Institut Mines-Télécom

12e Colloque IMT : Matériaux pour la transition environnementale

DÉVELOPPEMENT D'ÉCHANGEURS THERMIQUES EFFICACES ET ÉCONOMIQUES EN POLYMÈRES CONDUCTEURS THERMIQUES

Joseph Jabbour[12], Daniel Bougeard[1] Marie-France Lacrampe[1], Serge Russeil[1], Patricia Krawczak[1]

[1] IMT Lille Douai [2] Temisth SAS

SOMMAIRE

1. **CONTEXTE ET ENJEUX DES RECHERCHES**
   - Polymères et transferts thermiques dans un contexte de transition Energétique
   - Challenge à relever
2. **OBJECTIFS ET VERROUS**
   - Aéroréfrigérants en polymère
3. **PREMIÈRE ÉTAPE PREUVE DE CONCEPT**
   - Equipe de recherche pluridisciplinaire
   - Cahier des charges
   - Mise en forme des éprouvettes
   - Caractérisations
   - Choix des composites
   - Efficacité de l’extension de surface (ailette)
   - Optimisation paramétrique principe et moyen/résultats
   - Fabrication des prototypes
   - Comparaisons finales
4. **CONCLUSIONS PERSPECTIVES**

Institut Mines-Télécom

CONTEXTE ET ENJEUX DES RECHERCHES

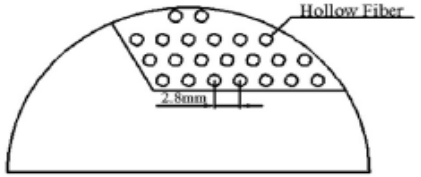
Institut Mines-Télécom

Des polymères pour des composants thermofluidiques / l'existant

Une gageure ? → Les polymères sont des isolants thermiques

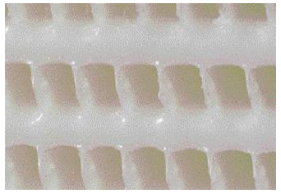
Conductivité de l'aluminium + de mille fois supérieure à celle des polymères

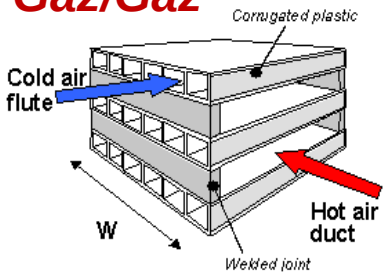
Échangeurs Liquide/Liquide



Poids réduit
coût réduit
Résistance chimique
Résistance à la corrosion

Échangeurs Gaz/Gaz





Pure cross flow (one stage)

Le véritable enjeu / la **technologie de rupture pour la transition énergétique**

Échangeurs Gaz/liquide

Aéroréfrigérants	**Récupérateurs**
Aérothermes *Radiateurs* *Aérocondenseurs*	*Récupérateurs sur fumées* *Récupérateurs sur effluents gazeux*

Aéroréfigérant : Enjeu majeur les transports

- Révolution du mode de propulsion

Source froide des systèmes thermodynamiques = air ambiant (très souvent)

VEHICULE HYDROGENE (PILE A COMB.) **/ VÉHICULE ELECTRIQUE / VÉHICULE HYBRIDE** (MICRO-HYBRID / MILD-HYBRID /FULL HYBRID /PLUG-IN-HYBRID)

Nouvelles contraintes / nouveaux composants

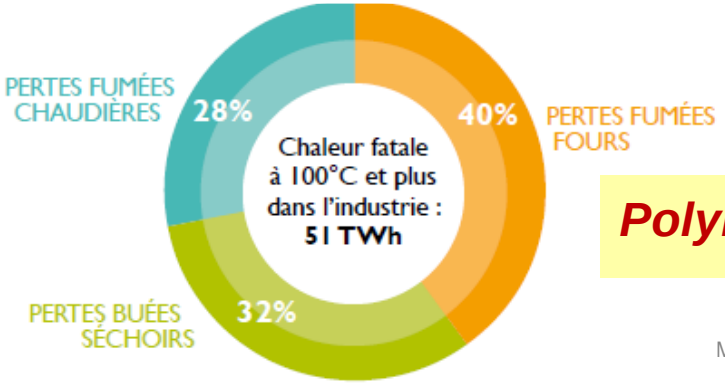
DIFF. TEMP + FAIBLE
GAIN DE PLACE / ENCOMBREMENT
GAIN DE MASSE
MAT. METAL. CHER / matières premières critiques
COUT ÉNERGÉTIQUE DU REFROIDISSEMENT

Refroidisseur De Batterie
Refroidisseur Basse Température
Chauffage Auxiliaire Haute Tension
Radiateur
Condenseur
Évaporateurs Accumulateurs
Syst. De Gestion Thermique Batteries
Refroidissement Elec. De Puissance
Recuperateurs Echappement

Polymères : Gain de masse ; formes complexes plus facile

Récupération de chaleur fatale : Enjeu majeur pour rejets gazeux basses temp.

- 51 TWh 16% consommation de combustible dans l'industrie

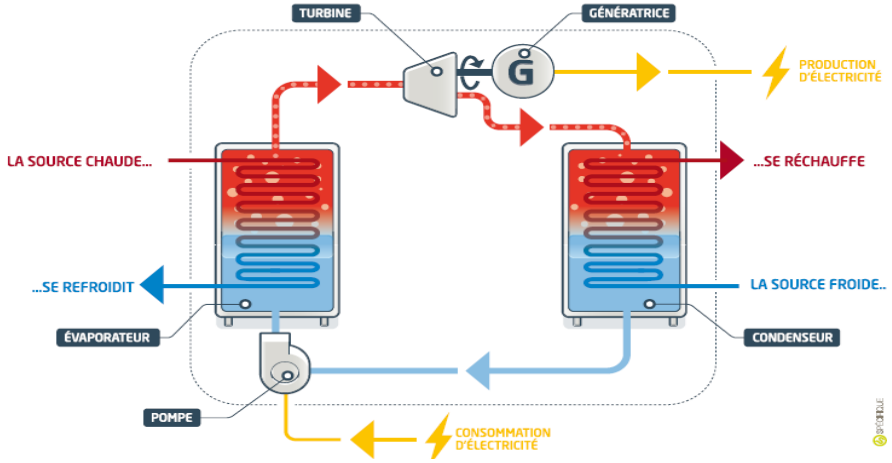


plus de 50% du gisement entre 100 et 200 °C

Polymères : Résistance à la corrosion + Résistance chimique + Gain de masse

Aérocondenseur/récupérateur : Enjeu majeur pour ENR (hors éolien et hors énergie photovoltaïque)

- Cycle organique de Rankine



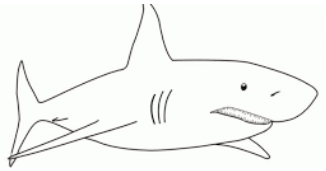
Polymères : Résistance à la corrosion + Gain de masse + résistance à l'encrassement

Chauffage, du conditionnement d'air, de la production de froid (HVAC).

- Plus gros consommateur d'énergie

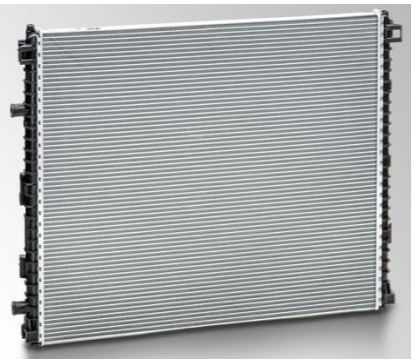
Polymères : Résistance à la corrosion + résistance à l'encrassement + fonction stockage

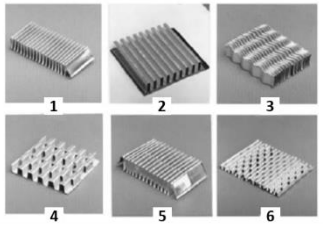
Évolution des Aéroréfrigérants métalliques



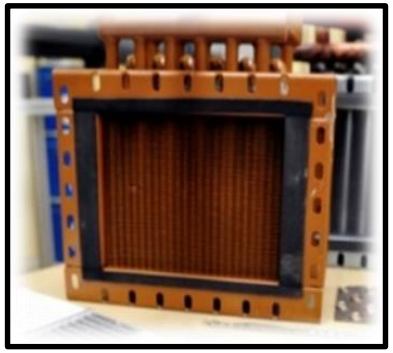
- 120 ans d'évolution

Echangeur métallique compact (Aluminium /cuivre)
Compacité 1400 m^2/m^{-3}





Echangeur métallique classique (acier inox/acier Galva)
Compacité 800 m^2/m^{-3}



Diminution de la taille des canaux (1 mm)
Diminution des épaisseurs (0,06 -0,3 mm)
Structuration de surface
Augmentation de la compacité

Efficacité des extensions de surface maximale > 90%

Raisons du besoin d'une technologie de rupture

- Réduction de la masse
- Résistance à la corrosion / résistance à l'encrassement
- Difficultés de mise en forme pour innovations géométriques/arrangements
- Matériaux chers et matières premières critiques
- Avec la diminution des dimensions le besoin d'une efficacité maximale des extensions est moindre

OBJECTIFS ET VERROUS

Institut Mines-Télécom

Verrous technologiques

- **Conception d'un aéroréfrigérant en polymère plus performant que l'aéroréfrigérant métallique**

Puissance de ventilation
Puissance thermique échangée
Masse de l'échangeur

Verrous scientifiques

- Optimisation du couplage thermique fluide/ matériau => optimisation de l'efficacité de l'extension de surface (ailette)
- Optimisation de la géométrie et arrangements des canaux => intensification passive
- Intensification de la conductivité du matériau => formulation
- Optimisation des caractéristiques mécaniques
- Technique de fabrication adaptée

PREMIÈRE ÉTAPE PREUVE DE CONCEPT

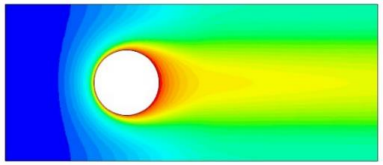
Institut Mines-Télécom

Equipe de recherche pluridisciplinaire

■ **IMT Lille Douai** CERI Energie Environnement/CERI Matériaux et Procédés

Equipe Efficacité Energétique des Composants Systèmes et procédés

Equipe Technologies des polymères et des composites



Simulation numérique thermofluidique

Optimisation paramétrique

Caractérisation thermique

Validation expérimentale

Intensification des échanges thermiques

Elaboration composite

Caractérisation structurale

Caractérisation mécanique

Simulation numérique mécanique/thermique

Fabrication prototypes

Intensification de la conductivité

PREUVE DE CONCEPT

ADEME

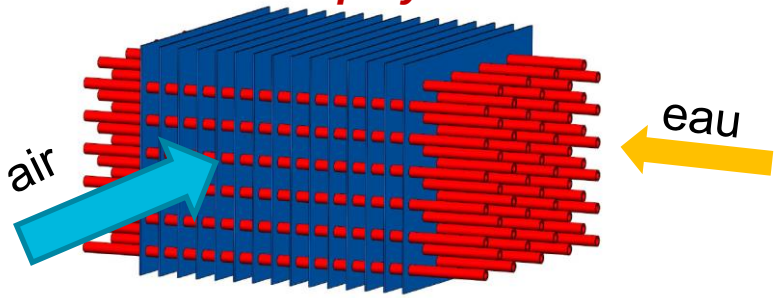
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Thèse de Joseph JABBOUR (22/2/2019)

Institut Mines-Télécom

Cahier des charges

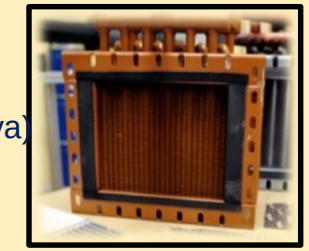
Géométrie simple : échangeur multitubulaire à ailette tout en polymère



Références métalliques $C_{ref,1}$ $C_{ref,2}$

Echangeur métallique compact (Aluminium /cuivre)
Compacité 1400 m²/m⁻³

Echangeur métallique classique (acier inox/acier Galva)
Compacité 800 m²/m⁻³



Composites

Matrice

- $T_{utilisation}$ > 85°C
- Résistance chimique
- Résistance à la corrosion
- Prix raisonnable
- Faible densité

Composite

- λ_{eff} améliorée
- $P_{utilisation}$ > 4 bars

Charges

- Prix raisonnable
- Processabilité importante
- Densité faible

Mise en forme

- Traditionnelle
  - Injection
  - Thermocompression
- Avancée
  - F.A dépôt de matière
  - F.A SLS

Eprouvettes

Eprouvette thermique

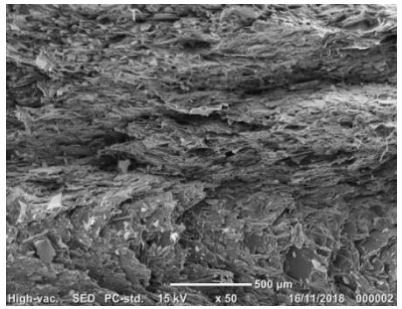
6 mm *4 mm* *2 mm*

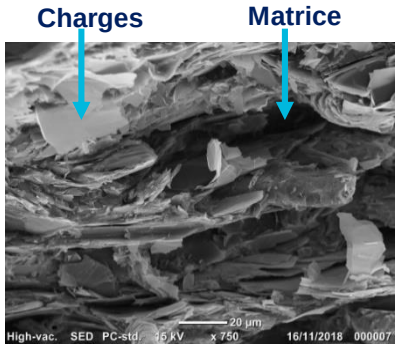
Eprouvette mécanique

Caractérisations

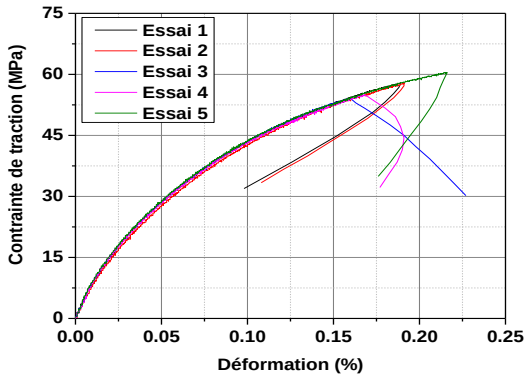
- Caractérisations structurales

PA66$_{50\%}$ granulés





- Caractérisations mécaniques



- Caractérisations thermiques

Matériaux anisotropes:

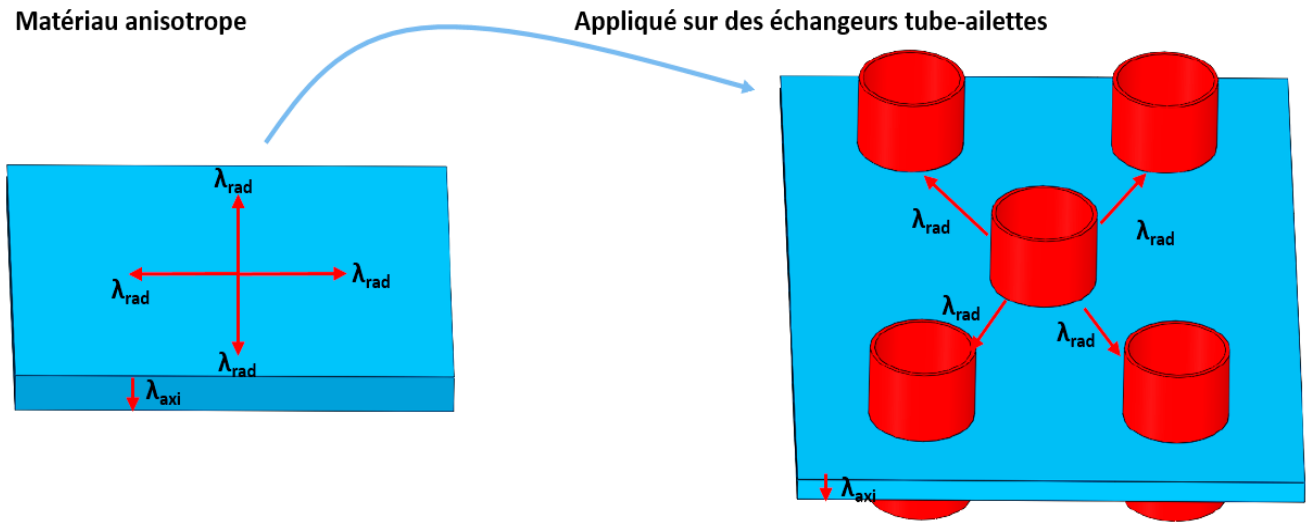
$\lambda_{radiale}$ ***et*** λ_{axiale}

Choix des composites

■ $PA66_{50\%}$

PA-66 + 50% µ-charges de carbone

- ***$\lambda_{eff} \approx$ 17,2 W.m^{-1}.K^{-1} pour 40 < Φv < 50 %***
- ***Φ_v + µ-charge = processabilité limitée***
- ***e_{tube} = 0,3 mm est suffisante pour supporter P = 4 bars***



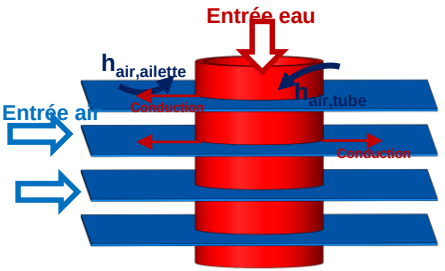
■ $ABS_{5\%}$

ABS + 5% Nano Tubes carbone

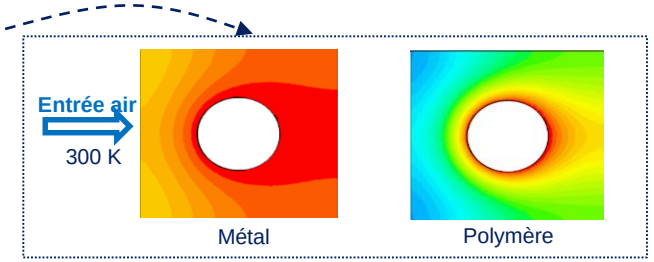
- ***$\lambda_{eff} \approx$ 1 W.m^{-1}.K^{-1} pour 5 < Φv < 15 %***
- ***Φ_v + n-charge = processabilité importante***
- ***e_{tube} = 0,3 mm est suffisante pour supporter P = 4 bars***

Materiau	Epaisseur (mm)	λ_{rad} (W.m.K^{-1})	λ_{axi} (W.m.K^{-1})	Cp
$PA66_{50\%}$-Injecté	2	17,8	-	1135
	4	16,89	2,8	
	6	16,37	3,23	
$ABS_{5\%}$	2	0,72	-	1100
	4	0,67	0,15	
	6	0,55	0,18	

Efficacité d'ailette (caractérisation numérique et expérimentale)

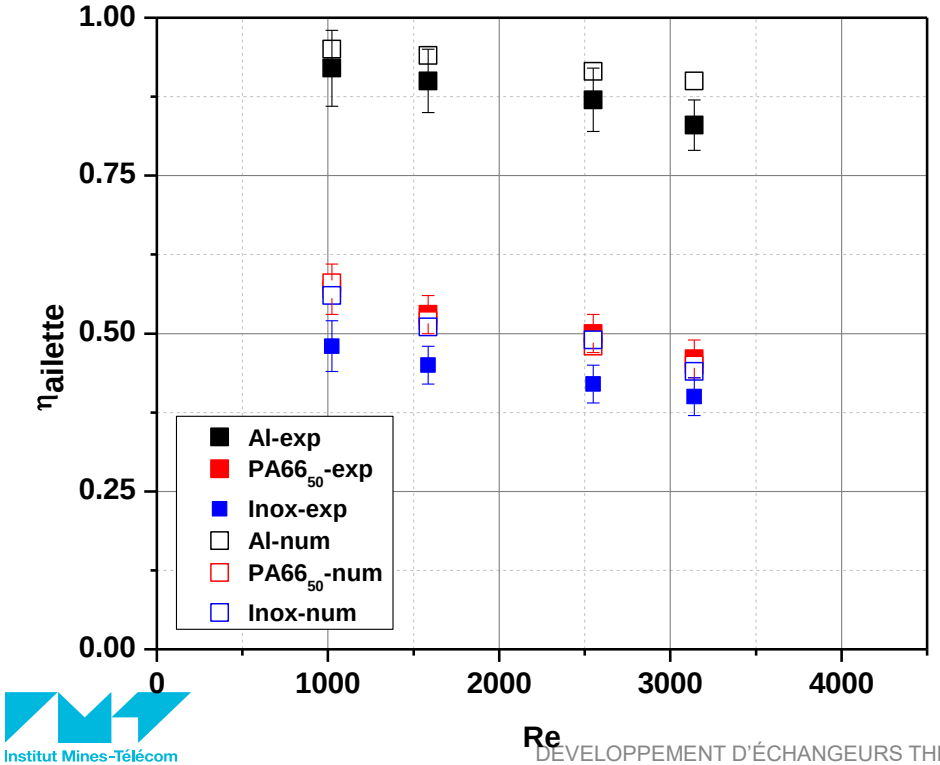


Les ailette couvrent ≈ 80 % de la surface de l'échange

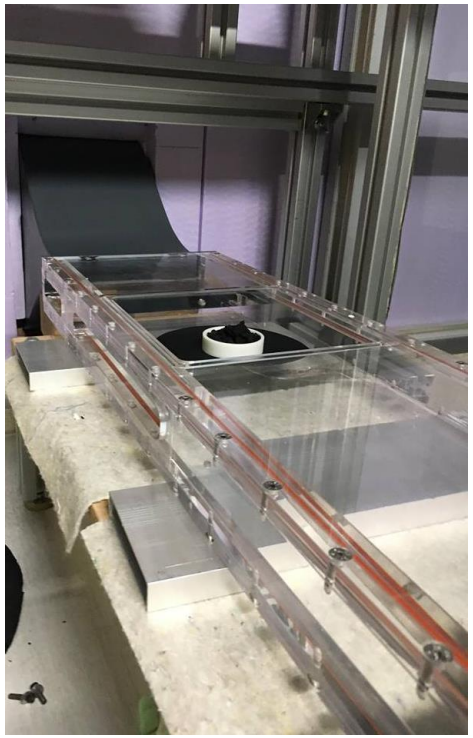


Efficacité des ailettes = paramètre clé => contrôlant la performance de l'échangeur:

$$\eta_{ailette} = \frac{P_{ailette}}{P_{ailette\ parfaite}} = f(\lambda, h, \ldots)$$



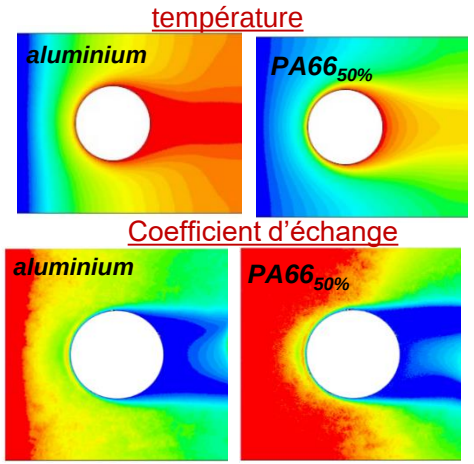
- $0.5 < \eta_{ailette;PA66\text{-}50\%} < 0.6$
- $\eta_{ailette\text{-}PA66\text{-}50\%} = 0.6\ \eta_{ailette\text{-}Al}$
- $\eta_{ailette\text{-}PA66\text{-}50\%} = 1.1\ \eta_{ailette\text{-}Inox}$

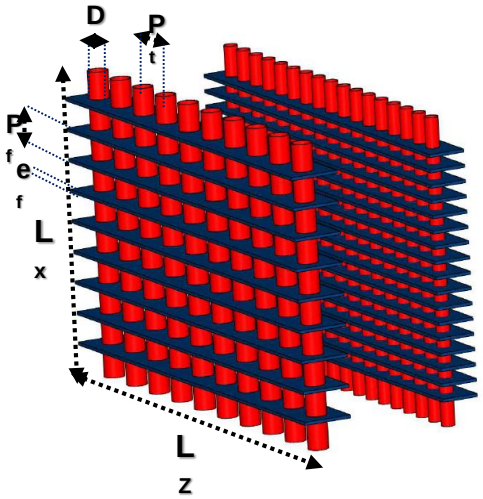


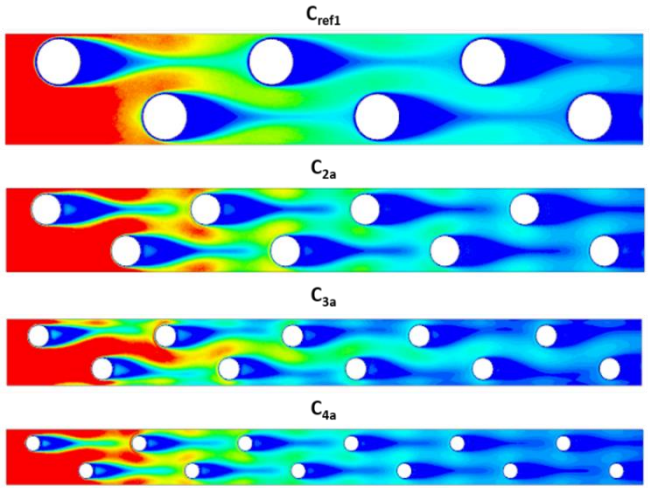
Efficacité d'ailette convenable => optimisation paramétrique de la géométrie pour maximiser les performances thermiques de l'échangeur

Optimisation paramétrique (multitubulaire à ailette) ($\approx 150\ calculs$)

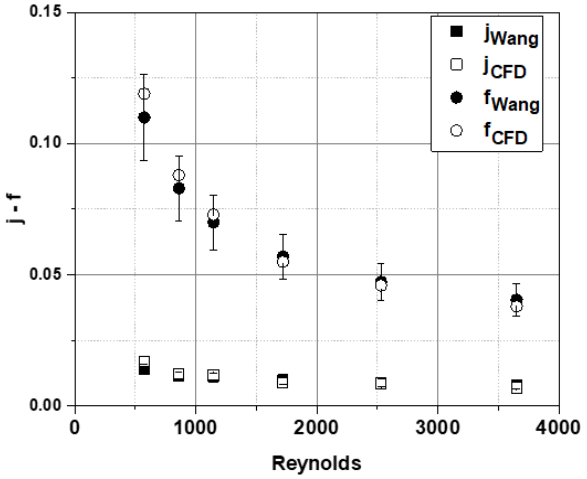
- Simulation numérique CFD (coefficient d'échange côté air)



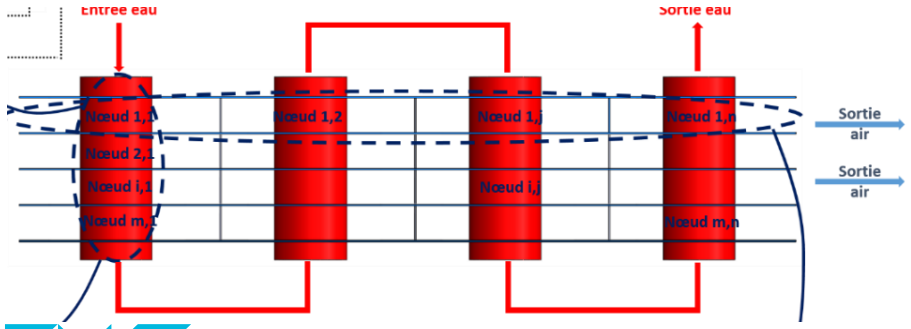




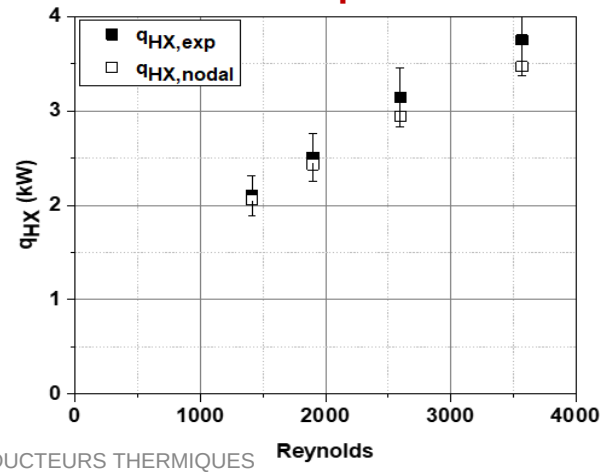
Validation (corrélation)



- Simulation sur modèle nodal (multitubulaire)

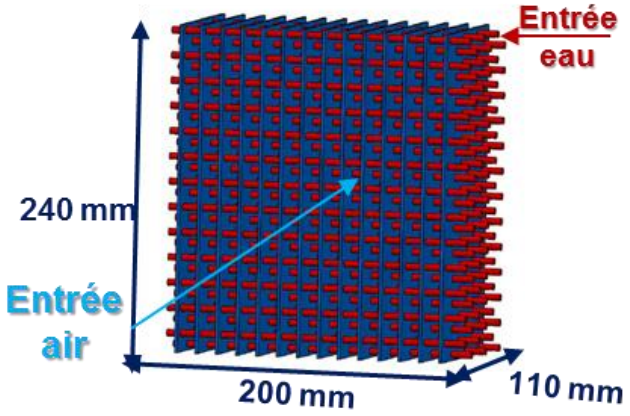


Validation expérimentale

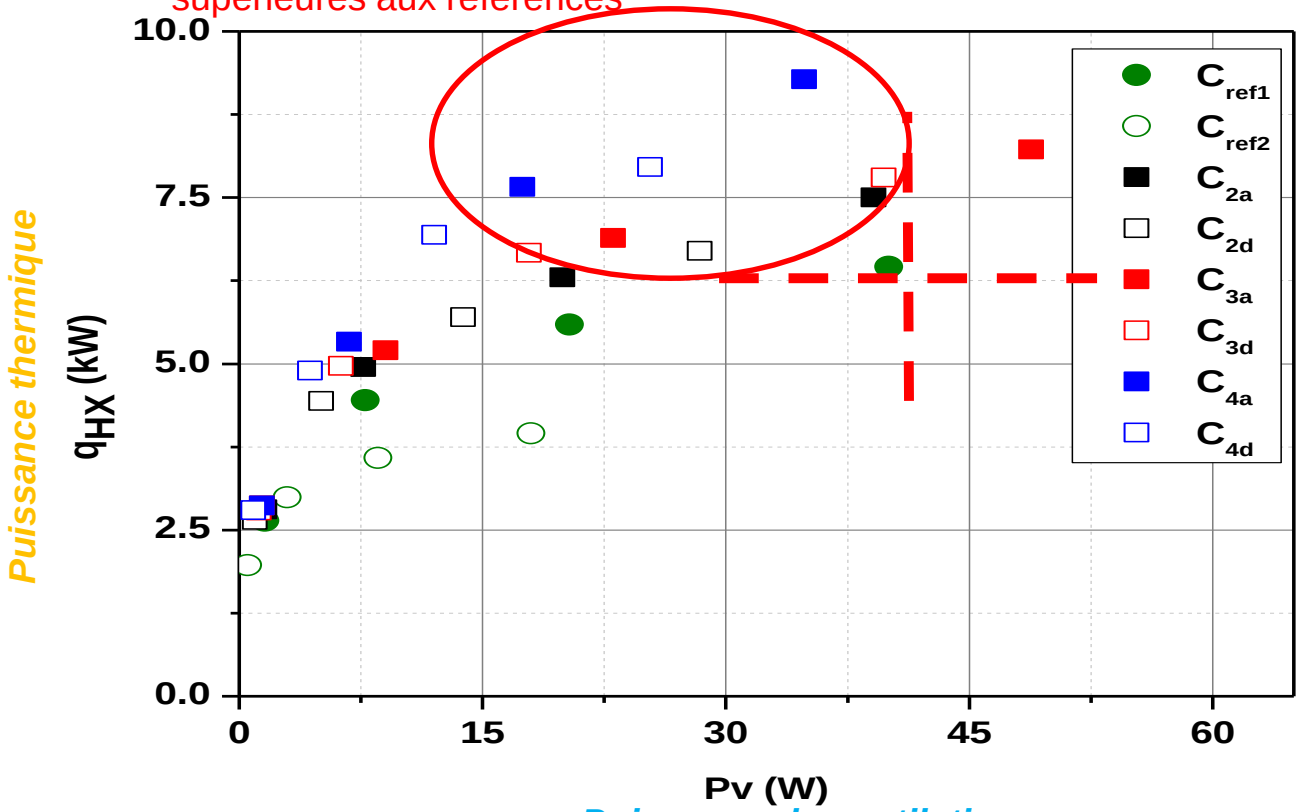


Résultats

Echangeur de chaleur multi-rangs de tubes et ailette en polymère



Configurations en polymères supérieures aux références

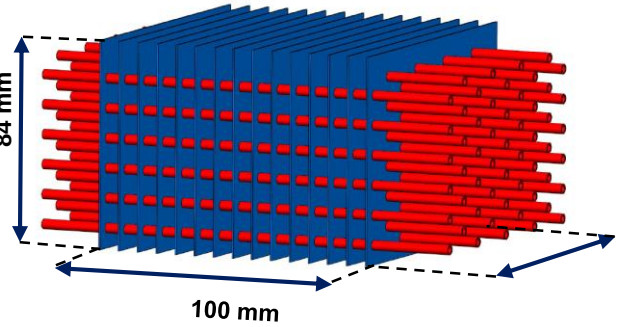


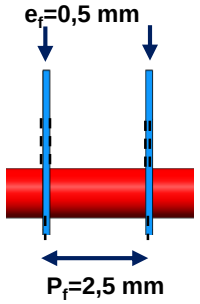
*Géométries optimales en polymère => **q_{HX} supérieures** avec des **Pv inférieures** aux échangeurs métalliques:*

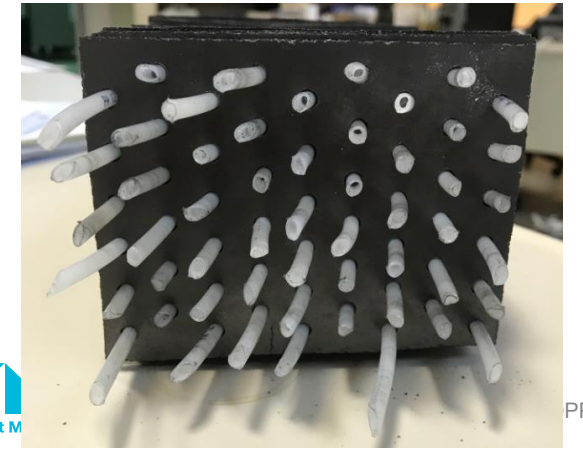
- ***Gain q_{HX} de 7,5 % à 35 %***
- ***Réduction P_v de 1,1 % à 36 %***

Techniques de fabrication

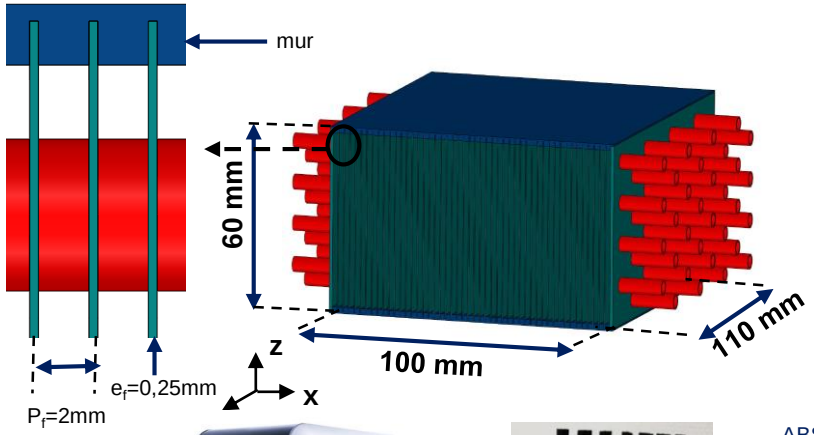
Traditionnelles

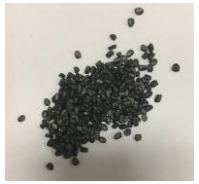






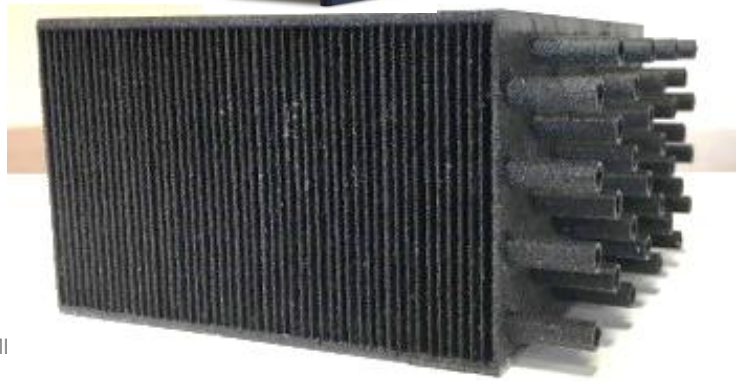
FreeFormer



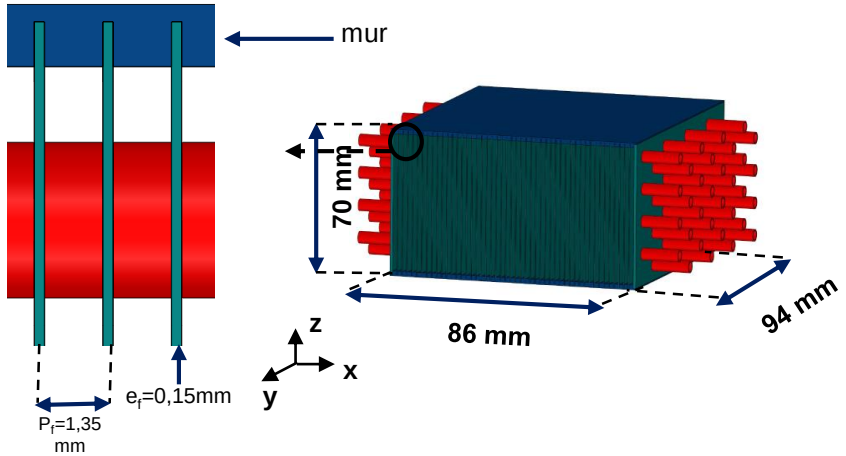


Matériau support

ABS5%



Fabrication additive par frittage laser 'SLS'



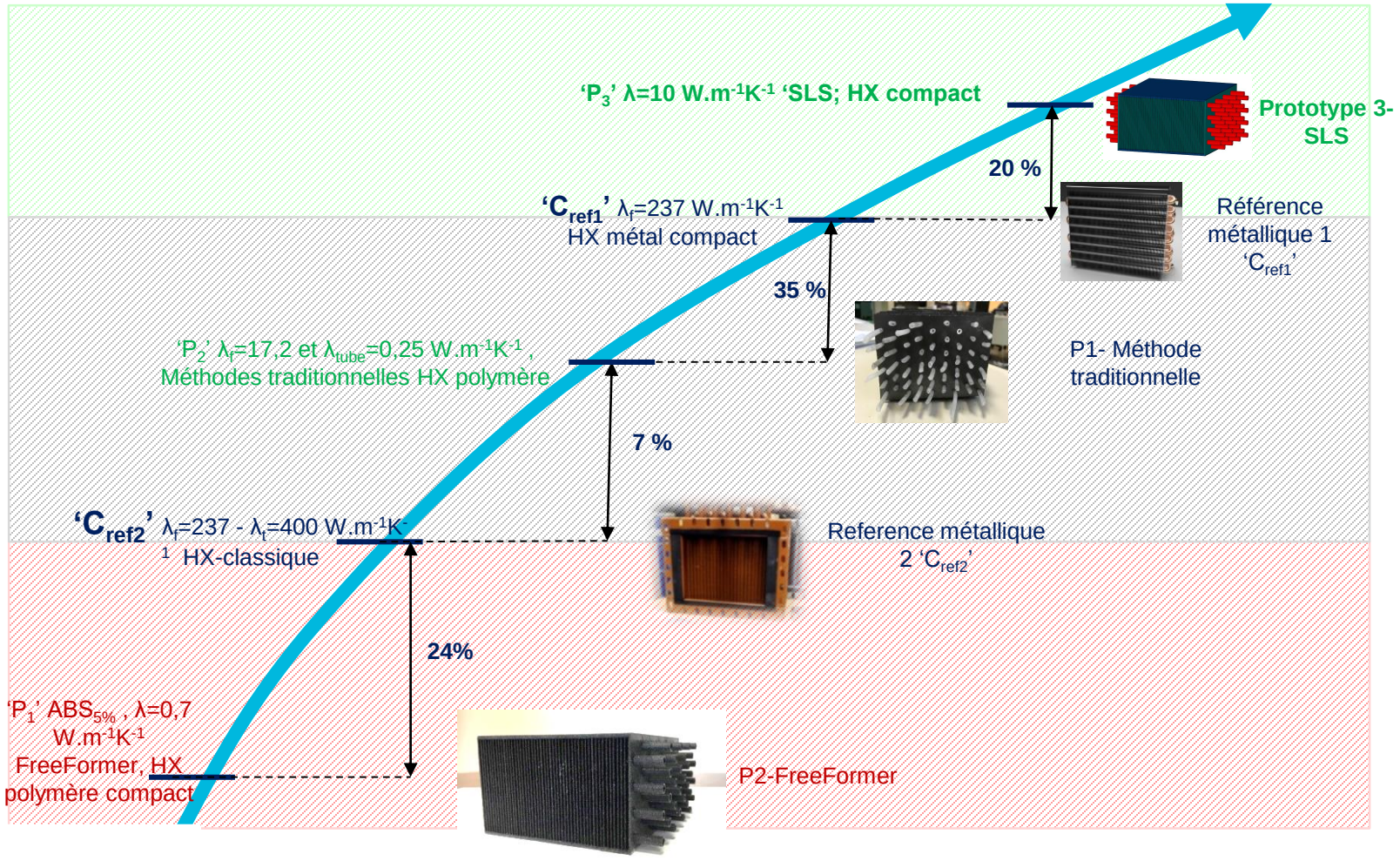
1- Matière première $PA66_{50\%}$

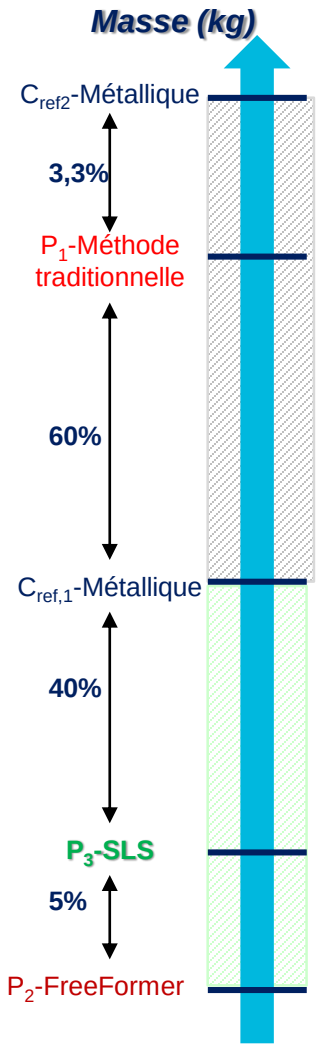
Utilisation de poudre de 30 µm

Comparaisons finales

Echangeur métallique VS échangeur en polymère:

Performance thermo-aéraulique





CONCLUSIONS PERSPECTIVES

Institut Mines-Télécom

Conclusions

- La conception et la construction d'aéroréfrigérants en composite est validée (au niveau prototype)
- L'efficacité des extensions de surface obtenue sont suffisantes
- Les performances obtenues sur le composant thermofluidiques sont très prometteuses
- La liberté de forme possible permet d'envisager des accroissements de performance significatifs

Perspectives

- Innovation de forme pour des aéroréfrigérants très performants
- Investiguer les performances pour des récupérateurs innovants en polymères (condensation)
- Augmenter le TRL des recherches

http://rev3-energie.fr/project/materiaux-organiques-pour-la-fabrication-dechangeurs-pour-des-systemes-energetiques-eco-efficients/

Daniel BOUGEARD
Professeur IMT Lille Douai

daniel.bougeard@imt-lille-douai.fr