

Élise BÉRUT

Journées du GDR TRANSINTER – 7 au 9 juin 2022

Phénomènes de condensation
siégeant au sein d'une chambre de vapeur
à ailettes creuses intégrées

Sous la direction de :

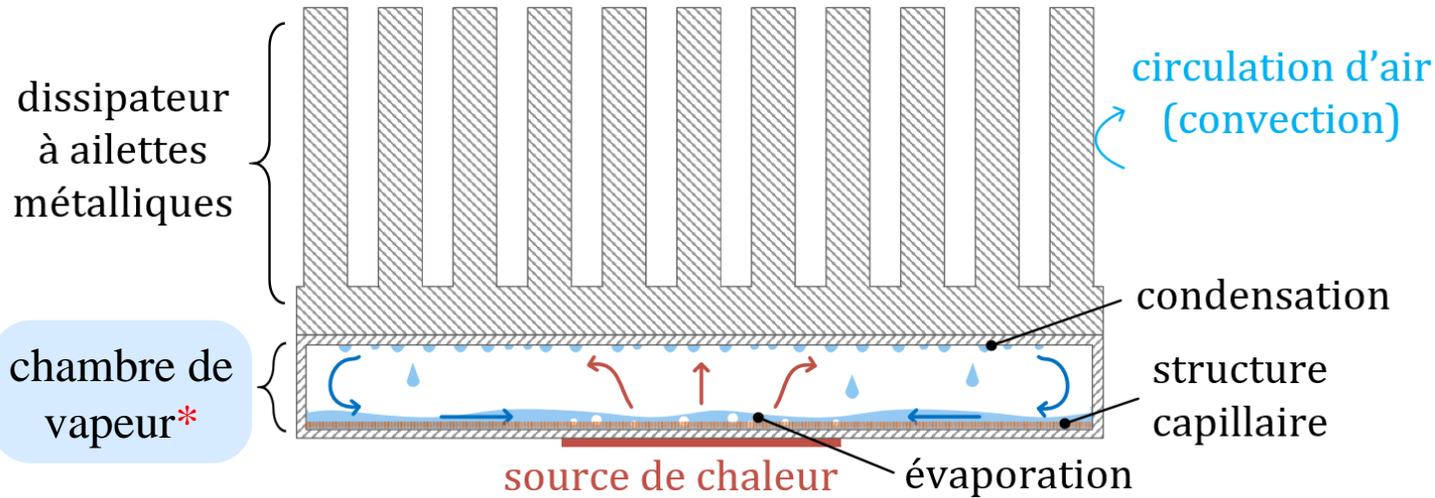
Frédéric LEFÈVRE, Stéphane LIPS et Valérie SARTRE

Contexte de la thèse

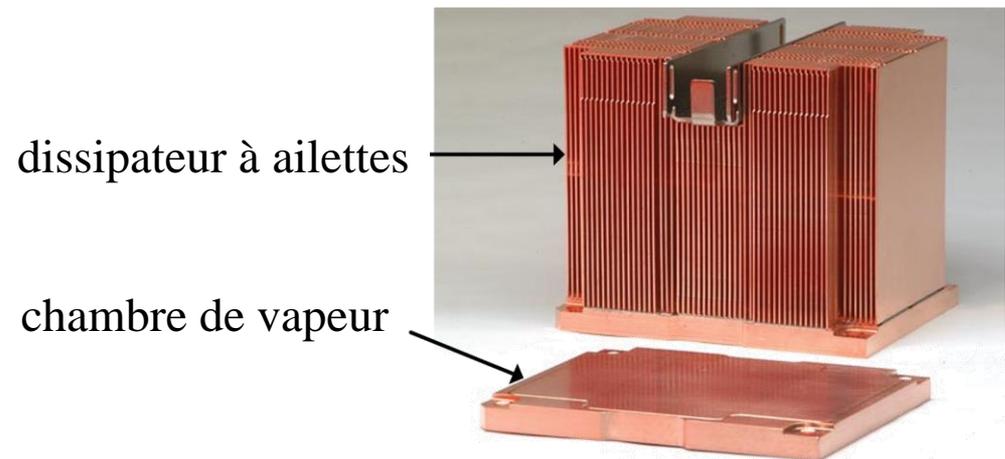
Besoin de systèmes de refroidissement passifs, efficaces, légers et peu coûteux



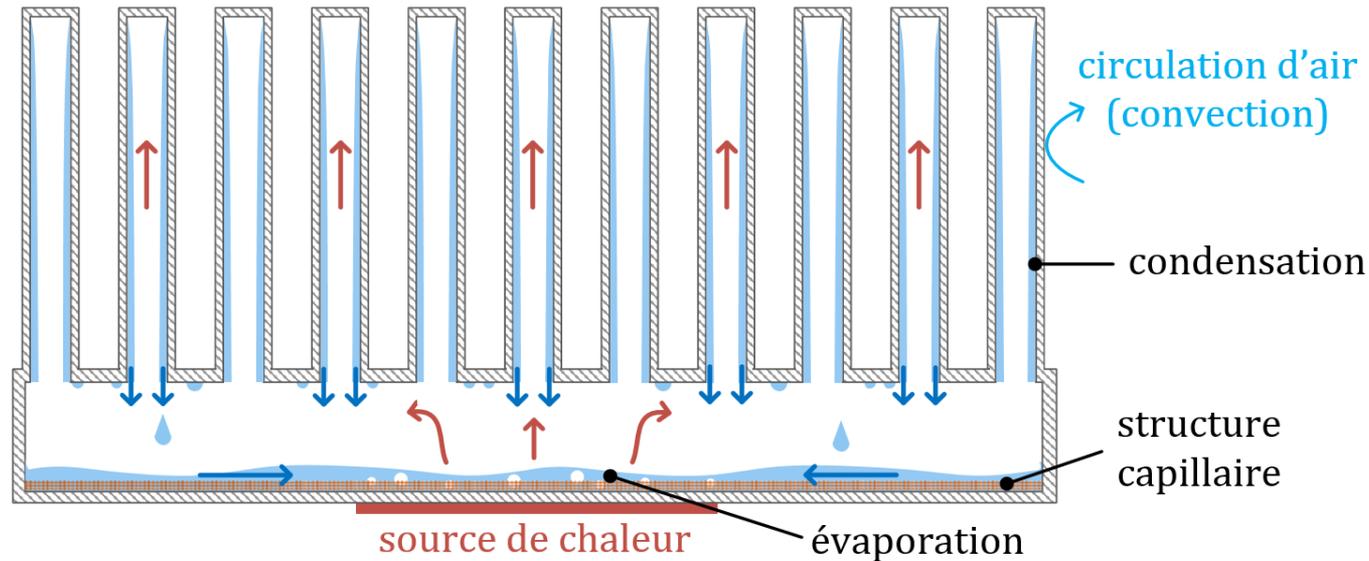
Système de refroidissement avec chambre de vapeur



* système de transfert de chaleur utilisant le changement de phase liquide-vapeur



Concept de chambre de vapeur à ailettes creuses



- ✓ meilleure efficacité des ailettes
 - ✓ suppression résistance de contact
 - ✓ allègement
- } meilleures performances



Nouvelles problématiques scientifiques

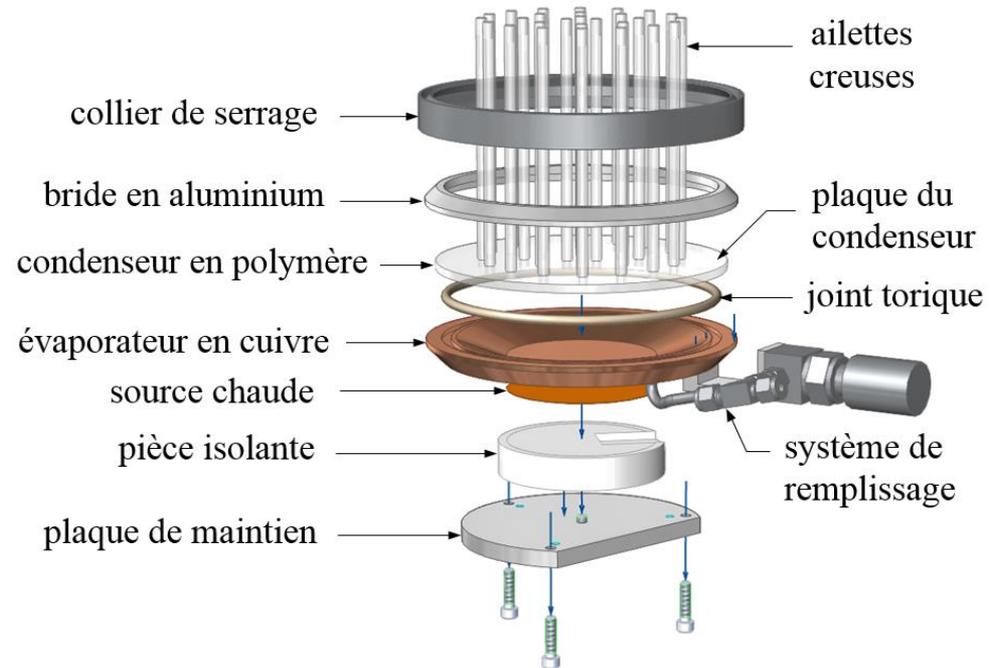
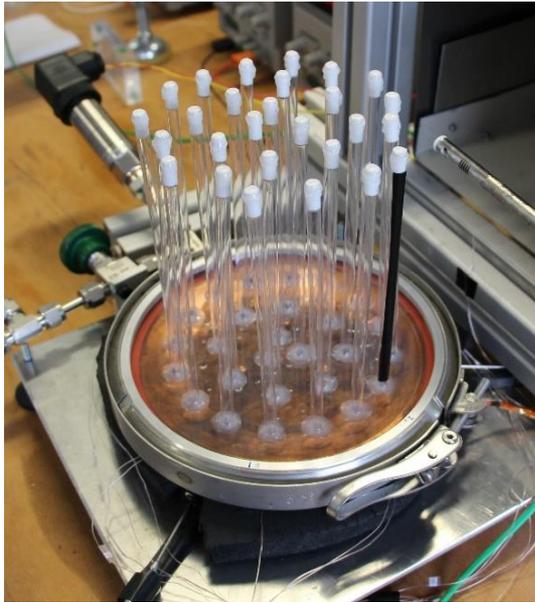
Objectifs de la thèse :

- contribuer à la compréhension des **phénomènes hydrodynamiques**
- caractériser leur effet sur les **performances thermiques**
- **optimiser la géométrie** des ailettes creuses du condenseur

Sommaire de la présentation

- 1 Influence du **diamètre des ailettes** sur les phénomènes hydrodynamiques
- 2 Influence de la **section transversale des ailettes** sur la stabilité des bouchons de liquide et sur le drainage du condensat
- 3 Condenseurs à **ailettes interconnectées**

Chambre de vapeur à ailettes creuses



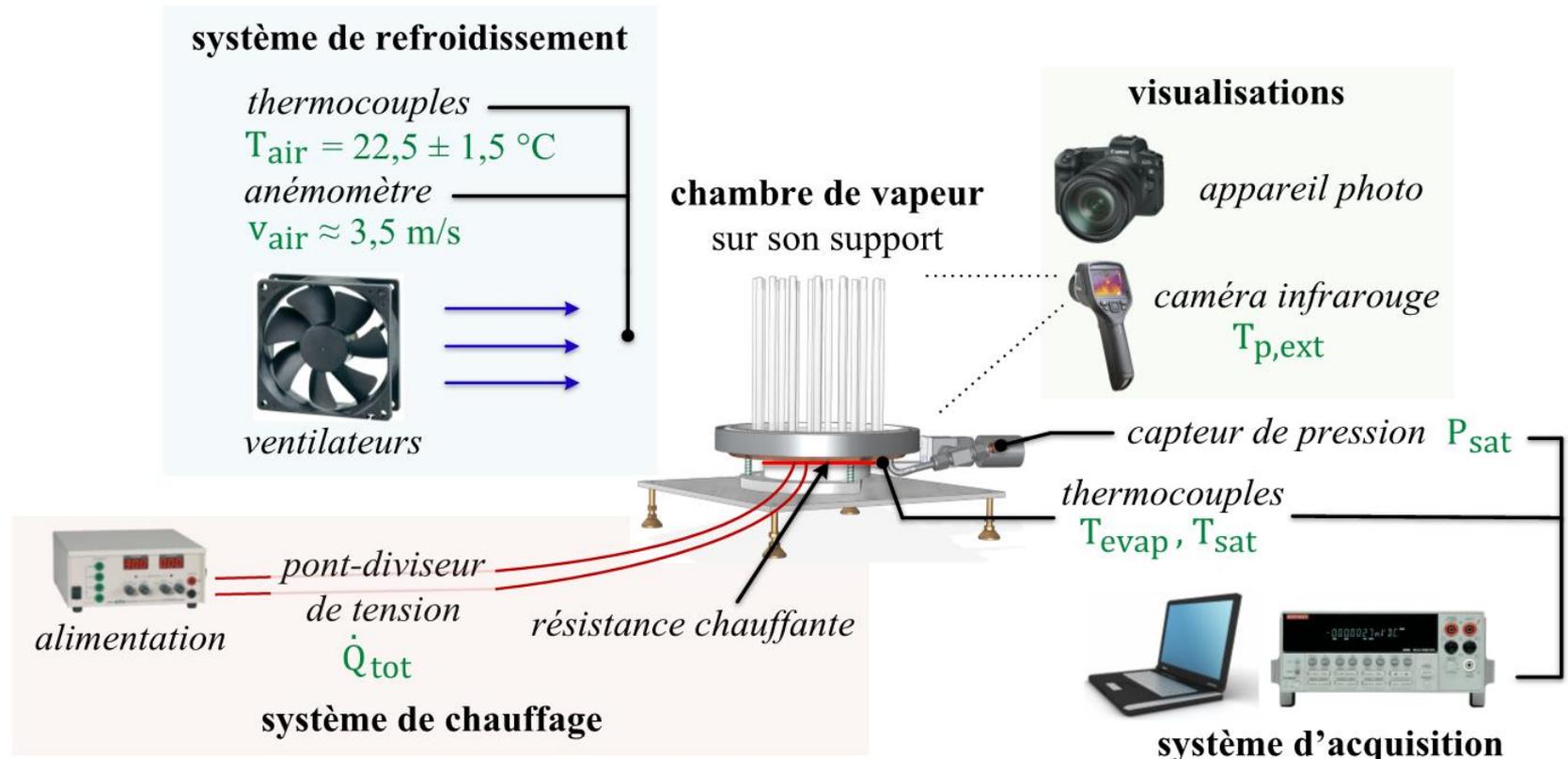
Évaporateur en cuivre : $D_{ext} = 185$ mm

Condenseur en polymère :

- plaque en polycarbonate, $D_{ext} = 173$ mm, $e = 5$ mm
- ailettes cylindriques en PET, $D_{int} = 5$ à 11 mm, $H = 14$ cm, $e_p = 300$ μ m

Influence du diamètre des ailettes

Banc d'essais



Convection externe généralement limitante

➔ réduire le diamètre des ailettes pour augmenter leur nombre et la surface d'échange

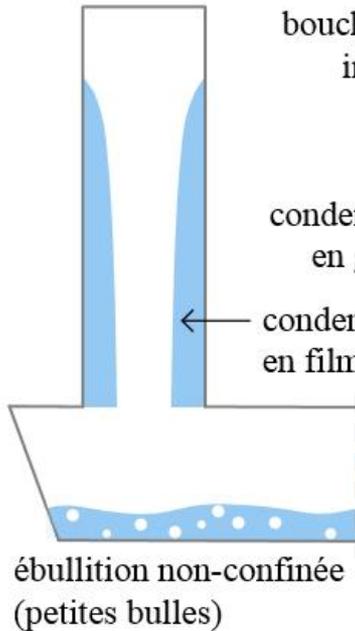
Influence du diamètre des ailettes

Synthèse des phénomènes observés

n-pentane / HFE-7100



$D_{int} = 5 \text{ à } 11 \text{ mm}$



eau



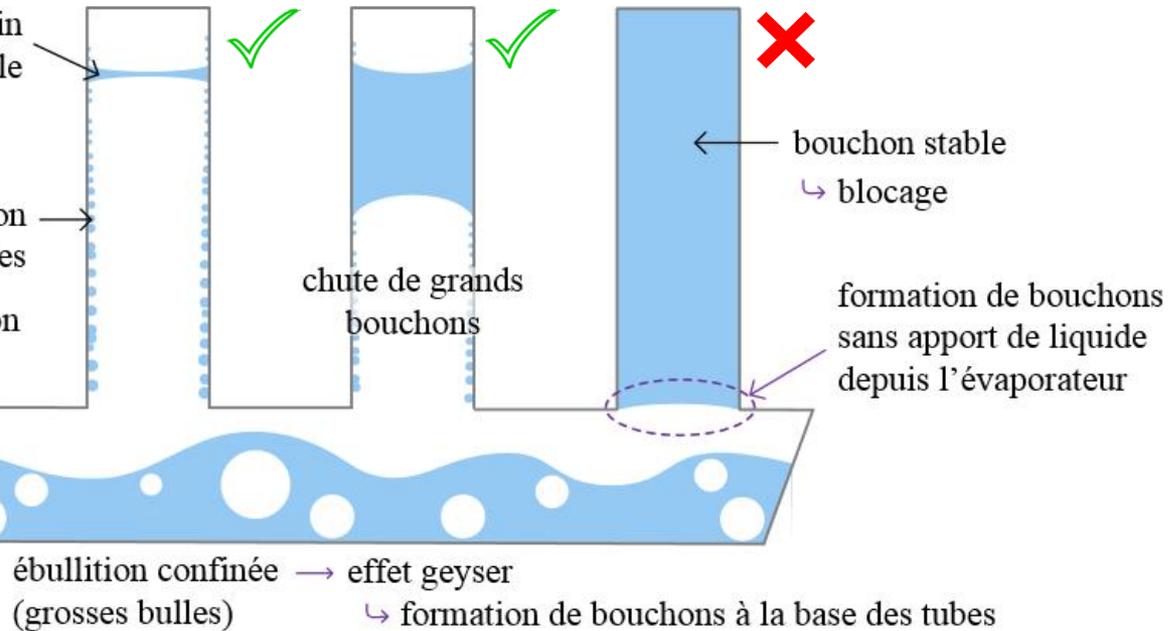
$D_{int} = 11 \text{ mm}$



$D_{int} = 8 \text{ mm}$



$D_{int} = 5 \text{ mm}$



Synthèse

Convection externe généralement limitante

→ réduire le diamètre des ailettes pour de meilleures performances

⚠ Risque de formation de **bouchons de liquide** stables
(blocage des ailettes et performances fortement dégradées)

Performances en convection



Régimes de condensation

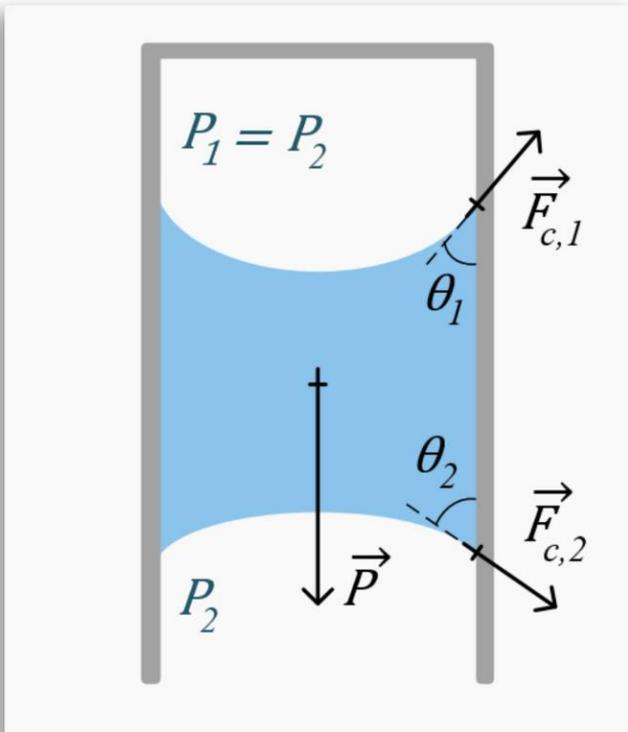


Déterminer le **diamètre minimal des ailettes**



Pistes pour **déstabiliser les bouchons**

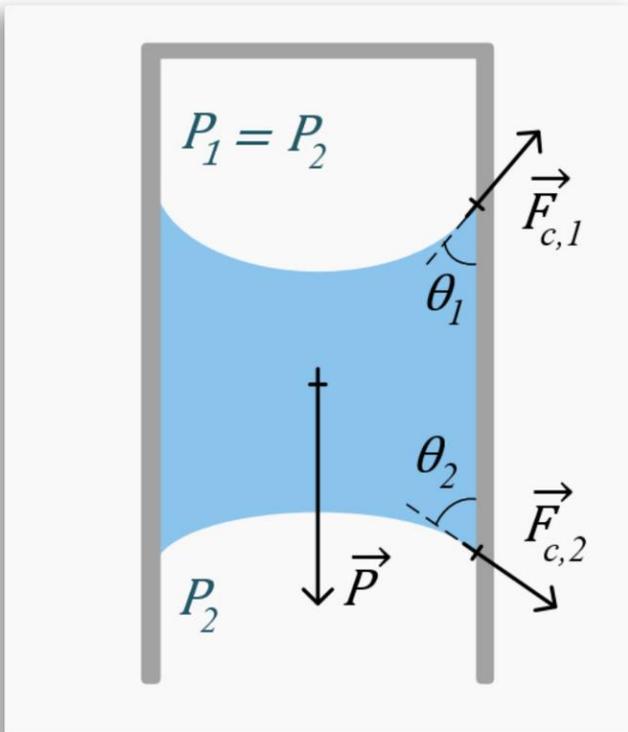
Équilibre d'un bouchon de liquide



Équilibre des forces sur l'axe du tube :

$$\underbrace{\rho g H \frac{\pi}{4} D_{int}^2}_{\text{poids}} + \underbrace{\cancel{(P_2 - P_1)} \frac{\pi}{4} D_{int}^2}_{\text{différence de pression}} + \underbrace{\sigma (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \pi D_{int}}_{\text{forces capillaires}} = 0$$

Équilibre d'un bouchon de liquide



Équilibre des forces sur l'axe du tube :

$$\rho g H \frac{\pi}{4} D_{int}^2 + \cancel{(P_2 - P_1) \frac{\pi}{4} D_{int}^2} + \sigma (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \pi D_{int} = 0$$

$$\Delta P_{hydro} = \rho g H = \frac{4\sigma}{D_{int}} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

géométrie du tube → hystérésis d'angle de contact
 • diamètre
 • section longitudinale
 • section transversale

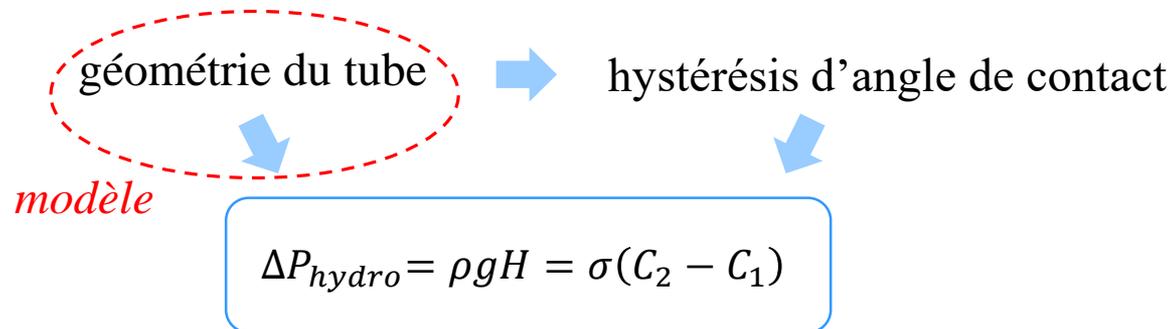
stabilisant

Cas général :

$$\Delta P_{hydro} = \rho g H = \sigma (C_2 - C_1)$$

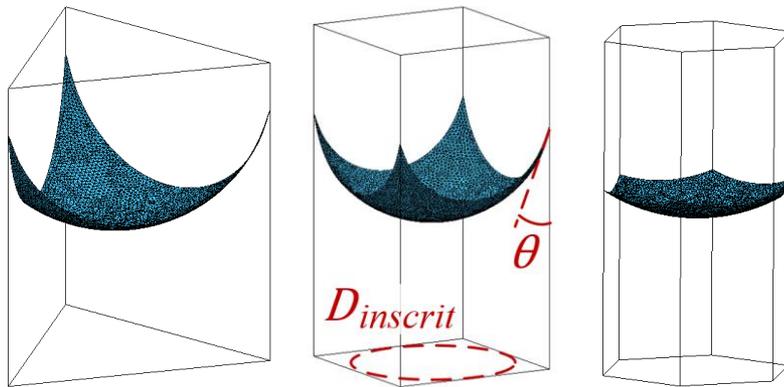
Modèle numérique

Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?



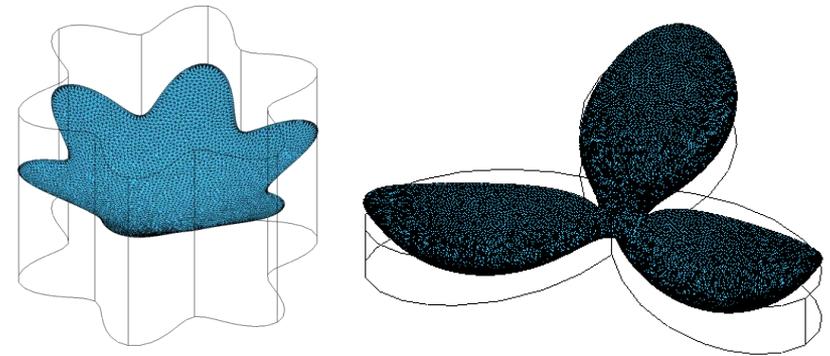
Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?

sections polygonales



sections cannelées

$$r(\varphi) = r_{moy} [1 + \alpha \cos(N\varphi)]$$



→ stabilité par rapport à un tube circulaire de même diamètre inscrit :

≡ stabilité des bouchons équivalente

✓ bouchons généralement moins stables

Étude expérimentale

Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?

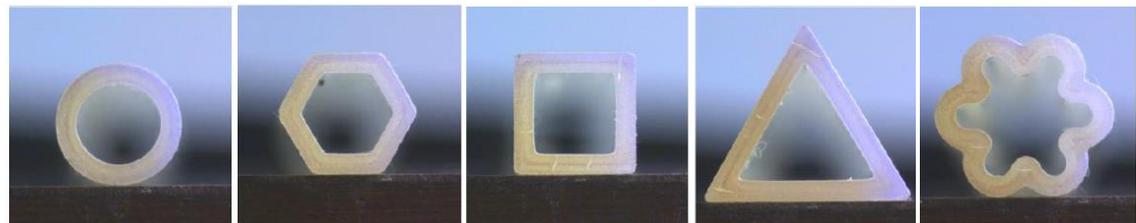
géométrie du tube

hystérésis d'angle de contact

$$\Delta P_{hydro} = \rho g H = \sigma (C_2 - C_1)$$

expérience

$D_{inscrit} = 2 \text{ et } 3,5 \text{ mm}$

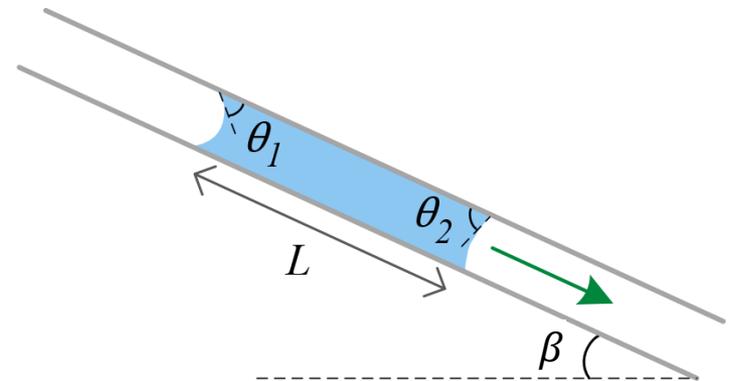


Étude expérimentale

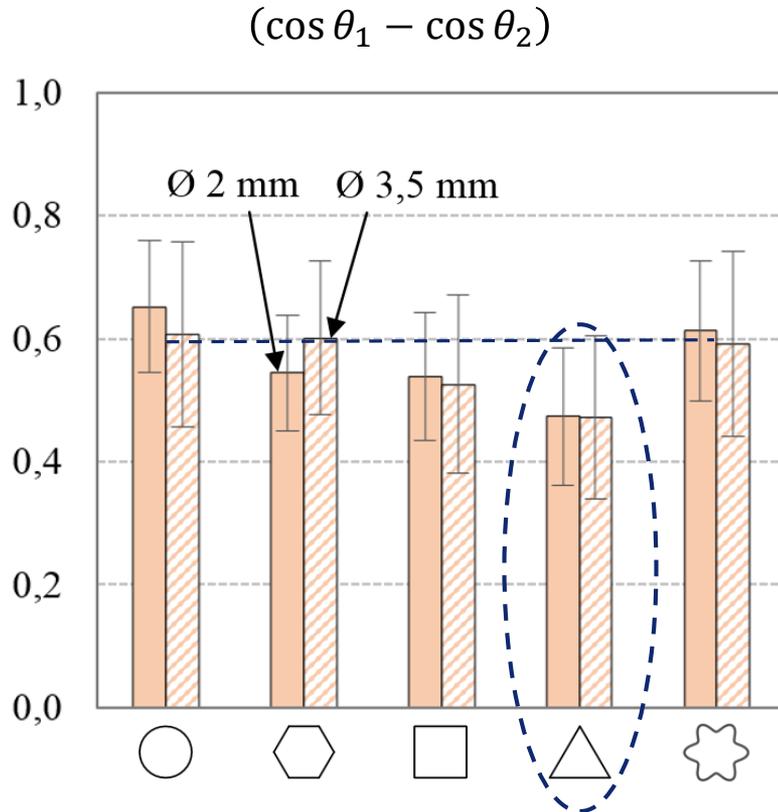
Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?

Protocole :

1. insertion d'un bouchon de liquide (eau) dans un tube horizontal
2. inclinaison progressive du tube jusqu'au décrochage
3. relever l'angle β au décrochage et en déduire $(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$



Étude expérimentale



→ diamètre inscrit sans influence sur l'hystérésis d'angle de contact

sections polygonales

✓ hystérésis minimale pour la **section triangulaire**

sections cannelées

— hystérésis comparable à la section circulaire

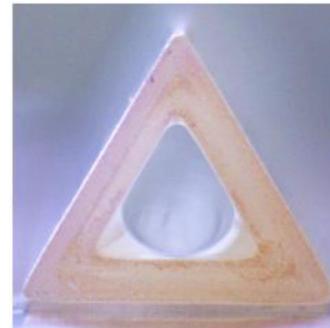
Conclusions sur la stabilité

Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?

- ✓ sections cannelées → influence directe sur la courbure *modèle*
- ✓ section triangulaire → diminution de l'hystérésis *expérience*

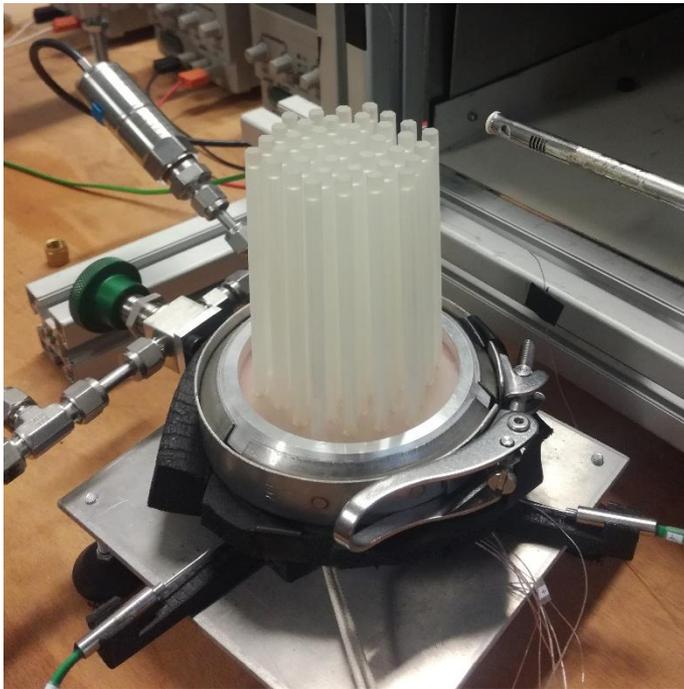
! Phénomène de **drainage**

- déstabilise les bouchons
- prévient leur formation
- améliore les transferts en condensation



Condenseurs à ailettes de différentes sections

Quelle section transversale permet de maximiser le drainage du condensat ?



Condenseurs en polymère (stéréolithographie) :

- 37 ailettes, $H = 10$ cm, $e_p = 800$ μm
- différentes sections transversales



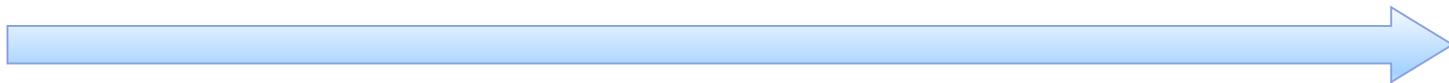
$D_{inscrit} = 2$ mm

Fluide parfaitement mouillant : HFE-7100

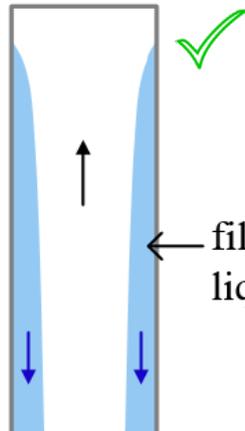
Influence de la section transversale

Condenseurs à ailettes de différentes sections

\dot{Q} et $\dot{m}_{cond} \nearrow$



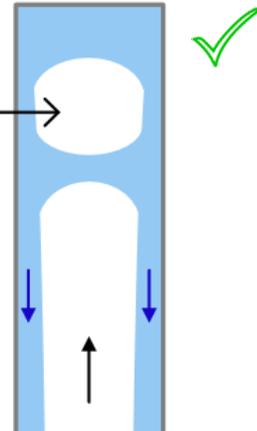
condensation en film



vapeur se condensant

film liquide

poches de vapeur



régime permanent

ennoiement



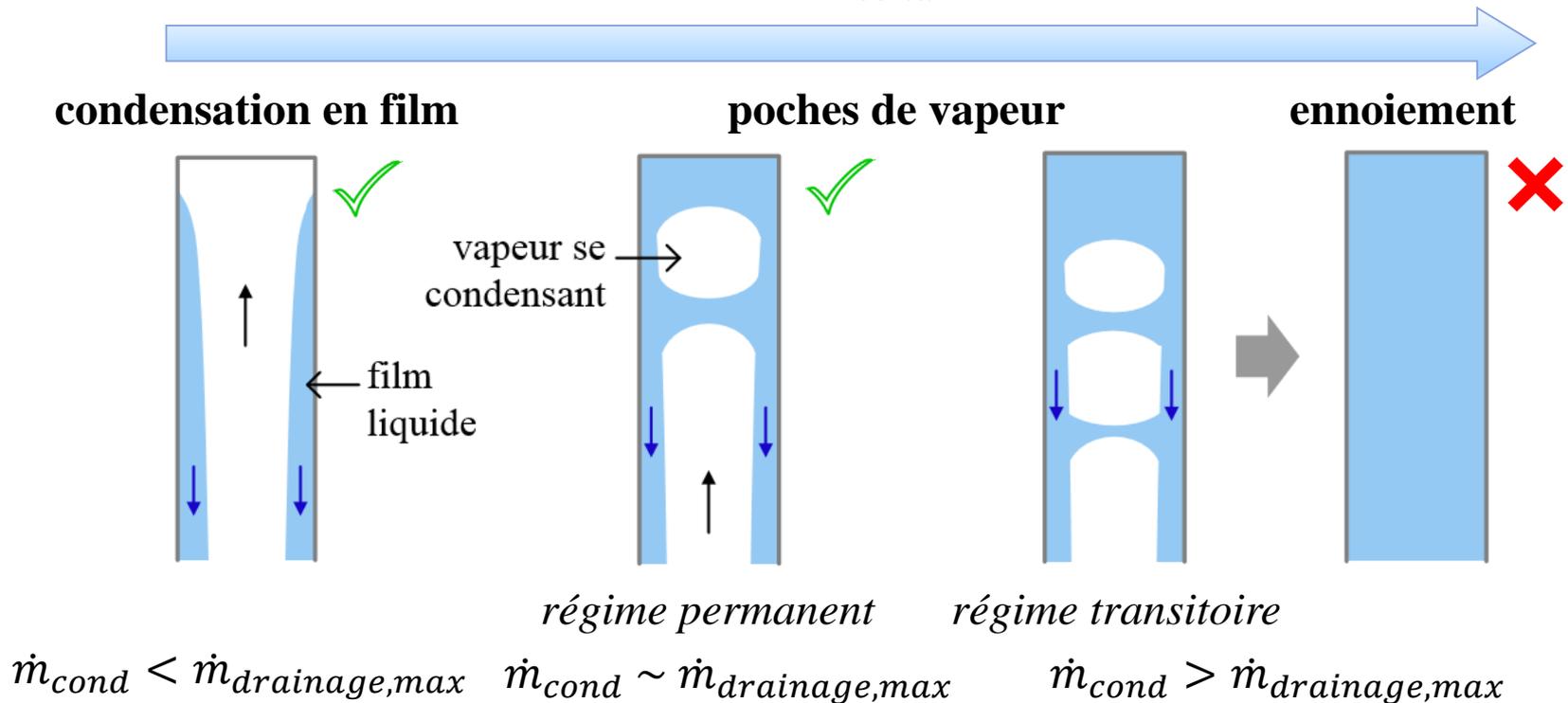
triangle, \varnothing 2 mm, 95 W

$$\dot{m}_{cond} < \dot{m}_{drainage,max} \quad \dot{m}_{cond} \sim \dot{m}_{drainage,max}$$

Influence de la section transversale

Condenseurs à ailettes de différentes sections

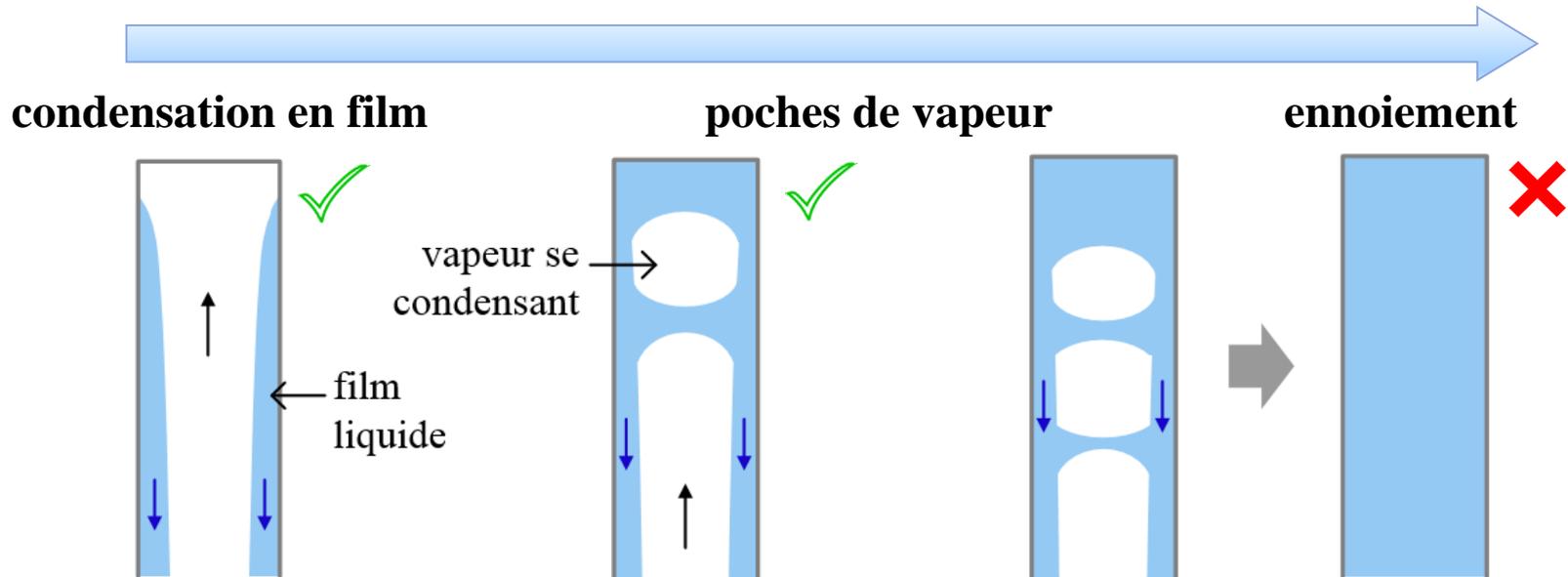
\dot{Q} et $\dot{m}_{cond} \nearrow$



Influence de la section transversale

Condenseurs à ailettes de différentes sections

\dot{Q} et $\dot{m}_{cond} \nearrow$



	condensation en film	poches de vapeur	unnoiement
\varnothing 2 mm	-	-	8 - 45 W
	-	-	8 - 45 W
	non testé	20 - 40 W	50 W
	non testé	70 - 95 W	-

$\dot{m}_{drainage} \nearrow$



Conclusions

Quelle section transversale permet de minimiser la stabilité des bouchons ?

- ✓ sections cannelées → influence directe sur la courbure *modèle*
- ✓ section triangulaire → diminution de l'hystérésis *expérience*

Quelle section transversale permet de maximiser le drainage du condensat ?

- ✓ section triangulaire *essais au HFE-7100*
diamètre minimal
pour éviter l'engorgement



Présentation des condenseurs

- Objectifs :
- déstabiliser les bouchons de liquide
 - retarder l'apparition de l'engorgement

lattice



○ $D_{inscrit} = 1,7 \text{ mm}$

araignée



○ 10,6 mm ○ 1,6 mm

araignées multiples

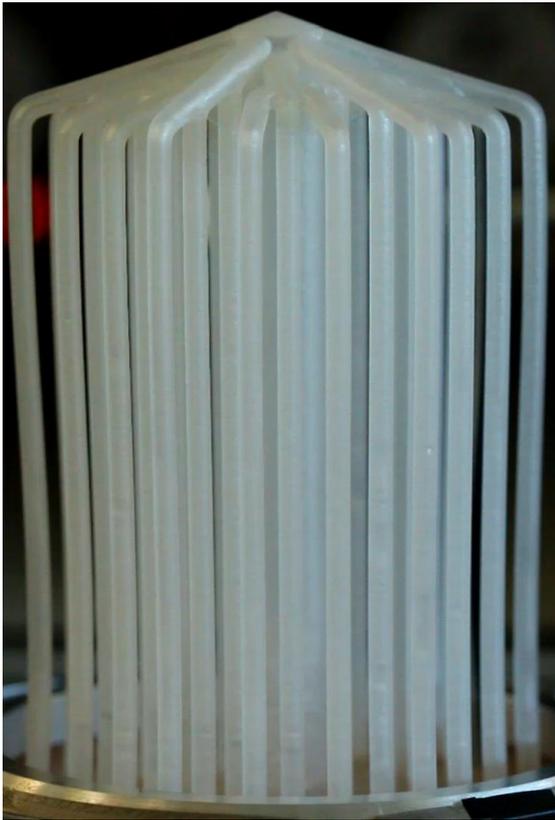


○ 5,6 mm △ 1,8 mm

Résultats et observations

Les 3 condenseurs fonctionnent

HFE : quasiment aucune accumulation de condensat
Eau : accumulation significative



HFE, araignée, 90 W



Eau, araignée, 110 W

- ✓ retarder l'envoiement
- ✓ déstabiliser les bouchons

Performances en convection

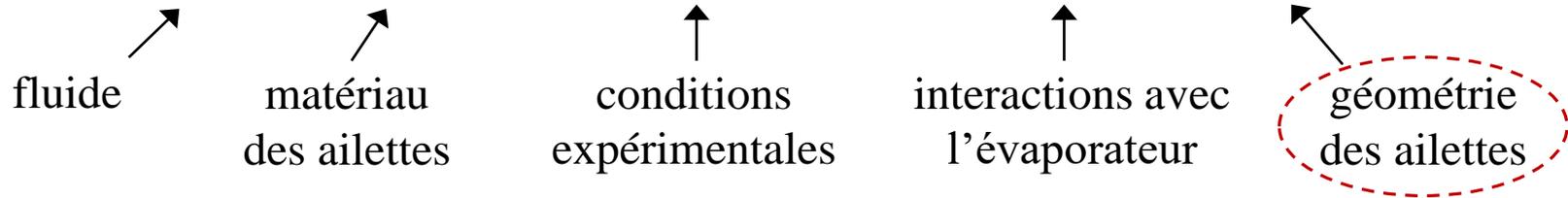
nombreuses ailettes
de petit diamètre



Régimes de condensation

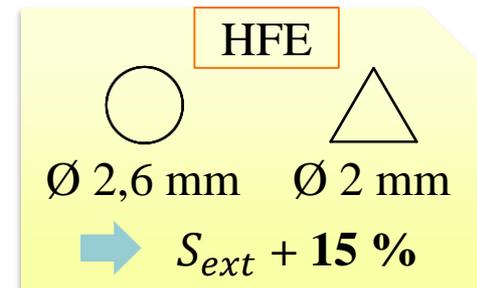
éviter l'accumulation de liquide
dans les ailettes

➔ Optimisation : déterminer le **diamètre minimal** des ailettes



Une modification de la section transversale permet-elle une réduction de diamètre supplémentaire avant le blocage de la condensation dans les ailettes ?

- ✓ section triangulaire
- déstabiliser les bouchons
 - débit de drainage élevé
 - compacité



Performances en convection

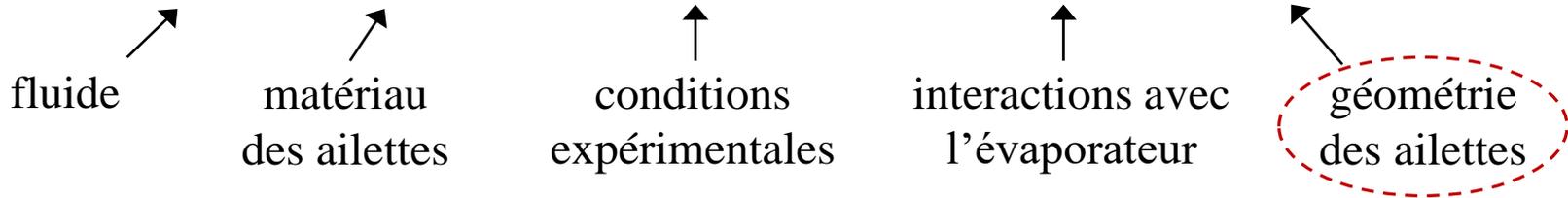
nombreuses ailettes
de petit diamètre



Régimes de condensation

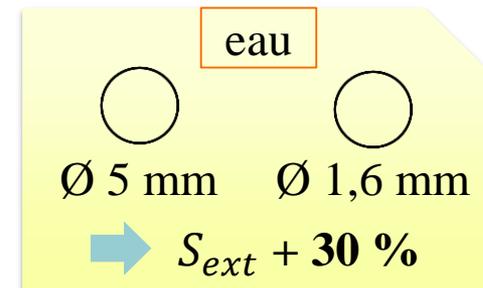
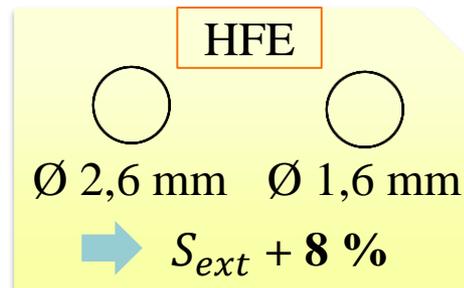
éviter l'accumulation de liquide
dans les ailettes

➔ Optimisation : déterminer le **diamètre minimal** des ailettes



Des interconnexions entre les ailettes permettent-elle une réduction de diamètre supplémentaire avant le blocage de la condensation dans les ailettes ?

- ✓ retarder l'ennoiement
- ✓ déstabiliser les bouchons



Élise BÉRUT

Journées du GDR TRANSINTER – 7 au 9 juin 2022

**Phénomènes de condensation
siégeant au sein d'une chambre de vapeur
à ailettes creuses intégrées**

Merci de votre attention