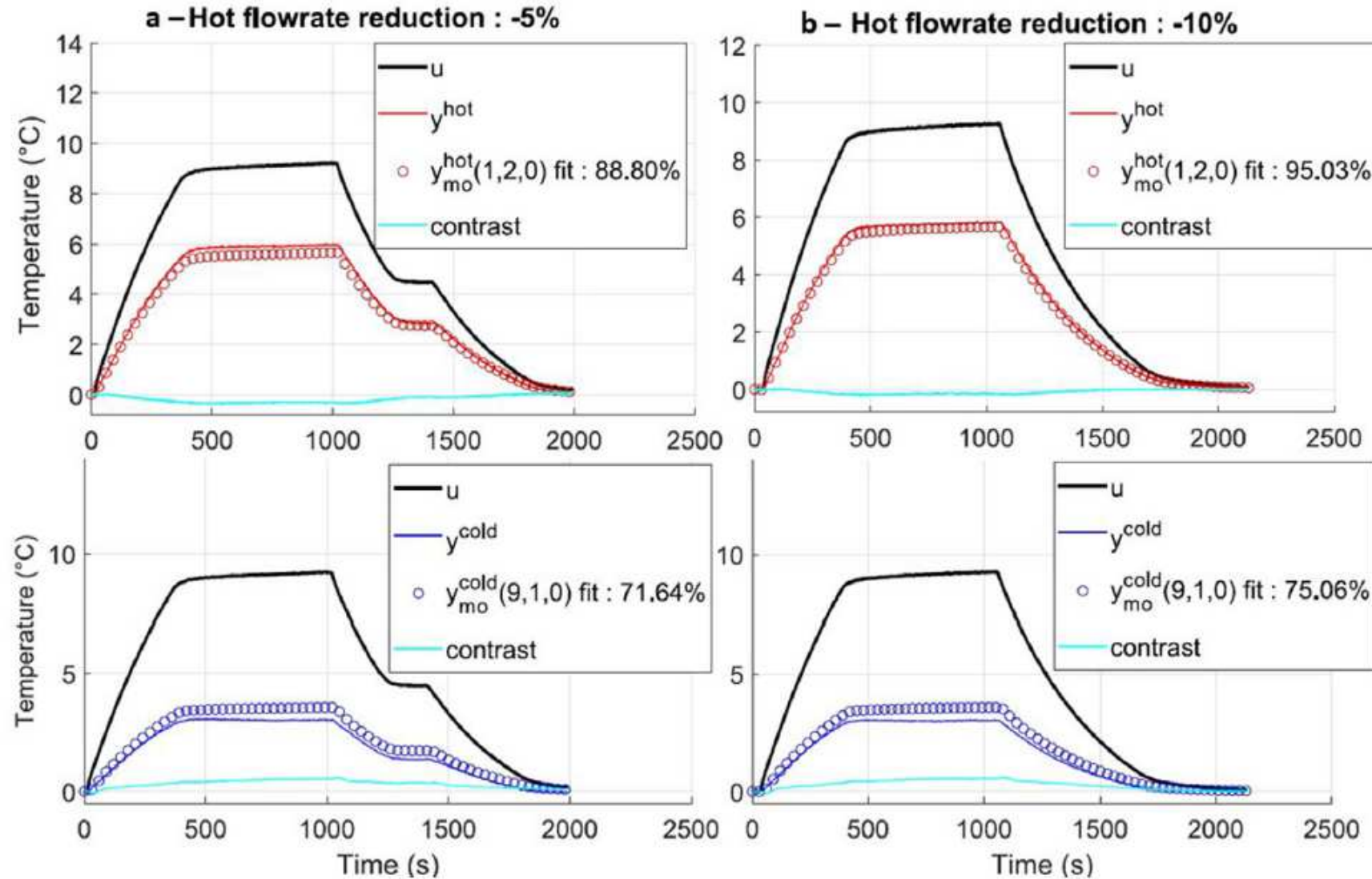
MAIS ce jeu n'est pas unique

[5] B. Rémy, D. Maillet, B. Sahnoun, Identification of Transfer Functions and of Boundary conditions, Tutorial TFB, METTI7 Advanced School, Thermal Measurements and Inverse Techniques, SFT, Porquerolles, Sept. 29-Oct.4, 2019.

Application 1: effet de la maldistribution (bouchage partiel)

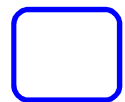


Application 2: étude d'une baisse du débit chaud



Exploitation quantitative: effet de l'encrassement/réduction d'un débit sur les efficacités

	Hot circuit			Cold circuit			Heat losses η_{losses}
	fit_{hot} (%)	transmittance w_{hot}^{SS} *	Effectiveness η_{hot}	fit_{cold} (%)	transmittance w_{cold}^{SS} *	effectiveness η_{cold}	
Calibration	98.59	0.613	0.387	93.35	0.384	0.384	0.003
Validation	98.42	0.613	0.387	93.42	0.380	0.380	0.007
Hot inlet clogging	97.55	0.616	0.384	95.06	0.379	0.379	0.005
Hot inlet and outlet clogging	86.73	0.660	0.340	79.23	0.318	0.318	0.022
Hot flowrate reduction: -5%	88.8	0.670	0.330	71.64	0.322	0.339	0.008
Hot flowrate reduction: -10%	95.03	0.640	0.360	75.06	0.341	0.379	0.019



= références



= impact sensible

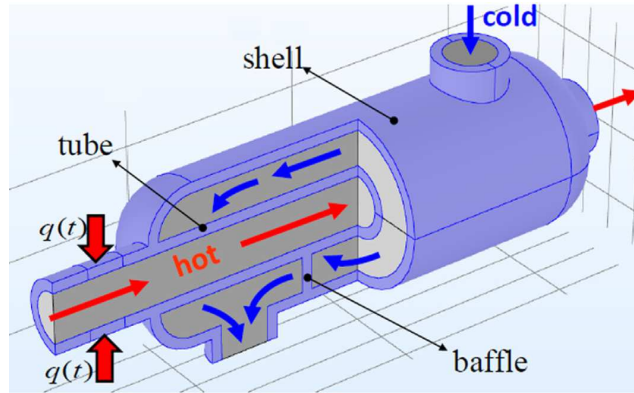
5. Conclusions et perspectives

- ❑ Méthode de **caractérisation thermique** du fonctionnement d'un échangeur en termes de transmittances:
 - **robuste**: les transmittances sont indépendantes de l'excitation en température d'entrée
 - peut s'appliquer "**en ligne**" :
 - les **transmittances temporelles** permettent d'accéder rapidement aux **efficacités** (régime permanent)
- ❑ Les perturbations en température peuvent être suffisamment faibles (**quelques K**)
 - le système reste convolutif car **thermodépendance de la viscosité négligeable** (hypothèse de système linéaire à coefficients invariants en temps)
- ❑ Le modèle convolutif ne repose sur aucune hypothèse de densité de flux pariétal perpendiculaire à la paroi: les effets **de transferts conjugués fluide/paroi** sont implicitement pris en compte
 - intérêt pour les **échangeurs courts** et pour les **mini** et **micro échangeurs**
- ❑ La présence d'un **encrassement** suffisamment important est **déTECTABLE** et **quantifiable** par une variation d'efficacité déduite d'une variation de transmittance (suivi en ligne).
- ❑ Le modèle ARX permettent une alternative au modèle convolutif lorsque la calibration de ce dernier est impossible. Travail en cours sur estimation de réponse impulsionnelle par **déconvolution non isochrone**.

Merci pour votre attention !

Model reduction (no noise, no measurement) ⁶

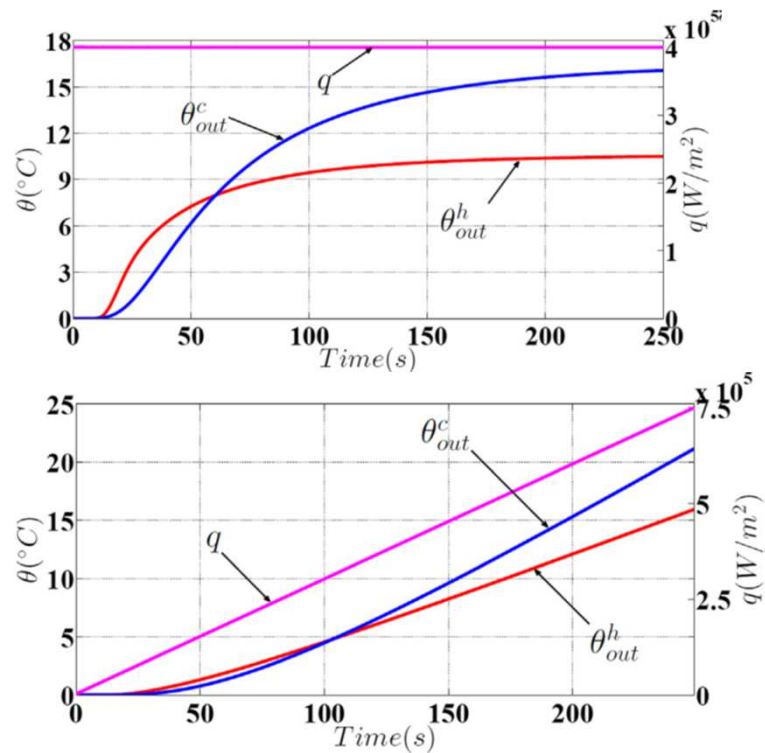
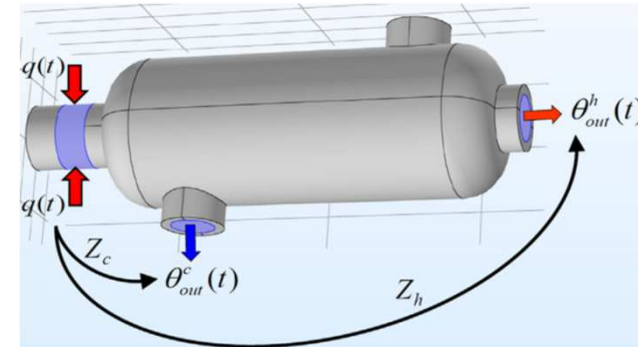
Shell & Tube HX- SIMO case



Detailed model (Comsol)

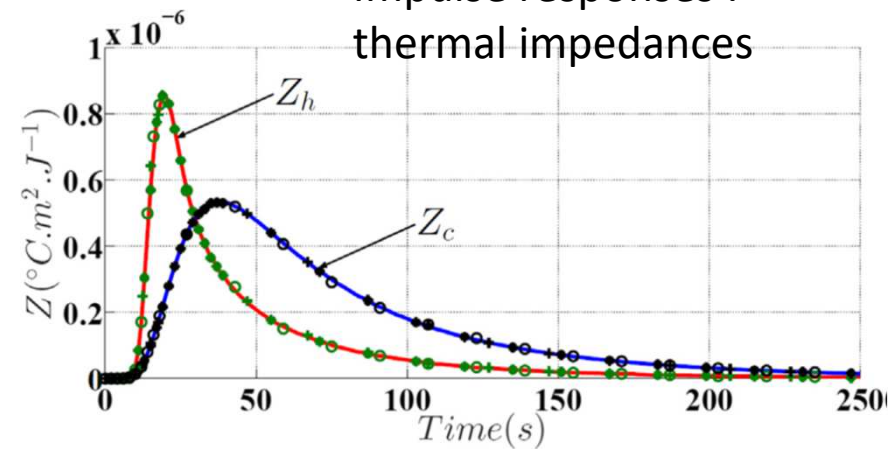
Navier Stokes+ $k - \epsilon$ turbulence model

Heat equation in fluid and solid (conjugate HT)



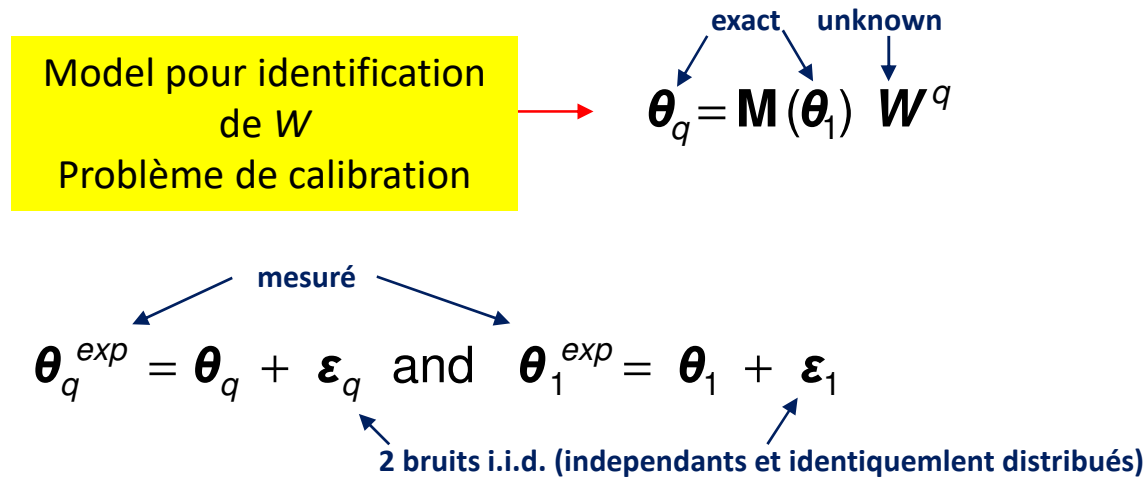
Reduced model : convolution

Impulse responses :
thermal impedances



[6] W. Al Hadad, V. Schick, D. Maillet, Fouling detection in a shell and tube heat exchanger using variation of its thermal impulse responses: Methodological approach and numerical verification, *Applied Thermal Engineering*, Volume 155 (2019) 612–619.

Estimation de fonction de transfert: réduction de modèle ou **identification (mesures)**



- Moindres carrés ordinaires (linéaires) : $\hat{W}^q = \left(\mathbf{M}(\theta_1^{exp}) \right)^{-1} \theta_q^{exp}$

Problème inverse « mal-posé »:
Inversion nécessite une **regularisation**
Ici: SVD tronquée ou Tikhonov d'ordre 0

- avec le **principe de non-contradiction** (discrepancy principle, Morozov)

Model for W identification calibration problem:

$$\theta_q = \mathbf{M}(\theta_1) \mathbf{W}^q$$

exact
unknown

$$\theta_q^{exp} = \theta_q + \epsilon_q \quad \text{and} \quad \theta_1^{exp} = \theta_1 + \epsilon_1$$

measured

2 i.i.d. and independent noises

- Ordinary least squares: $\hat{\mathbf{W}}^q = \left(\mathbf{M}(\theta_1^{exp}) \right)^{-1} \theta_q^{exp}$
- SVD decomposition of **square** sensitivity matrix:

$$\mathbf{M}(\theta_1^{exp}) = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad \text{with} \quad \mathbf{S} = \text{diag}(s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_m)$$

singular values

Ill-posed problem:
Inversion needs **regularization**
Here: Truncated SVD or 0 order Tikhonov

-TSVD: $\hat{\mathbf{W}}_\alpha^q = \mathbf{V} \mathbf{S}_\alpha^{-1} \mathbf{U}^T \theta_q^{exp}$ with $\mathbf{S}_\alpha^{-1} = \text{diag}(1/s_1 \quad 1/s_2 \quad \dots \quad 1/s_\alpha \quad 0 \quad \dots \quad 0)$

- Zero order Tikhonov: $\hat{\mathbf{W}}_\mu^q = \text{Arg} \left(\min_{\mathbf{W}} \left(\underbrace{\| \mathbf{r}(\mathbf{W}) \|_2^2}_{\text{ordinary least squares sum}} + \mu \| \mathbf{W} \|_2^2 \right) \right)$ where $\mathbf{r}(\mathbf{W}) \equiv \theta_q^{exp} - \mathbf{M}(\theta_1^{exp}) \mathbf{W}$
residual vector

or: $\hat{\mathbf{W}}_\mu^q = \mathbf{V} \mathbf{S}_\mu^{-1} \mathbf{U}^T \theta_q^{exp}$ with $\mathbf{S}_\mu^{-1} = \mathbf{F}_\mu \mathbf{S}$ where $\mathbf{F}_\mu = \text{diag} \left(\frac{s_1^2}{\mu^2 + s_1^2} \quad \frac{s_2^2}{\mu^2 + s_2^2} \quad \dots \quad \frac{s_m^2}{\mu^2 + s_m^2} \right)$

- Choice of the hyperparameters $\gamma = \alpha$ or μ by **discrepancy principle** (Morozov) : $\| \mathbf{r}(\hat{\mathbf{W}}_\gamma) \|_2^2 \approx m \sigma^2$

standard deviation of ϵ_q ²⁸

Forme vectorielle /matricielle d'un produit de convolutionZ

Continuous time domain:

$$y(t) = (h * u)(t)$$

$$\mathbf{M}(z) \equiv \Delta t \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 & & & & \\ \tilde{z}_2 & \tilde{z}_1 & & & 0 \\ \tilde{z}_3 & \tilde{z}_2 & \tilde{z}_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ \tilde{z}_m & \tilde{z}_{m-1} & \tilde{z}_{m-2} & \cdots & \tilde{z}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y(t_1) \\ y(t_2) \\ \vdots \\ y(t_m) \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_m \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix}$$

valeurs instantannées

valeurs moyennées sur chaque intervalle temporel

$$\tilde{z}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{i-1}}^{t_i} z(t) dt \approx \frac{1}{2} (z(t_{i-1}) + z(t_i))$$

En **maths**, $\mathbf{M}(z)$ est une **matrice de Toeplitz triangulaire inférieure**

En thermique (**physique**) : $z(t) = h(t)$ ou $u(t)$

Réponse impulsionnelle $h(t) \geq 0 \rightarrow$ coefficients de $\mathbf{M}(h)$ sont **non-negatifs**

$$\mathbf{y} = \mathbf{M}(u) \quad \mathbf{h} = \mathbf{M}(h) \quad \mathbf{u} \quad \text{Commutativité}$$

Cas spécifique (transmittance):

$$h \equiv w, \quad u \equiv \theta_1, \quad y \equiv \theta_2$$

$$\theta_2 = \mathbf{M}(\theta_1) \quad w = \mathbf{M}(w) \theta_1$$

Vector/matrix form of a discrete convolution product

Introduction of a square matrix, function \mathbf{N}
(.) that depends on a column-vector \mathbf{x} :

$\mathbf{N}(\mathbf{x})$ is a **Lower Triangular Toeplitz matrix (LTTM)**
(nice mathematical properties: set of LTTM = commutative ring⁷)

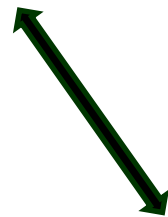
$$\mathbf{N}(\mathbf{x}) \equiv \begin{bmatrix} x_1 & & & & \\ x_2 & x_1 & & & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ x_k & x_{k-1} & x_{k-2} & \cdots & x_1 \end{bmatrix}$$

Continuous time domain:

$$y(t) = (h * u)(t)$$

Laplace domain :

$$\bar{y}(p) = \bar{h}(p) \bar{u}(p)$$



Discrete vector form :

$$\mathbf{y} = \mathbf{N}(\hat{h}) \quad \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{N}(\tilde{\mathbf{u}}) \quad \hat{h} \quad \hat{\mathbf{x}} = \Delta t \tilde{\mathbf{x}}$$

\mathbf{y} : vector of instant values of output $y_k = y(t_k)$



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]

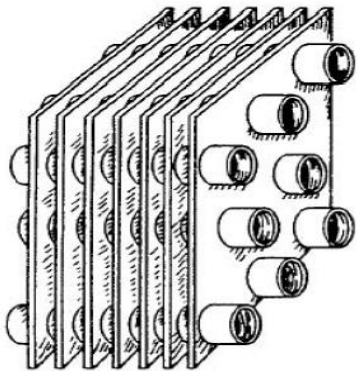


Figure 1.2 Echangeur à tubes et ailettes [3]

1 – Contexte de l'étude

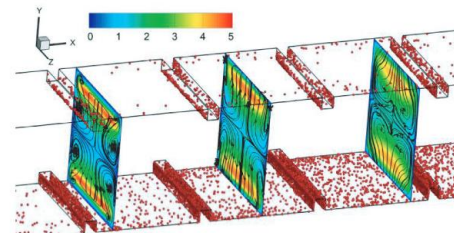
La formation et l'arrachement des particules a un effet majeur sur l'efficacité et la sûreté de multiples applications industriels

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

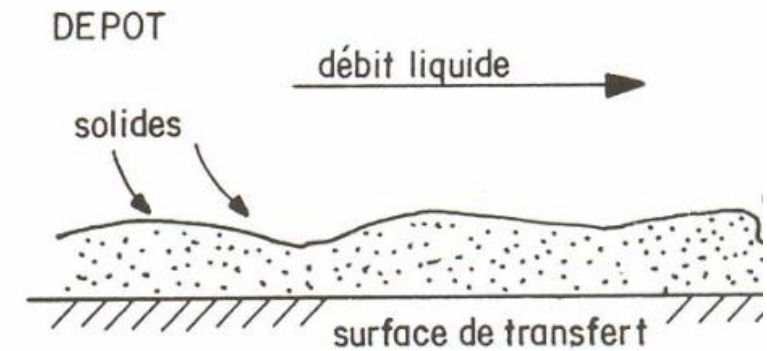
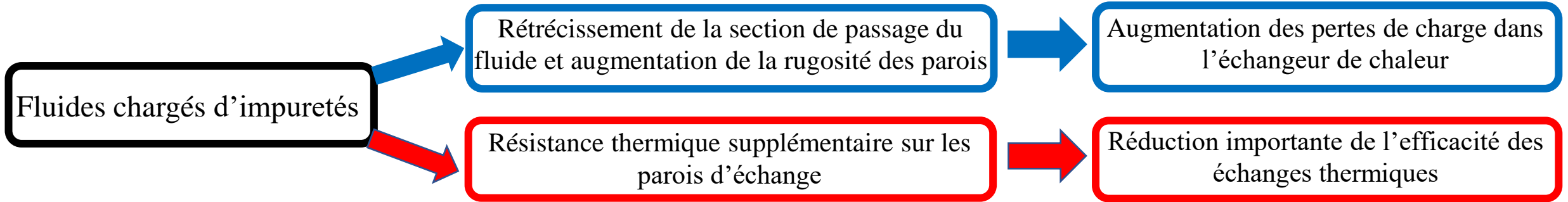


Figure 2: Encrassement des échangeurs de chaleur [4], [5]

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]

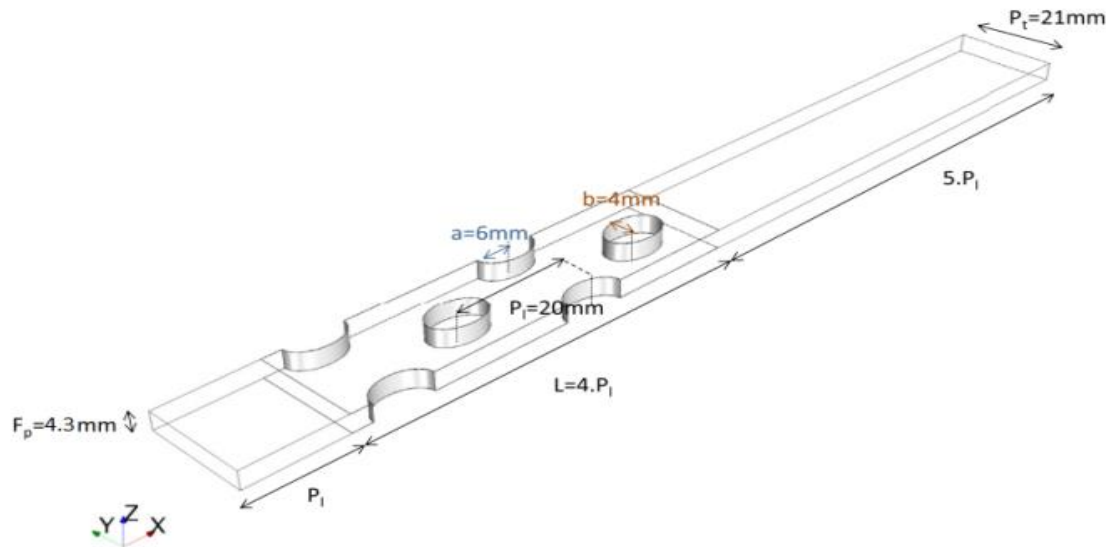


Figure 3: *Domaine d'étude [1].*

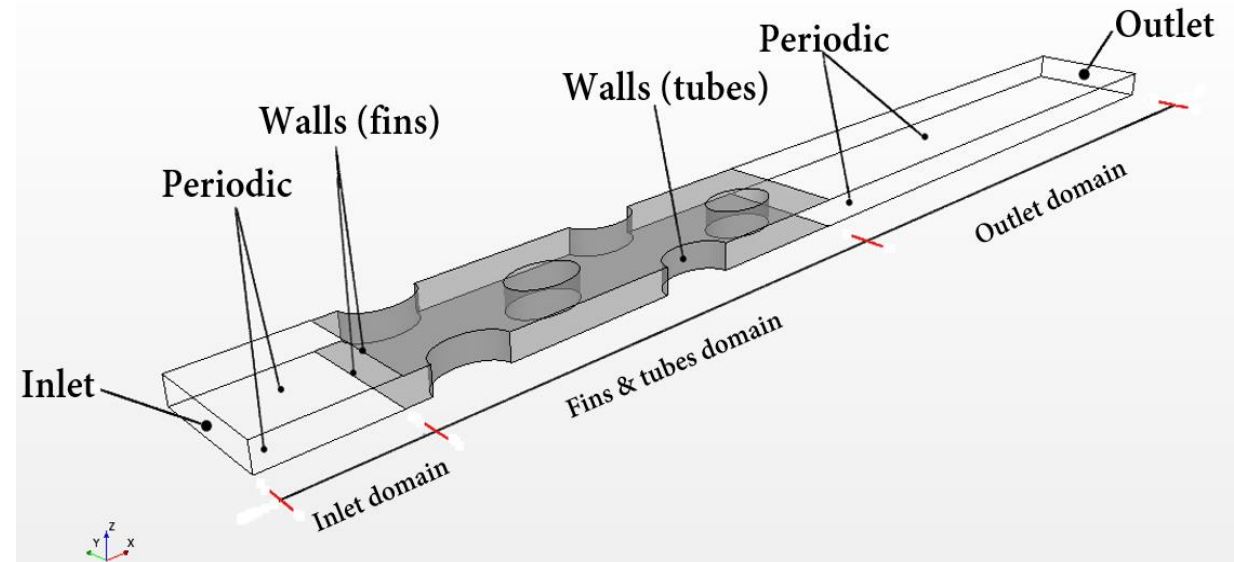


Figure 4: *Conditions aux limites.*

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 :

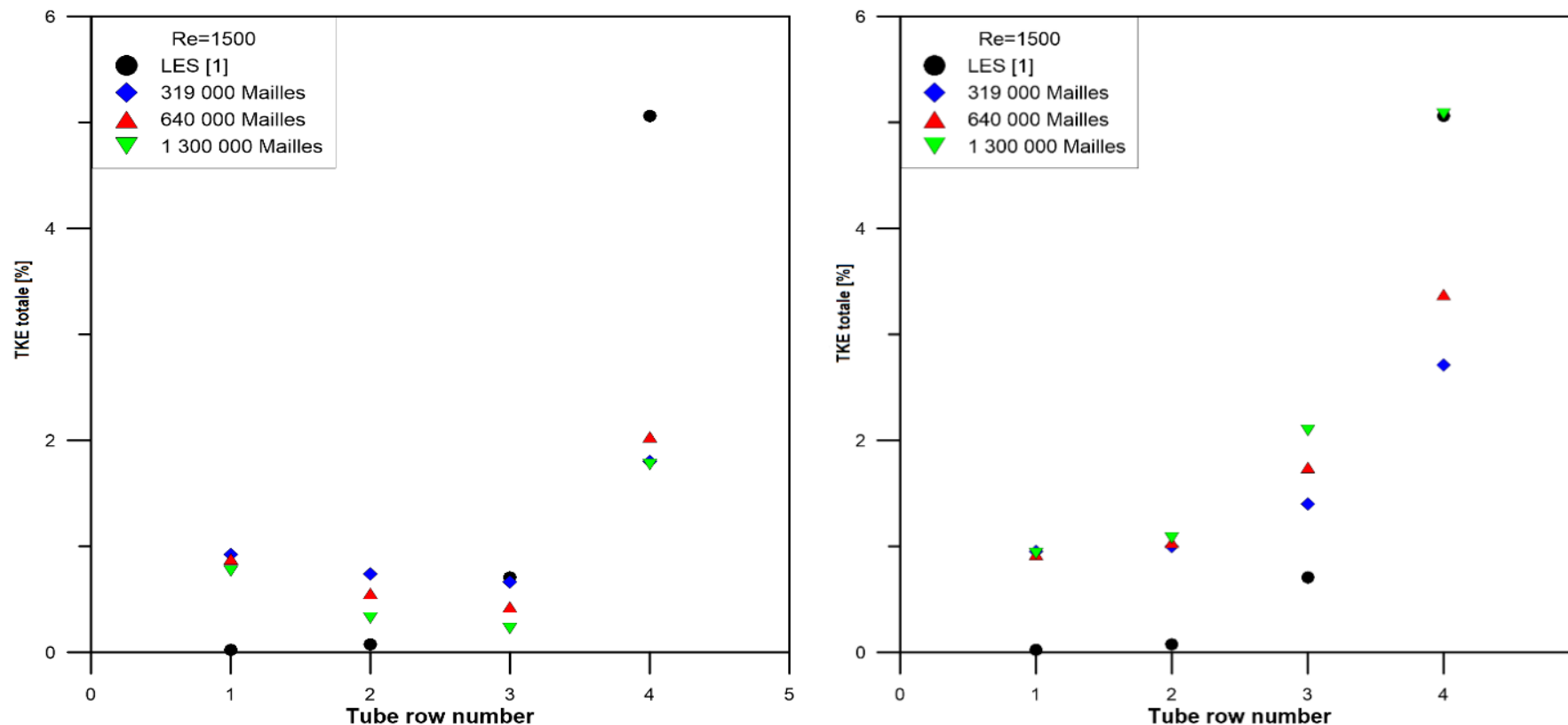


Figure 5: Influence du maillage sur les résultats de la TKE totale pour un $Re=1500$ (maillage polyédrique non-structuré à gauche et hexaédrique structuré à droite).

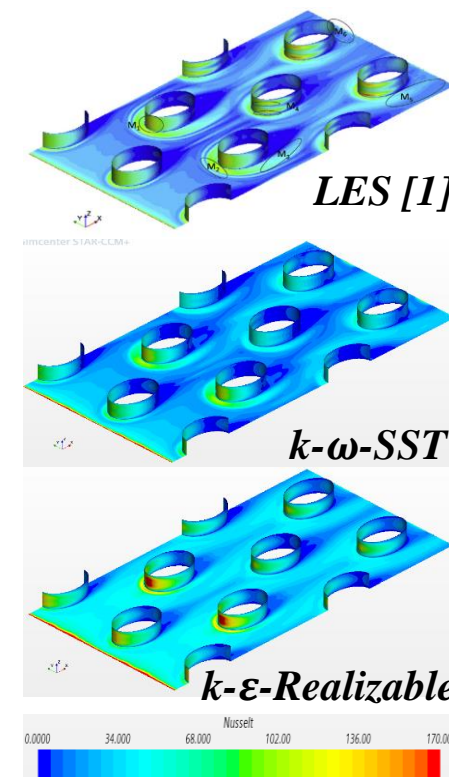


Figure 6 : Contours de nombre de Nusselt local obtenu pour $Re=2500$



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 ($\text{Re} = U_{in} * 2b/v$)

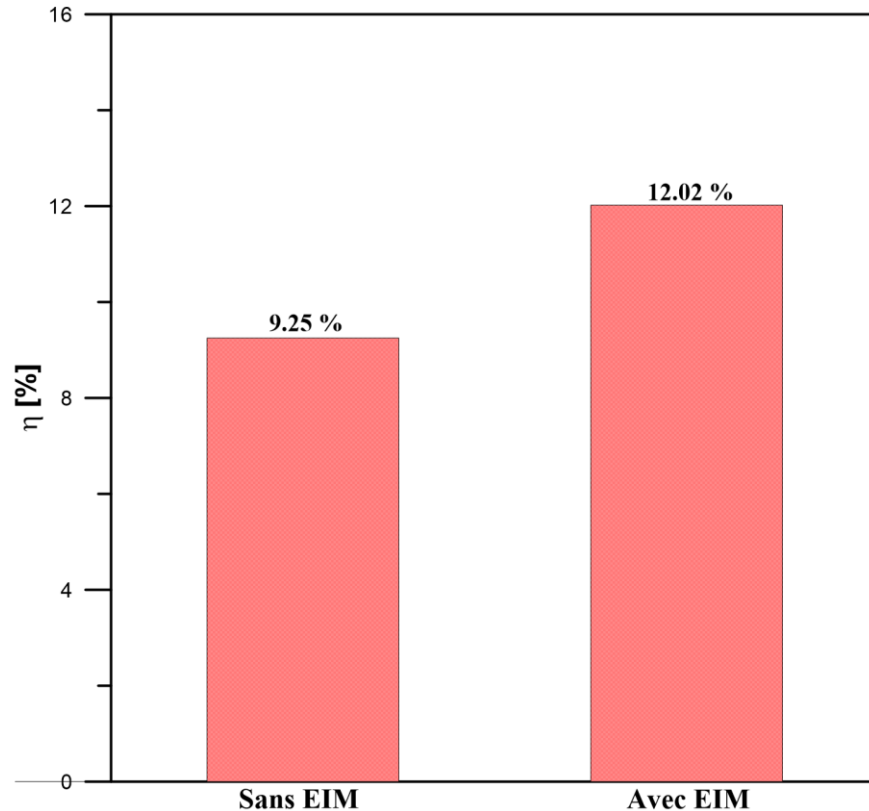


Figure (7): Taux de dépôt de particules avec et sans la dispersion turbulente.

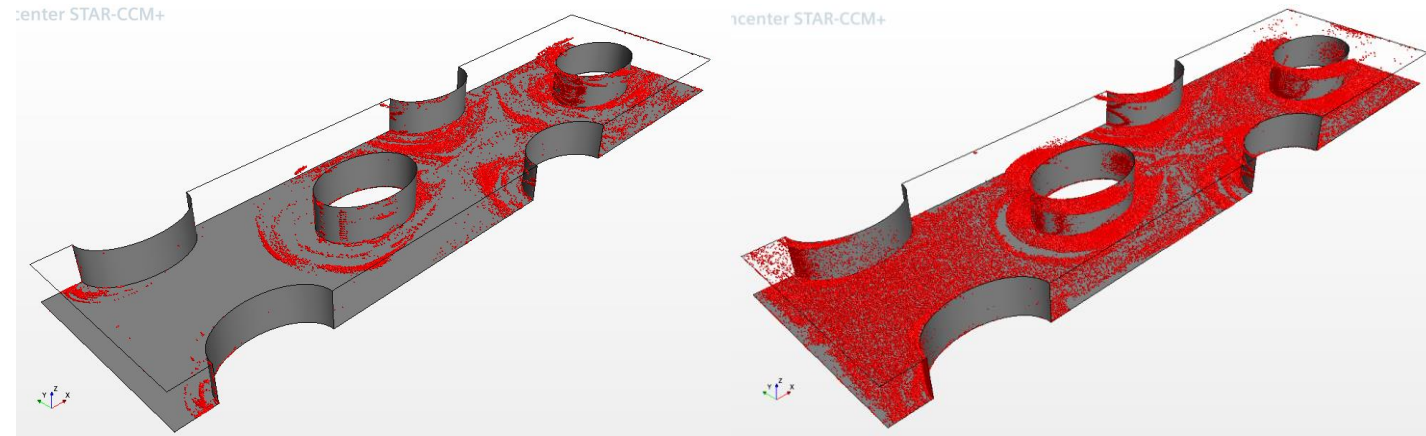


Figure 8 : Distribution des particules déposées (sans EIM à gauche, avec EIM à droite). Mise évidence en rouge les particules déposées.

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 $Re=1500$.

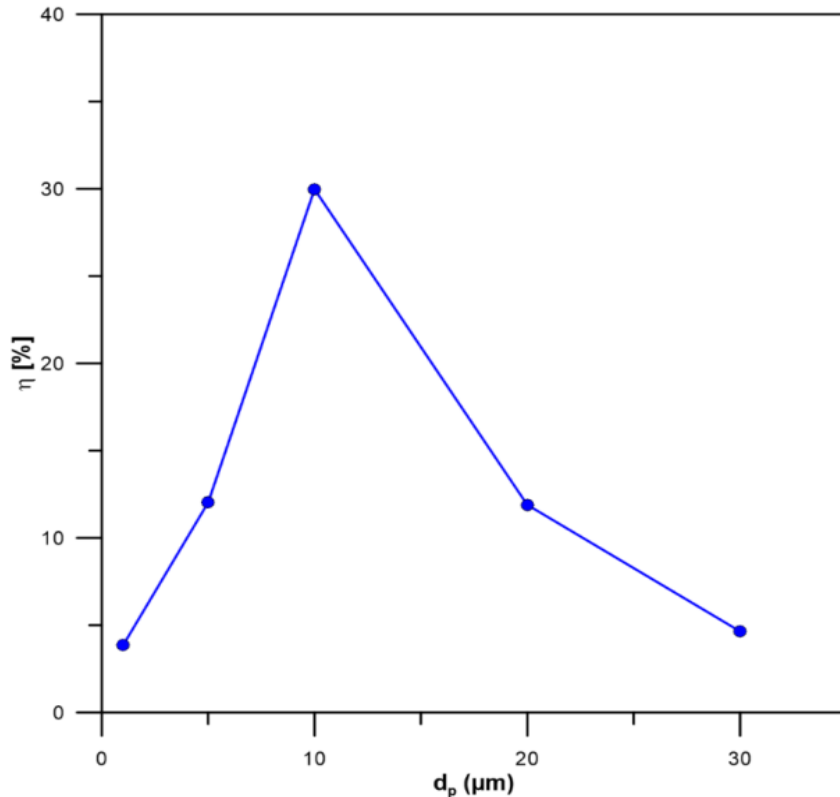


Figure 9: Evolution du taux de dépôt en fonction du diamètre des particules injectées

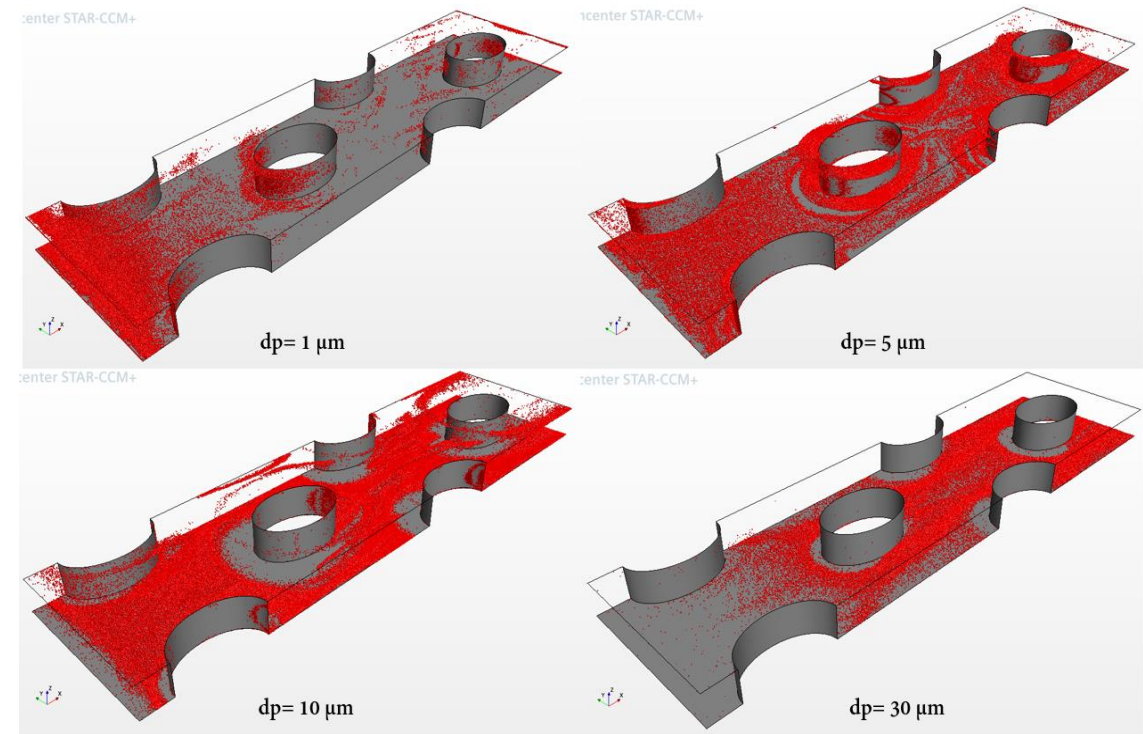


Figure 10 : Distribution de dépôt pour différents diamètres de particules injectées ($Re=1500$).



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 $Re=500; 1500; 2500; 3500; 4500$
- $d_p = 5 \mu m$

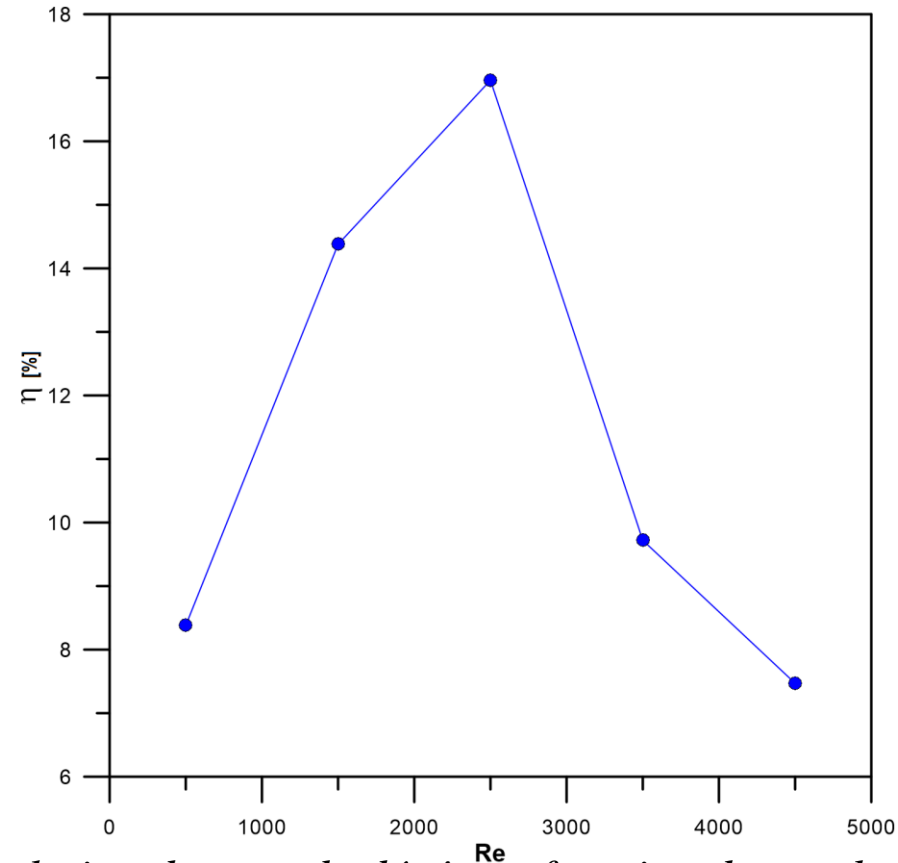


Figure 11 : Evolution du taux de dépôt en fonction du nombre de Reynolds



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

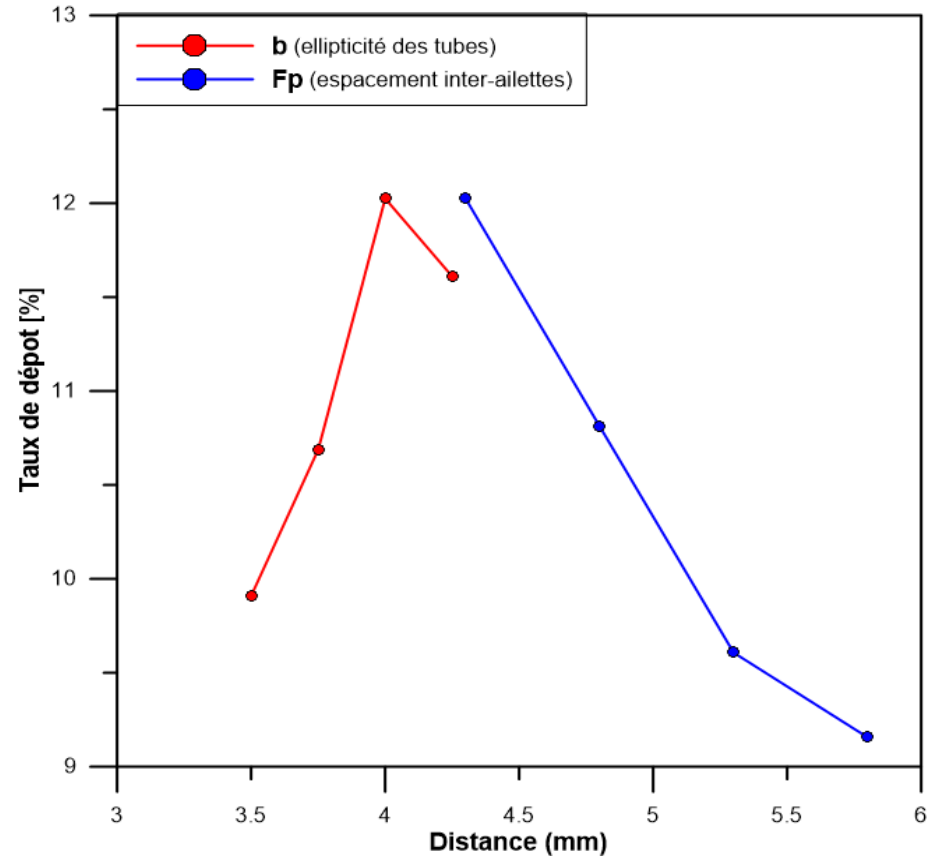


Figure 12 : Effet de l'espacement entre ailettes et de l'ellipticité des tubes sur le taux de dépôt des particules

10 – Effet du dépôt des particules sur le transfert thermique

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

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

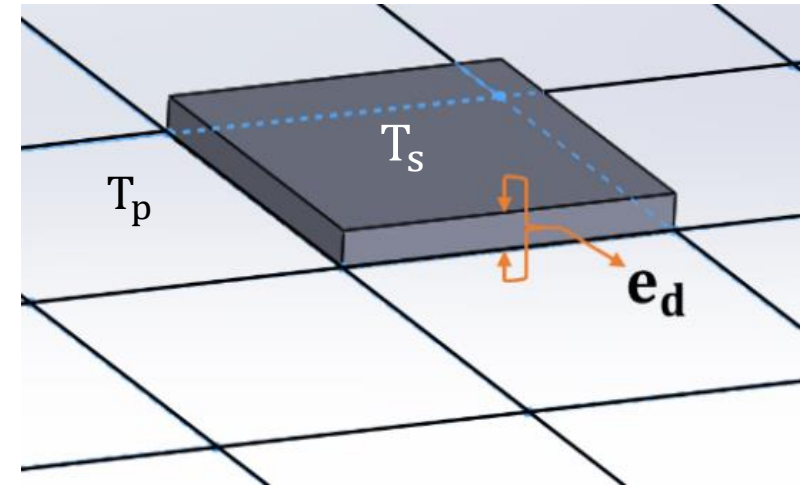
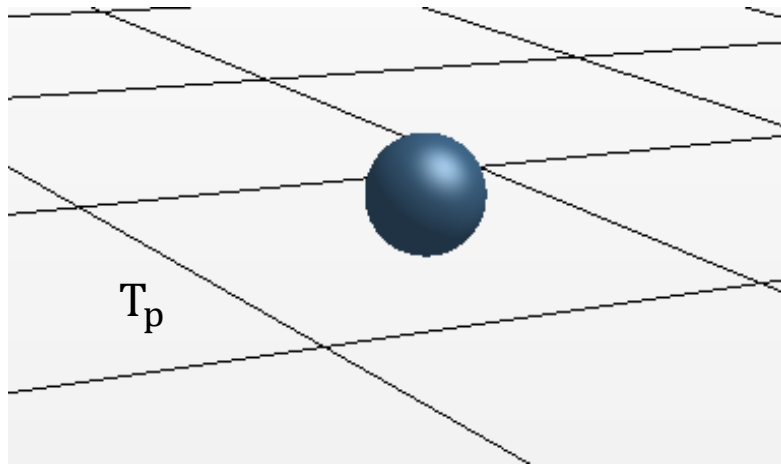


Figure 13: Dépôt de la particule sur une maille (gauche), épaisseur de dépôt équivalent (droite).

- 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.

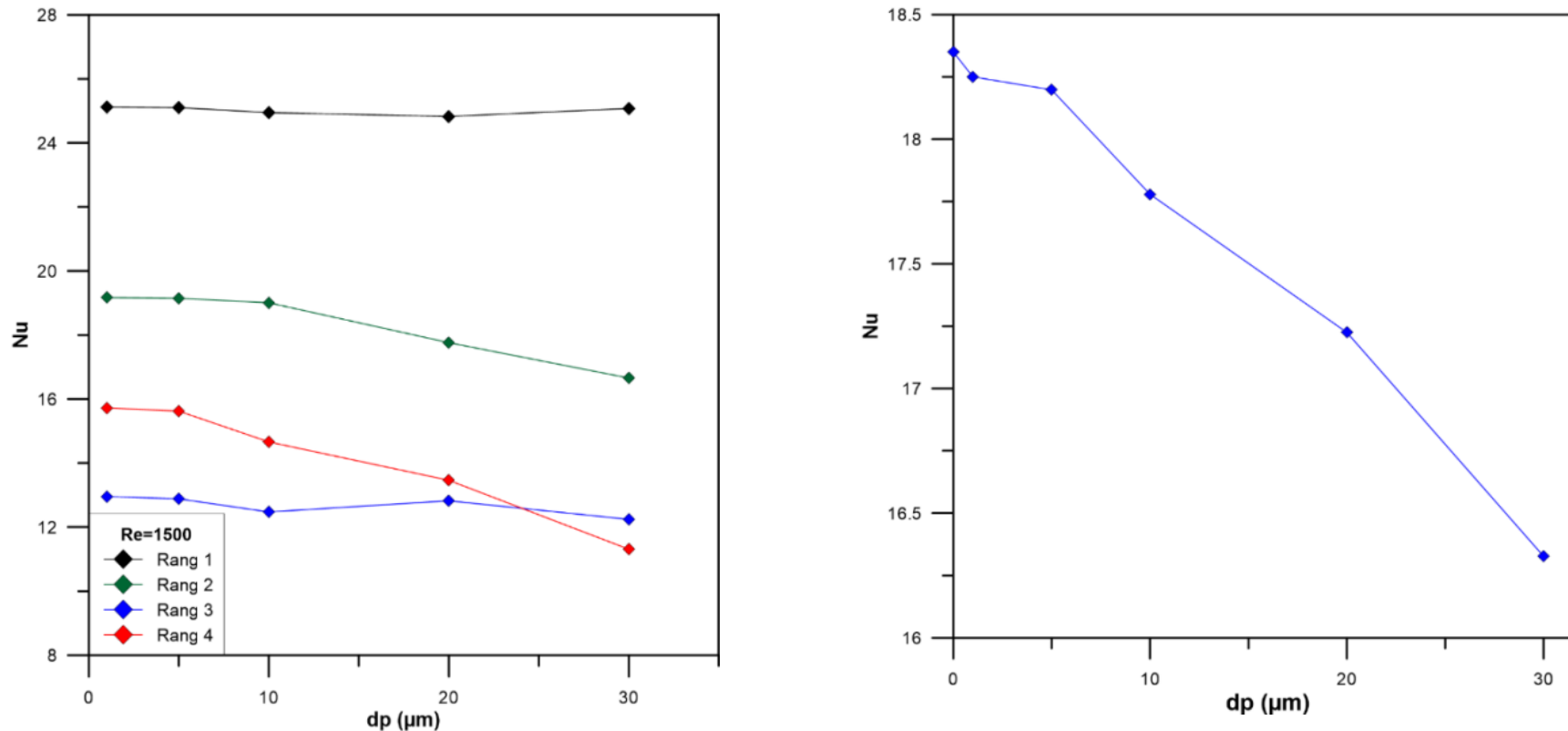


Figure 14 : Effet du dépôt sur le nombre de Nusselt local (à gauche) et le nombre de Nusselt global (à droite) ($Re=1500$).

- 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...**



Échangeurs-stockeurs de type thermocline destinés à la récupération et la valorisation de chaleur fatale



Régis OLIVÈS

olives@univ-perp.fr





Plan

Introduction

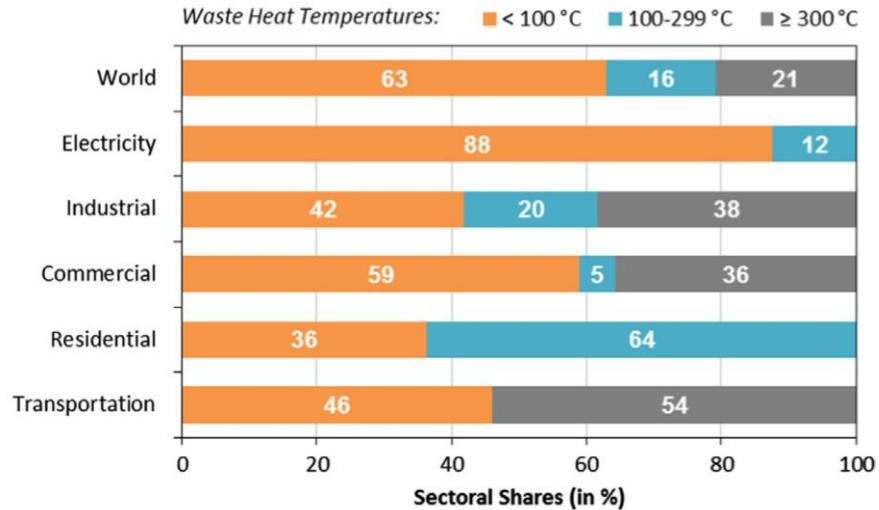
Échangeur-stockeur de type thermocline

Modélisation du stockage

Optimisation multi-objectifs

Conclusion

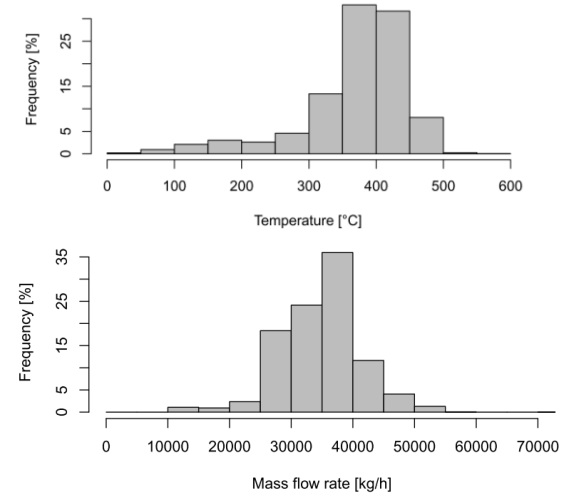
Introduction : les enjeux



➤ 25 000 - 35 000 TWh de chaleur fatale (>100°C)

C. Forman et al.. 2016

Difficulté : la variabilité du gisement



L. Battisti et al.. 2015

Besoin d'une solution de stockage haute température
→ Lisser le gisement
→ Adéquation production / consommation

Quel usage ?

En France



36%

de la consommation
de combustibles
de l'industrie est

perdue
sous forme
de chaleur
soit
109,5
TWh*



Connectée aux réseaux
de chaleur urbains



Cette chaleur peut être
collectée et valorisée

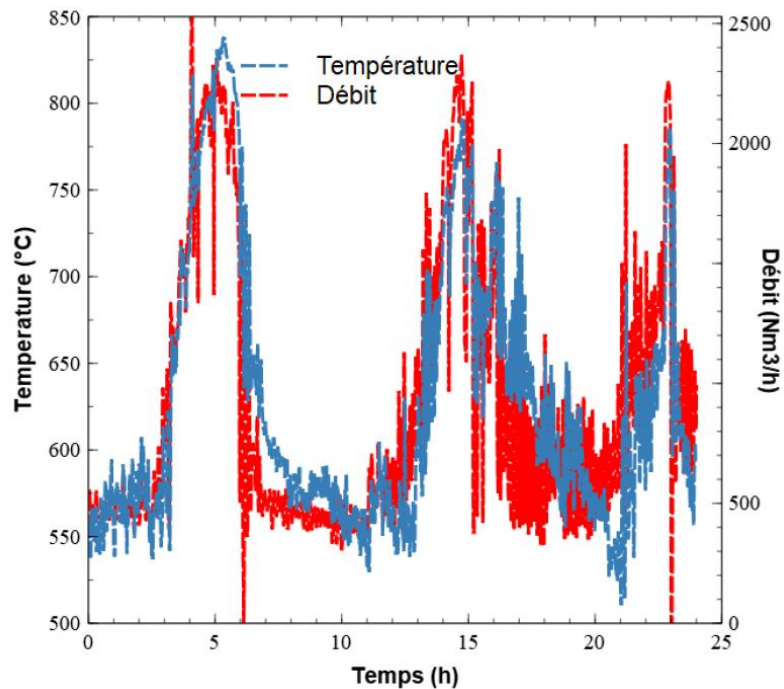
Réutilisée dans l'industrie
pour d'autres processus

Production d'électricité ⚡

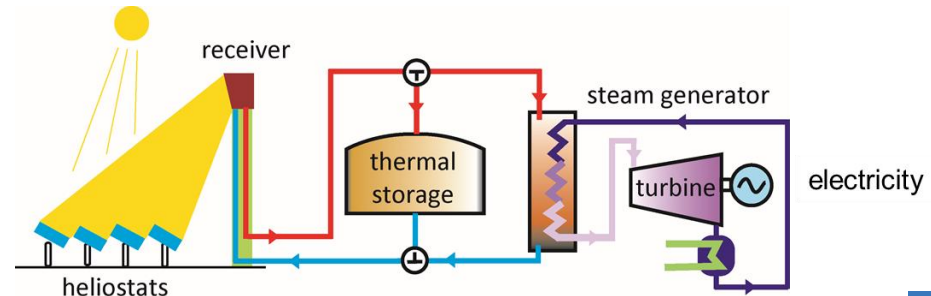
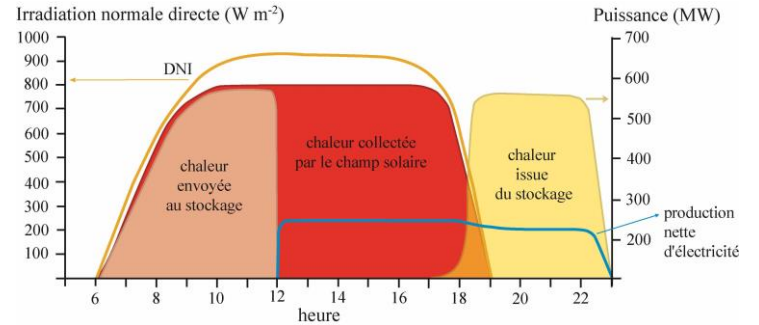
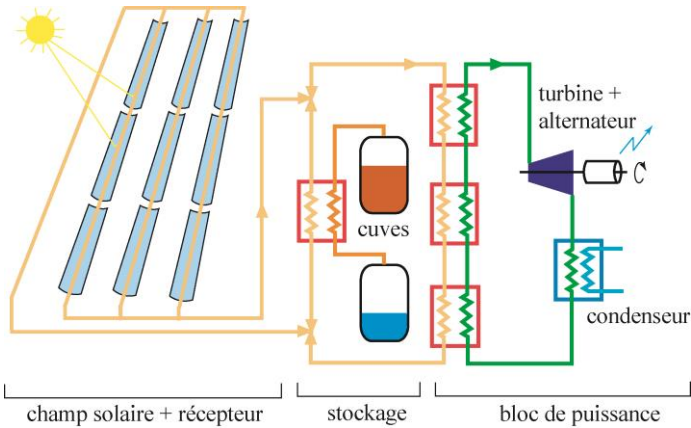


Stockage d'énergie pour la récupération et la valorisation de chaleur fatale industrielle

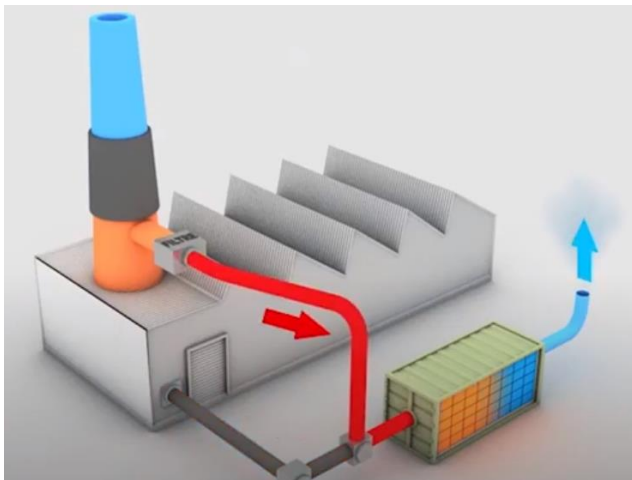
Exemple d'un gisement de chaleur d'une aciérie



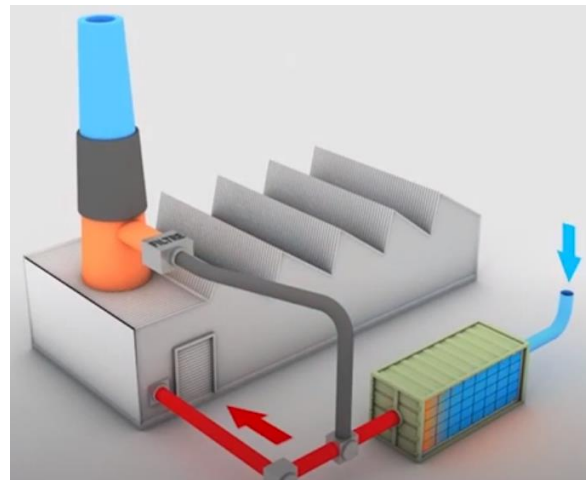
Stockage d'énergie pour centrales solaires



Stockage d'énergie pour la récupération et la valorisation de chaleur fatale industrielle

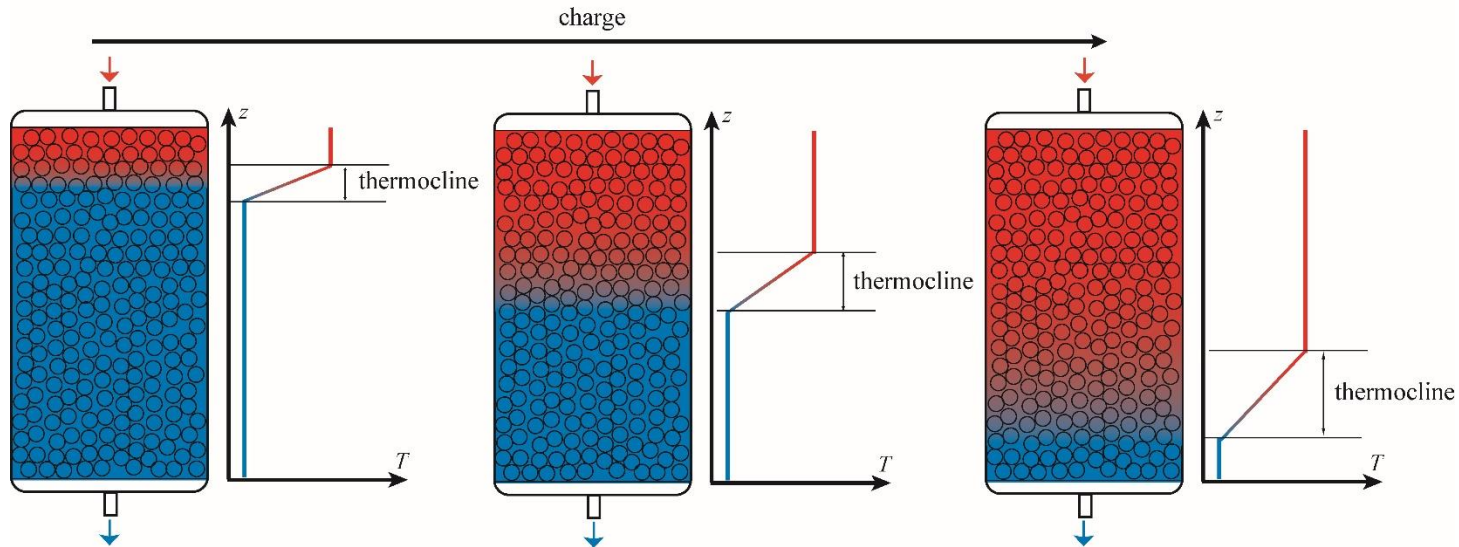


Charge



Décharge

Échangeur-stockeur de type thermocline

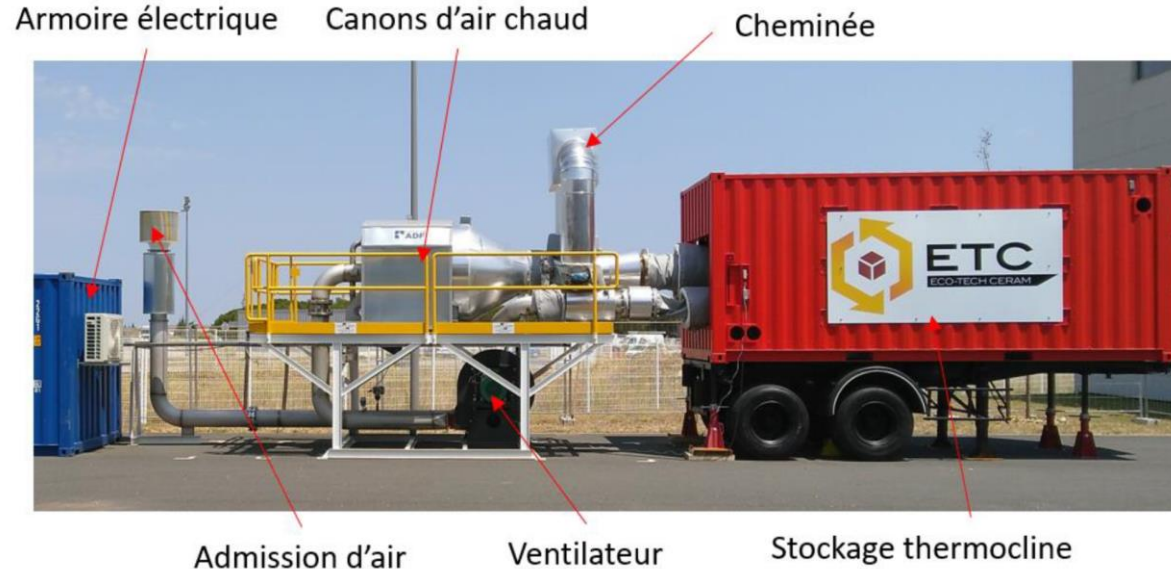


Modélisation

- ➔ dimensionnement
- ➔ optimisation
- ➔ contrôle – commande
- ➔ intégration dans un réseau

Stockage thermocline

Unité de stockage industrielle : Ecostock



Capacité de stockage :
1.9 MWh_{th} (à 525°C)

Puissance de charge :
300 kW_{th}

Dimension de la cuve :
3.08 x 1.70 x 1.70 m³

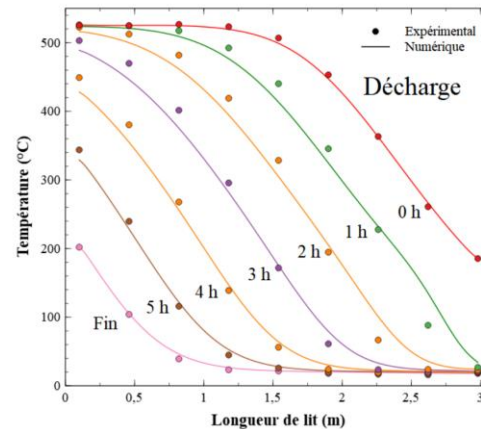
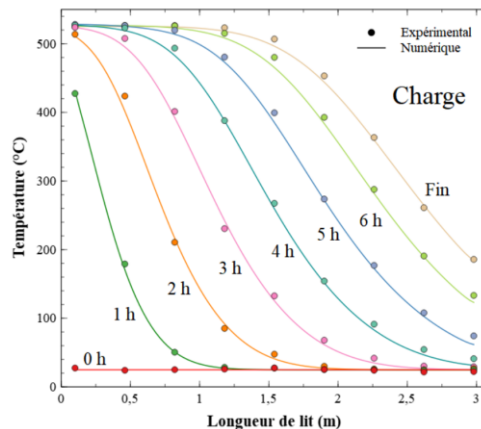
Matériaux :
16 tonnes de bauxite
particules de Ø 30 mm
porosité : 40%

Stockage thermocline : modélisation

Modèle à deux températures :

Fluide :
$$\varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_{eff,f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - u_f \varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_c A_{sf} (T_s - T_f)$$

Solide :
$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff,s} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_c A_{sf} (T_f - T_s)$$



Stockage thermocline : intégration au réseau

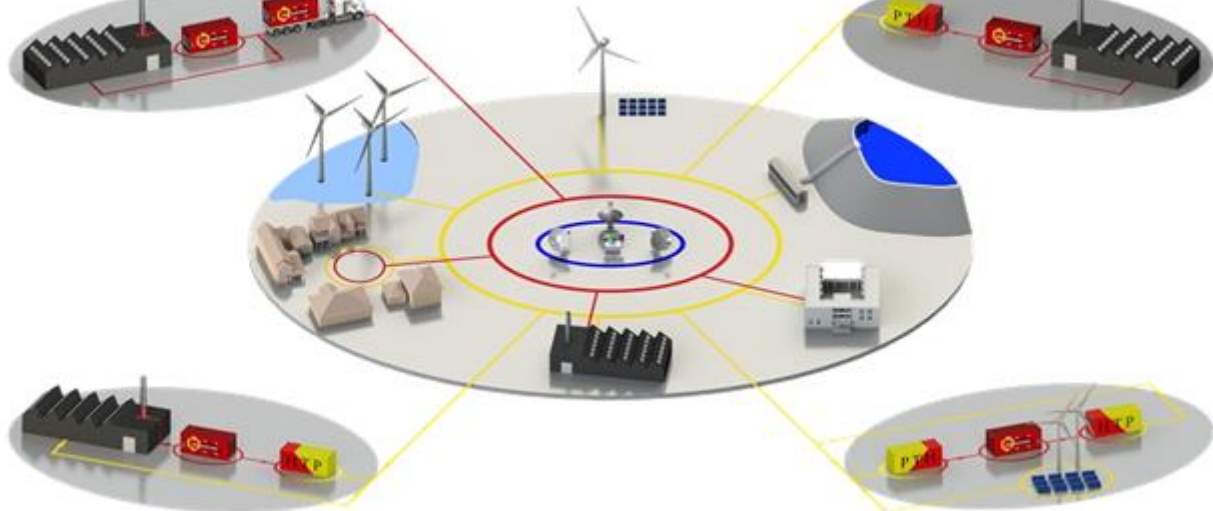
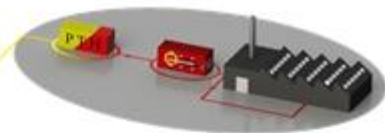
Heat to Heat

Valorisation thermique de chaleur industrielle



Power to Heat

Convertir l'électricité en chaleur décarbonée haute température



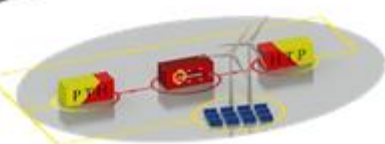
Heat to Power

Valorisation électrique de chaleur industrielle



Power to Power

Un stockage multi-énergie



Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann :

$$\text{Fluide :} \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{NUT}{L}(T_s - T_f) - \frac{m_f}{\dot{m}_f L} \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

$$\text{Solide :} \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = NUT \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} (T_f - T_s)$$

$$\text{C.L. \& C.I. :} \quad T_s(x, 0) = T_f(x, 0) = T_{s0} \quad \text{et} \quad T_f(0, t > 0) = T_{f,in}$$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann :

$$\text{Fluide :} \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{NUT}{L}(T_s - T_f) - \frac{m_f}{\dot{m}_f L} \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

$$\text{Solide :} \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = NUT \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} (T_f - T_s)$$

$$\text{C.L. \& C.I. :} \quad T_s(x, 0) = T_f(x, 0) = T_{s0} \quad \text{et} \quad T_f(0, t > 0) = T_{f,in}$$

Adimensionnalisation en température, en espace et en temps

$$\theta = \frac{T - T_{s0}}{T_{f,in} - T_{s0}} \quad \chi = St. \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} \frac{x}{L} \quad \tau = St. \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} t$$

Nombre de Stanton, surface d'échange et section d'écoulement :

$$St = \frac{h \cdot S_{eclt}}{\dot{m}_f \cdot C_f} = NUT \frac{S_{eclt}}{S_{ech}} \quad St = \frac{2}{Re_D \cdot Pr} + \frac{1.1}{Re_D^{0.4} Pr^{2/3}} \quad \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} = \frac{6 \cdot L \cdot (1 - \epsilon)}{D \cdot \epsilon}$$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann adimensionnel :

$$\begin{cases} \text{Fluide : } \frac{\partial \theta_f}{\partial \chi} = \theta_s - \theta_f \\ \text{Solide : } \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \theta_f - \theta_s \end{cases}$$

avec $\theta_s(\chi, 0) = \theta_f(\chi, 0) = 0$ et $\theta_{f,in} = 1$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée – solution analytique

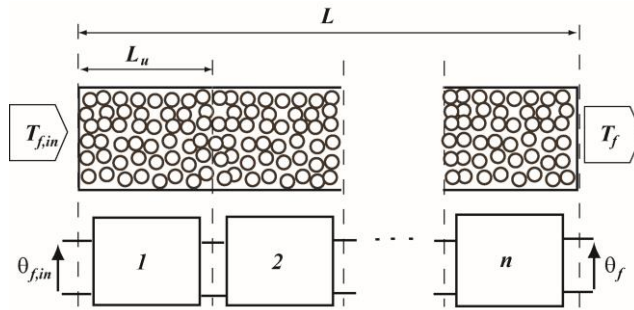
En appliquant la double transformée de Laplace en espace et en temps

$$\begin{array}{l} \text{Fluide :} \\ \text{Solide :} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} L_t L_x \left\{ \frac{\partial \theta_f}{\partial \chi} \right\} = L_t L_x \{(\theta_s - \theta_f)\} \\ L_t L_x \left\{ \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} \right\} = L_t L_x \{(\theta_f - \theta_s)\} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \overline{\overline{\theta_f}}(p, s) = \frac{1}{s(p + \frac{s}{s+1})} \\ \overline{\overline{\theta_s}}(p, s) = \frac{1}{s(s+1)(p + \frac{s}{s+1})} \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta_f(\chi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \int_0^\chi e^{-\xi} I_0(2\sqrt{\xi\tau}) d\xi \\ \theta_s(\chi, \tau) = e^{-\chi} \int_0^\tau e^{-\eta} I_0(2\sqrt{\chi\eta}) d\eta \end{array} \right.$$

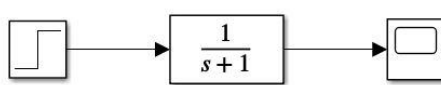
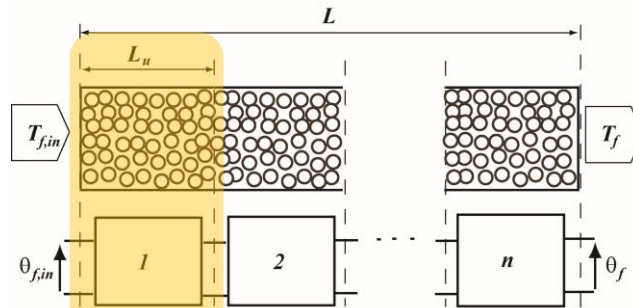
Stockage thermocline : modélisation encore plus simplifiée !

Modèle simplifié : ensemble de n filtres en série



Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Ensemble de n filtres en série



$$\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$$



$$\theta_f(\tau^*) = 1 - e^{-\tau^*}$$

avec $\tau^* = \alpha \cdot St \cdot \frac{6 \cdot L_u \cdot (1 - \epsilon)}{D \cdot \epsilon} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f t}{m_s C_s}$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Le stockage en tant que filtre :

- d'ordre 1 $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - e^{-\tau^*}$

- d'ordre 2 $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^2}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - (1 + \tau^*)e^{-\tau^*}$

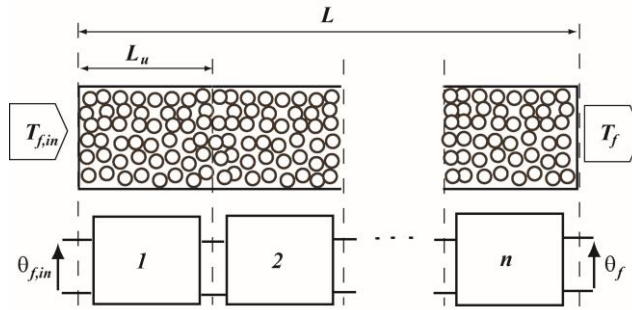
- ...

- d'ordre n $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^n}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - e_{n-1}(\tau^*) \cdot e^{-\tau^*}$

avec $e_n(\tau^*) = 1 + \frac{\tau^*}{1!} + \frac{\tau^{*2}}{2!} + \frac{\tau^{*3}}{3!} + \dots + \frac{\tau^{*n}}{n!}$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Ensemble de n filtres en série



$$\theta_f(\tau^*) = 1 - e_{n-1}(\tau^*) \cdot e^{-\tau^*}$$

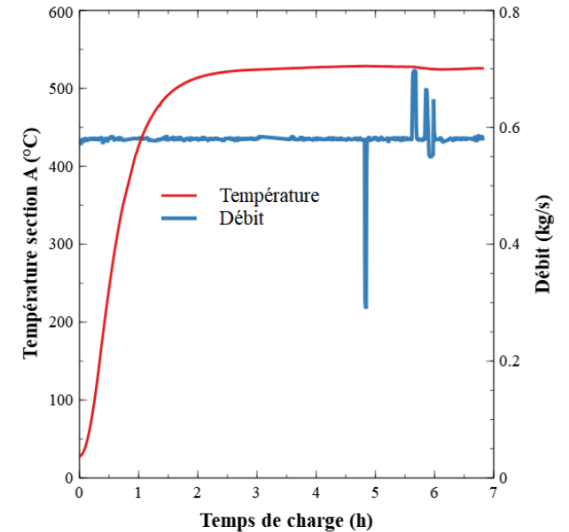
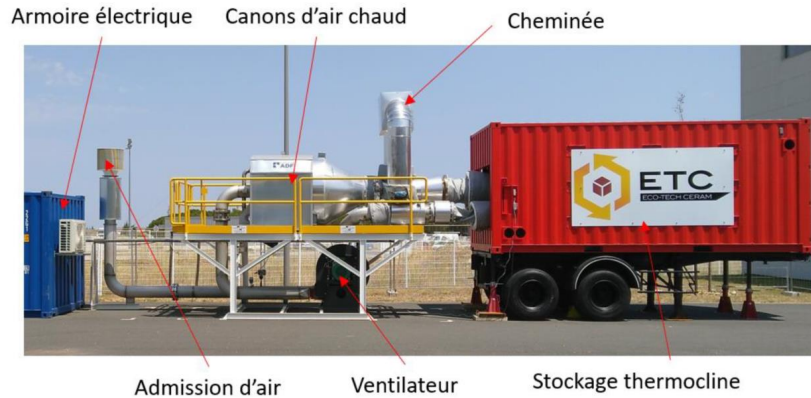
avec $\tau^* = \alpha \cdot St \cdot \frac{6 \cdot L_u \cdot (1 - \epsilon) \cdot \dot{m}_f C_f}{D \cdot \epsilon} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} t$

paramètres à identifier

$$e_n(\tau^*) = 1 + \frac{\tau^*}{1!} + \frac{\tau^{*2}}{2!} + \frac{\tau^{*3}}{3!} + \dots + \frac{\tau^{*n}}{n!}$$

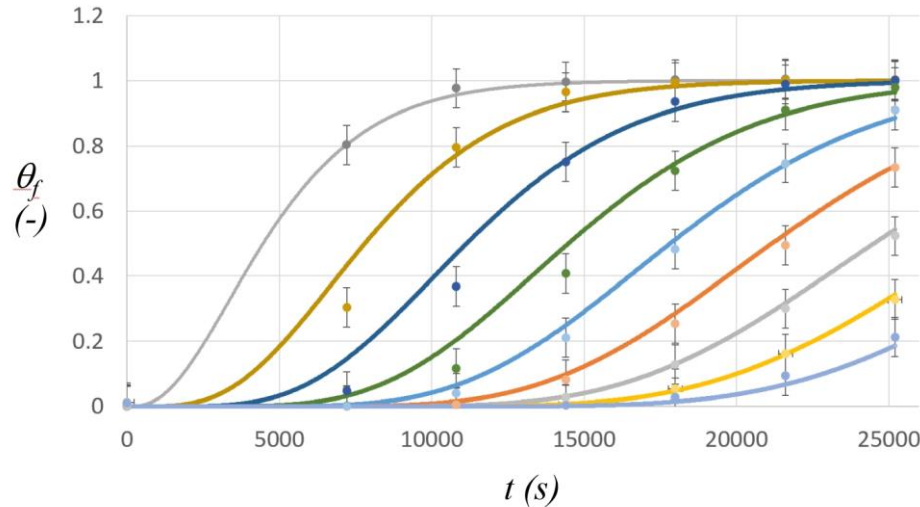
Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à un échelon de température

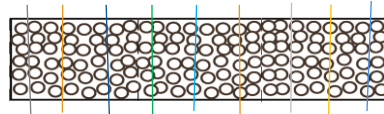


Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à un échelon de température



Position (mm) : 100 460 ... 2980



Identification de la longueur caractéristique :

$$L_u \simeq 6D$$

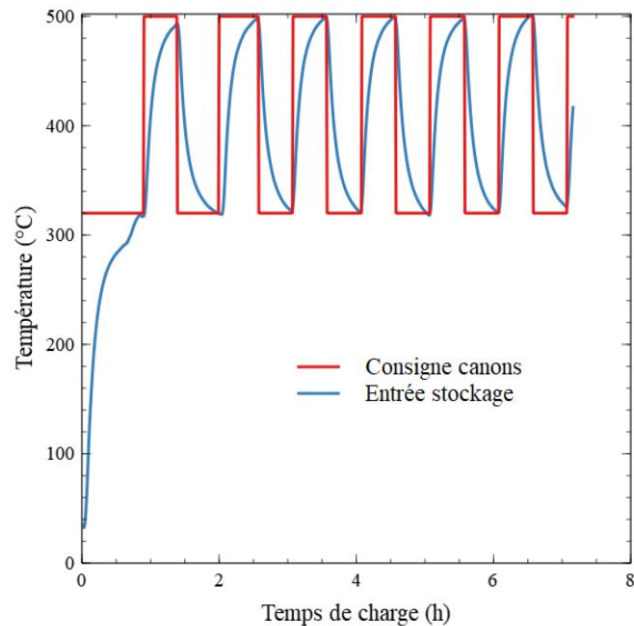
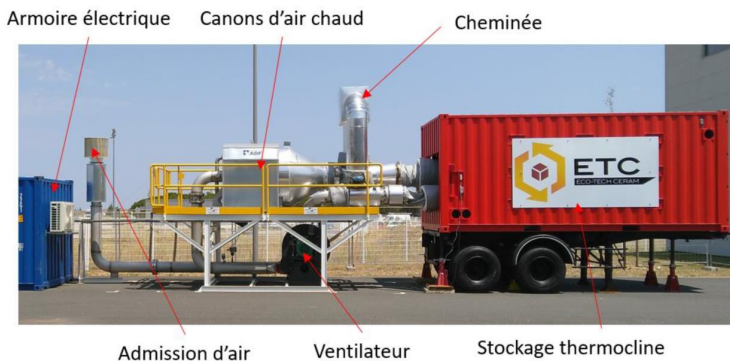
et du temps :

$$\tau^* = 6,82\tau$$

$$\tau = St. \frac{S_{ech}}{S_{ect}} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f t}{m_s C_s}$$

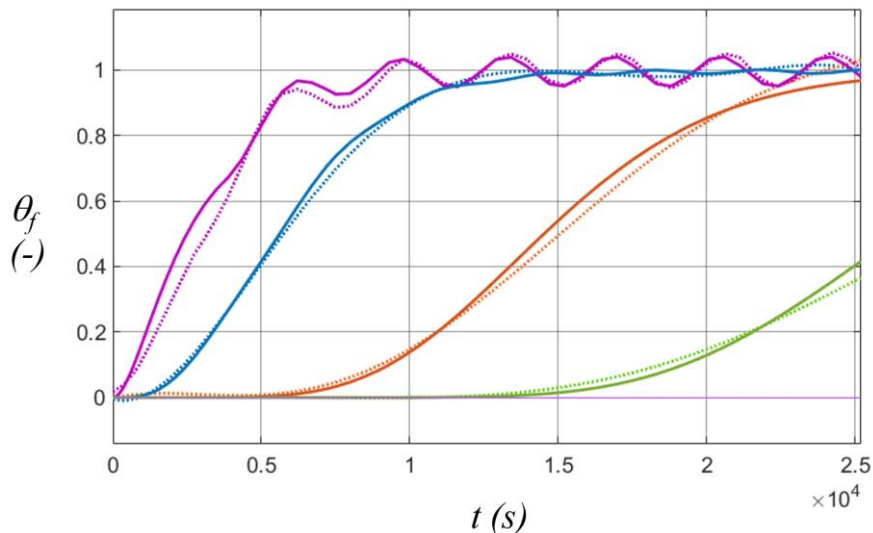
Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à des variations de type créneau

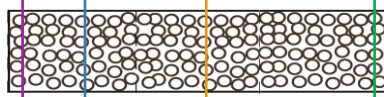


Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à des variations de type créneau



Position (mm) : 100 460 1540 2980



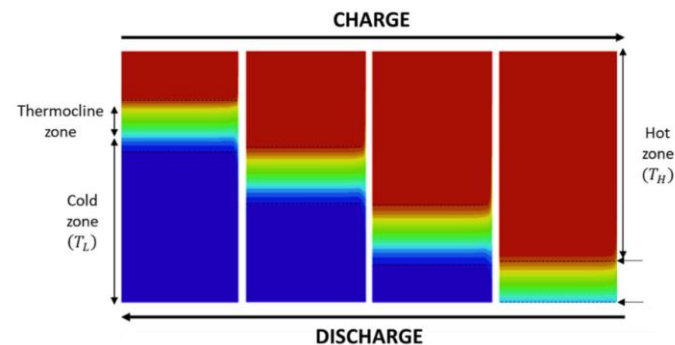
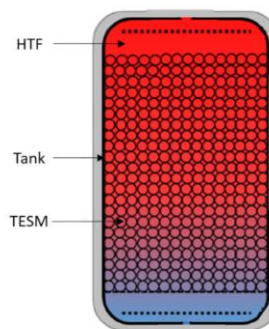
- Amortissement des oscillations : effet de filtrage du milieu poreux
- Robustesse du stockage vis-à-vis des fluctuations du gisement
- Temps de calcul réduit : simulation sur de longues périodes (année)

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Maximiser le rendement exergetique

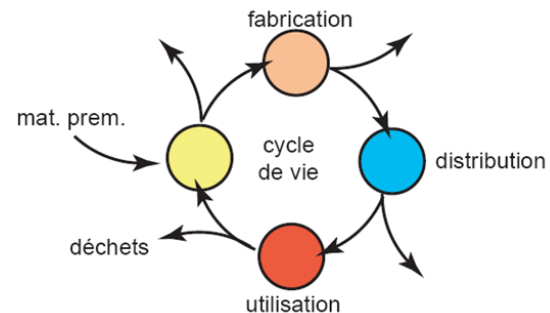
$$\eta_{ex} = \frac{- \int_0^{t_{ds}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}{\int_0^{t_c} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}$$

$$\Delta ex = c_f \cdot \left[T_{out} - T_{in} - T_{\infty} \cdot \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \right] + \frac{1}{\rho_f} \cdot (P_{out} - P_{in})$$



Optimisation d'un échangeur-stockeur

Minimiser l'empreinte environnementale
(analyse du cycle de vie)



International Reference Life Cycle Data system (ILCD) (European capita annual impact)

$$LCA = \Sigma$$

- Cumulative Energy Demand (CED) in MJ_{eq}
- Global Warming Potential (GWP) in $kgCO_{2eq}$
- Abiotic Depletion Potential of mineral, fossil and renewable resources (ADP) in $kg Sb_{eq}$
- Particulate matter (PM) in $kg PM2.5_{eq}$

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Minimiser le coût de l'énergie stockée

Levelized cost of energy

$$LCOE = \frac{LCC}{US_f(N, i^*) \cdot H}$$

Life Cycle Costs

$$LCC = C_I + C_M + C_O + C_R - C_{Res} + C_D$$

investment, maintenance, operation, replacement, dismantling costs

residual value

Annual heat production : H

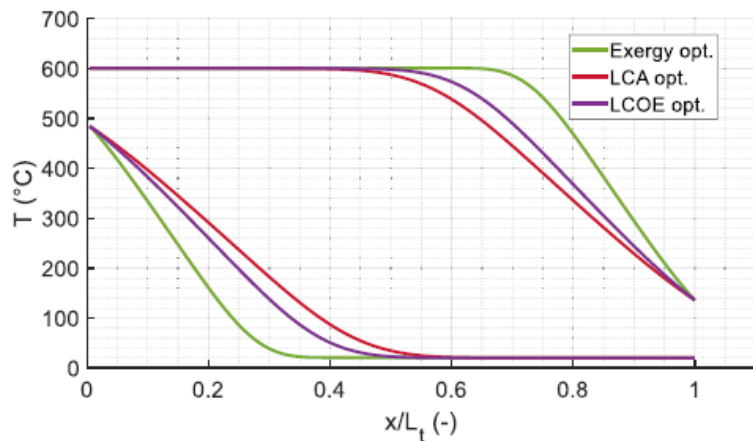
Uniform Series factor

$$US_f(N, i^*) = \frac{(1 + i^*)^N - 1}{i^* \cdot (1 + i^*)^N}$$

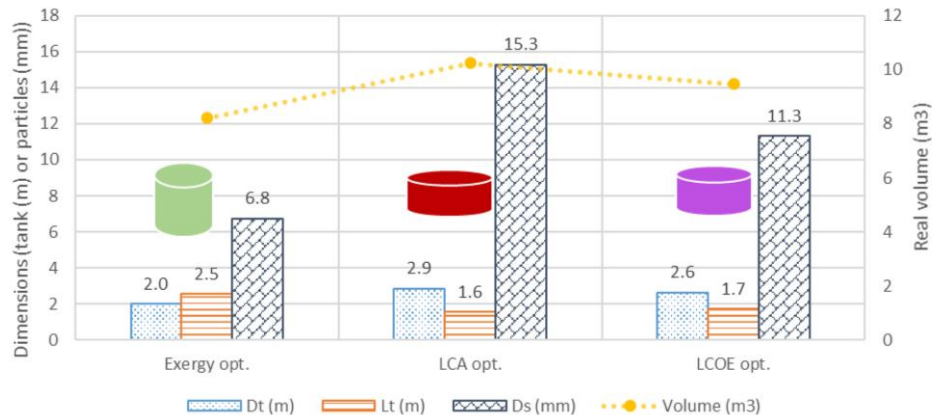
real interest rate

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Profils de température

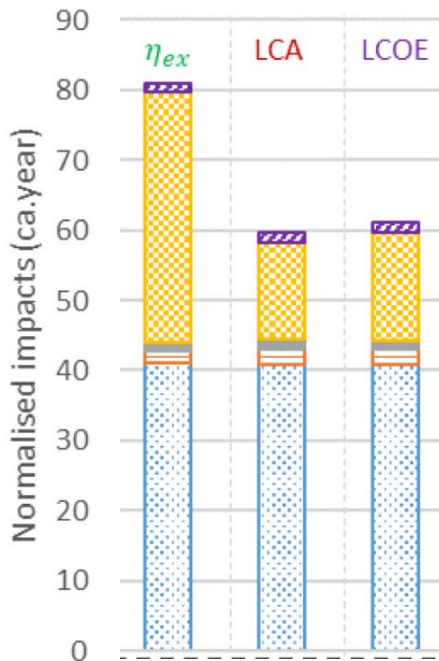


Design optimal



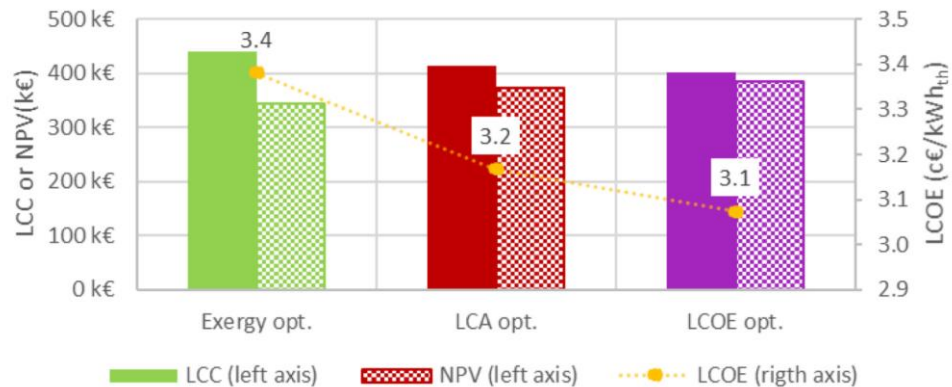
Optimisation d'un échangeur-stockeur

LCA normalised indicators



■ Tank
 ■ TESM
 ■ Transport
 ■ Use
 ■ End of life

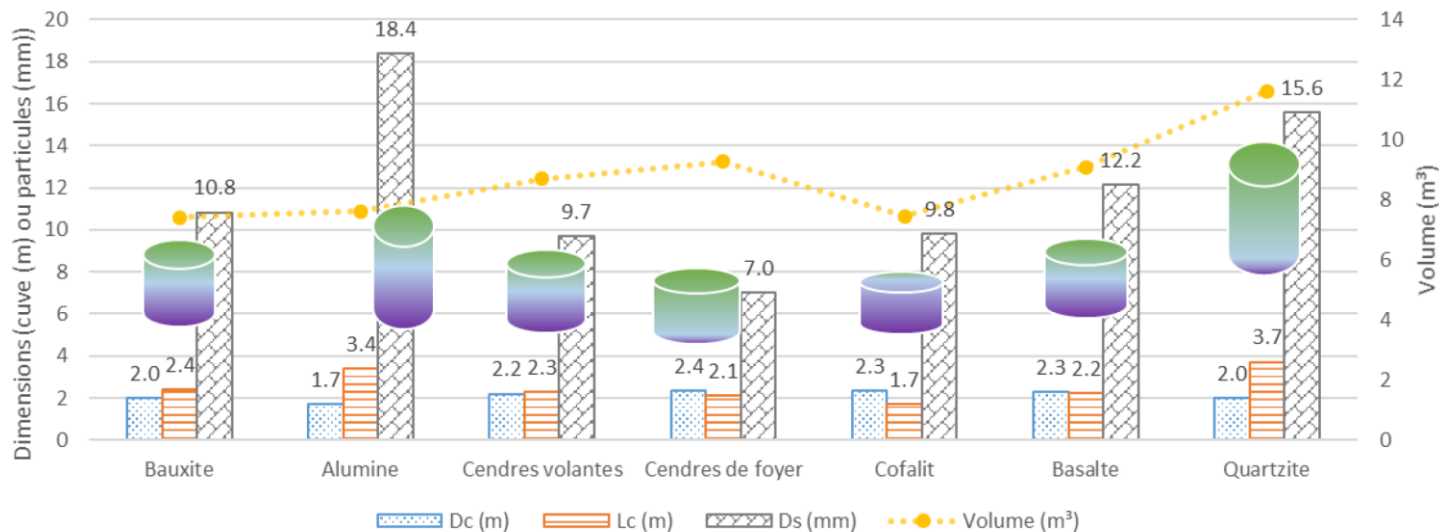
economic indicators



■ LCC (left axis)
 ■ NPV (left axis)
 ● LCOE (righth axis)

Optimisation d'un échangeur-stockeur

- ➔ Optimisation multi-objectifs :
- rendement exergetique
- empreinte environnementale (ACV)
- LCOE (Levelized cost of energy)



Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Optimisation multi-objectifs (méthode TOPSIS/Shannon)

	Critères			Ratio	Classement
	N_{ex} (%)	ACV (hab.an)	LCOE (c€/kWh _{th})	$\frac{SN}{SN + SI}$	
Cendres de foyer	2,05	57,7	3,35	0,9553	1
Cendres volantes	2,58	55,8	3,23	0,7968	2
Basalte	2,88	51,3	3,17	0,6905	3
Cofalit	2,90	51,8	2,92	0,6803	4
Quartzite	3,12	61,1	3,66	0,5882	5
Bauxite	3,11	68,5	3,27	0,5838	6
Alumine	4,66	77,8	3,56	0,0030	7

$$N_{ex} = 1 - \eta_{ex}$$

- Performances exergetiques et énergetiques peu influencees par le materiau de garnissage
- Limitation des impacts environnementaux avec des materiaux issus des dechets ou de roches naturelles
- LCOE le plus faible avec les materiaux issus de dechets comme le cofalit

Conclusion

- Modélisation fine ou simplifiée
- Aide au dimensionnement
- Pilotage en régime dynamique
- Optimisation multi-objectifs (choix du matériau, taille...)
- Intégration de l'échangeur-stockeur à un réseau multi-énergie ou à une centrale solaire



Merci !



www.promes.cnrs.fr

www.cnrs.fr



Régis OLIVÈS

olives@univ-perp.fr