

Couplage d'une thermofrigopompe à une unité de distillation membranaire

Paul Byrne

Maître de Conférences à l'IUT de Génie Civil Construction Durable
Chercheur au LGCGM

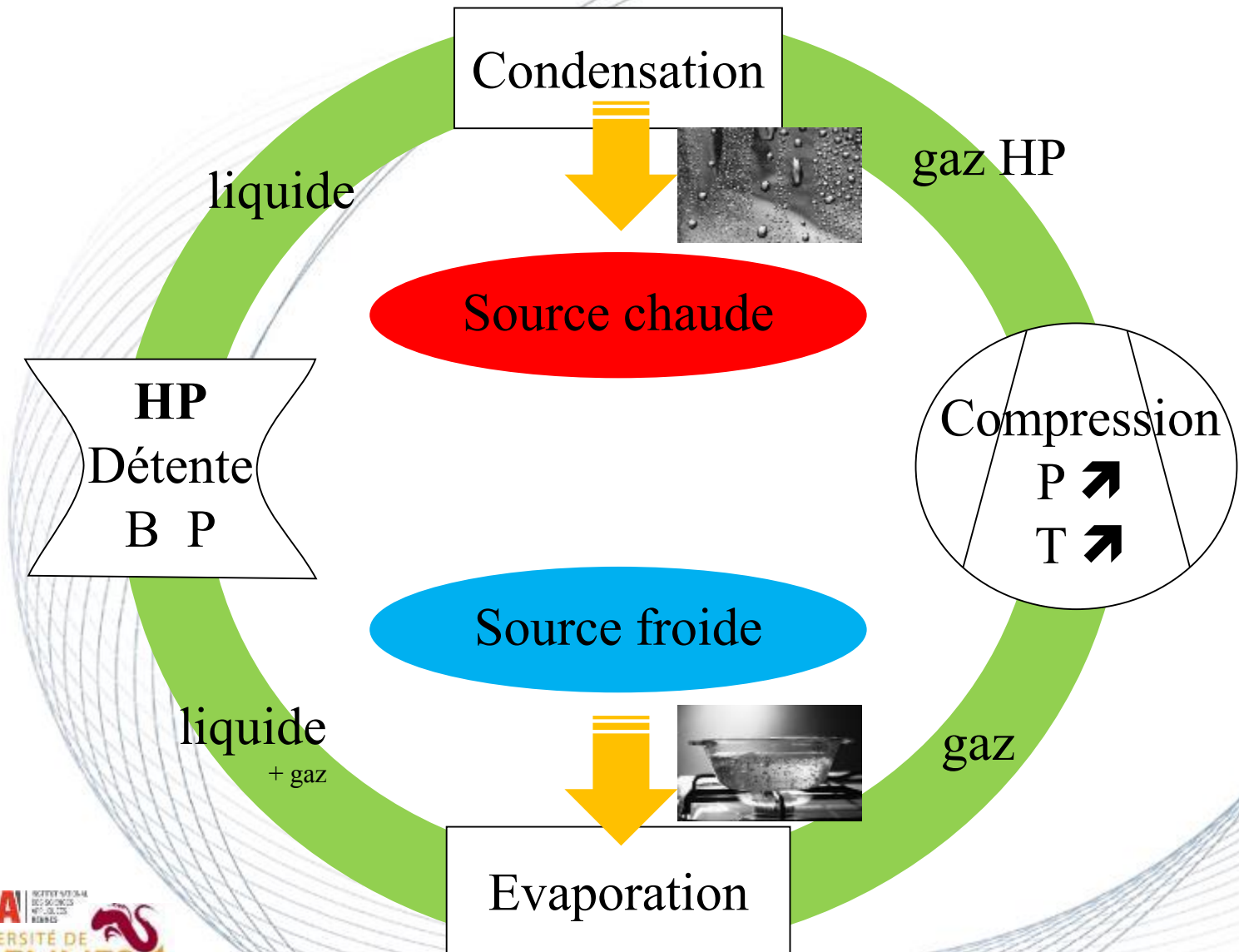
Ahmadou Tidiane Diaby

Doctorant à l'Université de Rennes 1
et à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Machines frigorifiques



Fluide frigorigène



Exemples

Air de la pièce



Thermofrigopompes (Labo)

- Valoriser la chaleur et le froid

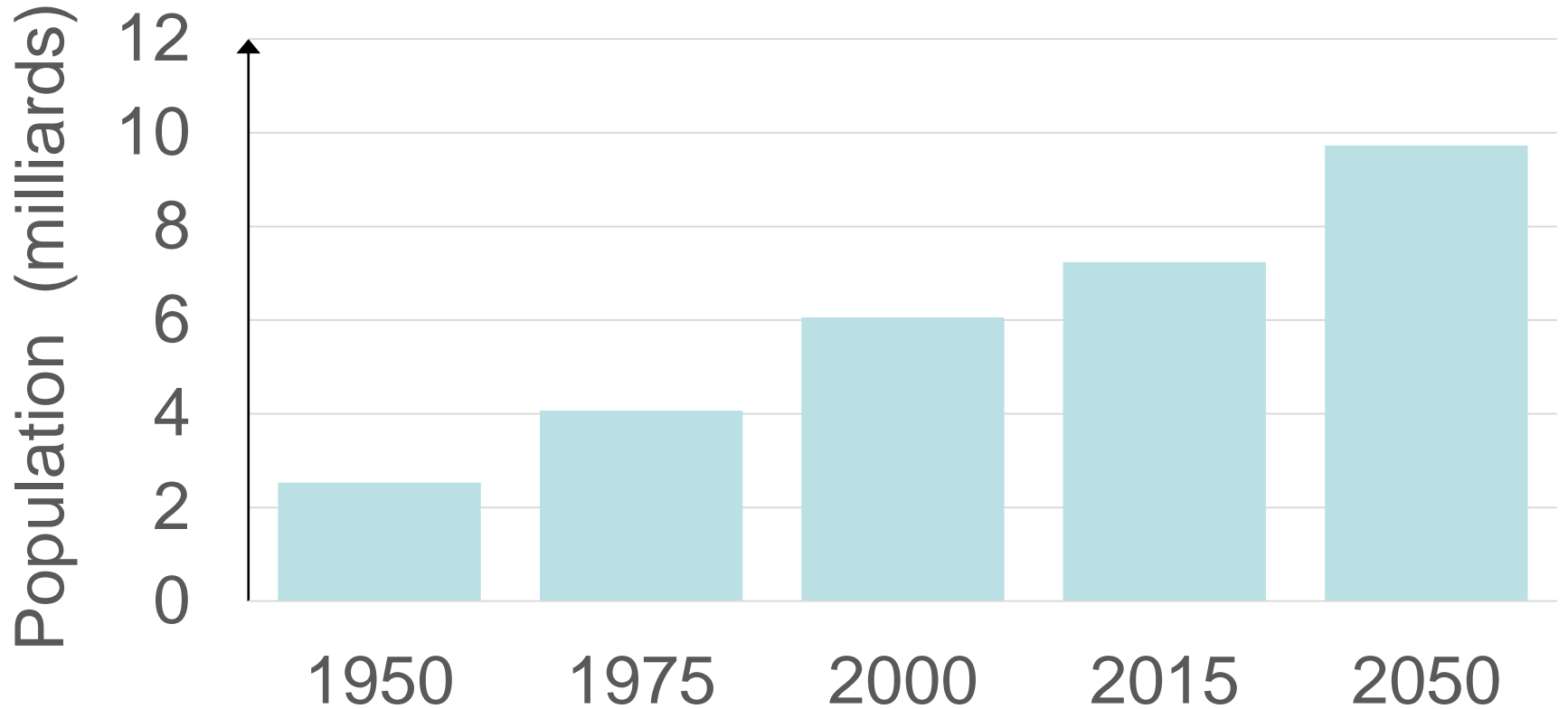


Air de la pièce

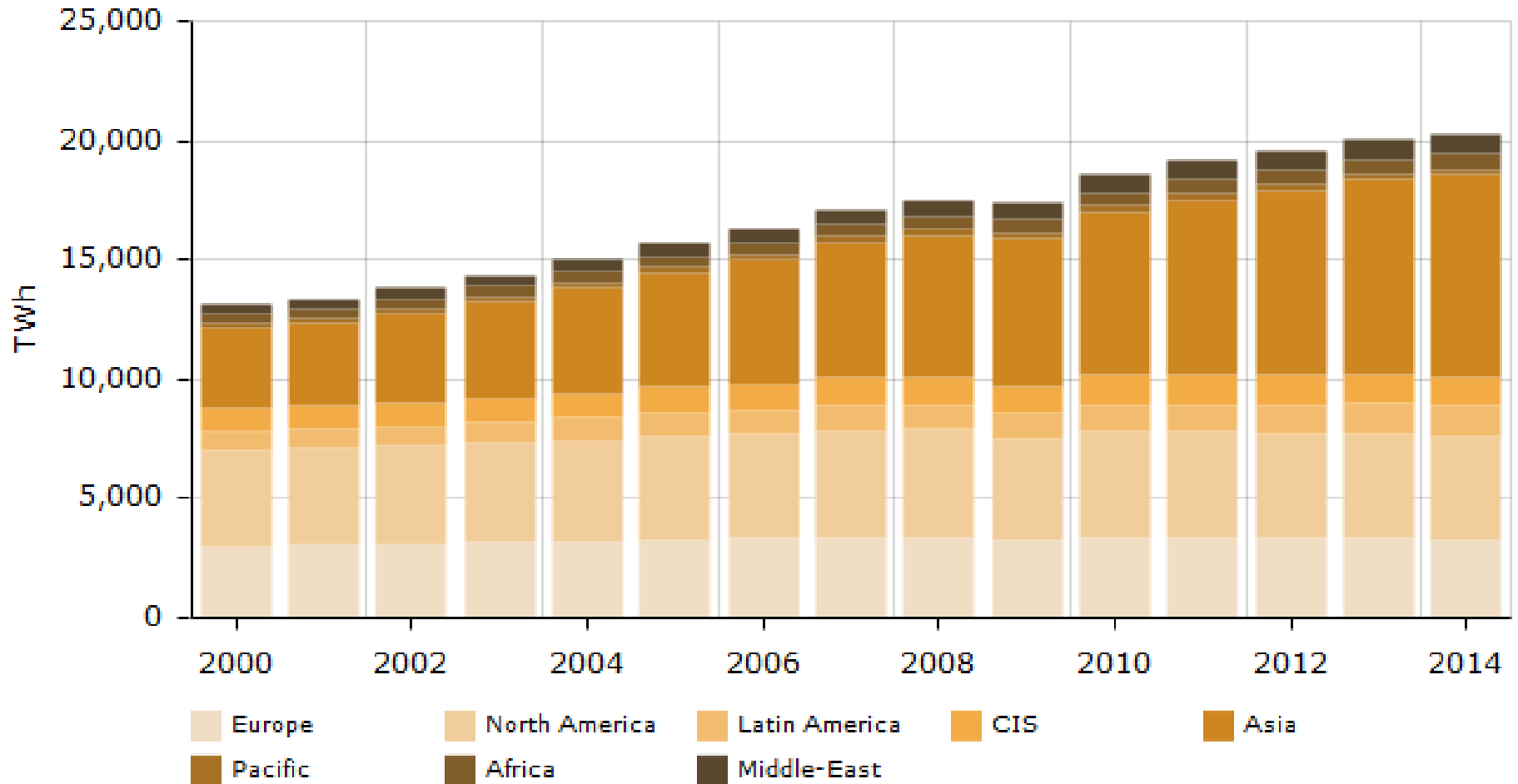


Air extérieur

Population mondiale



Consommation d'électricité



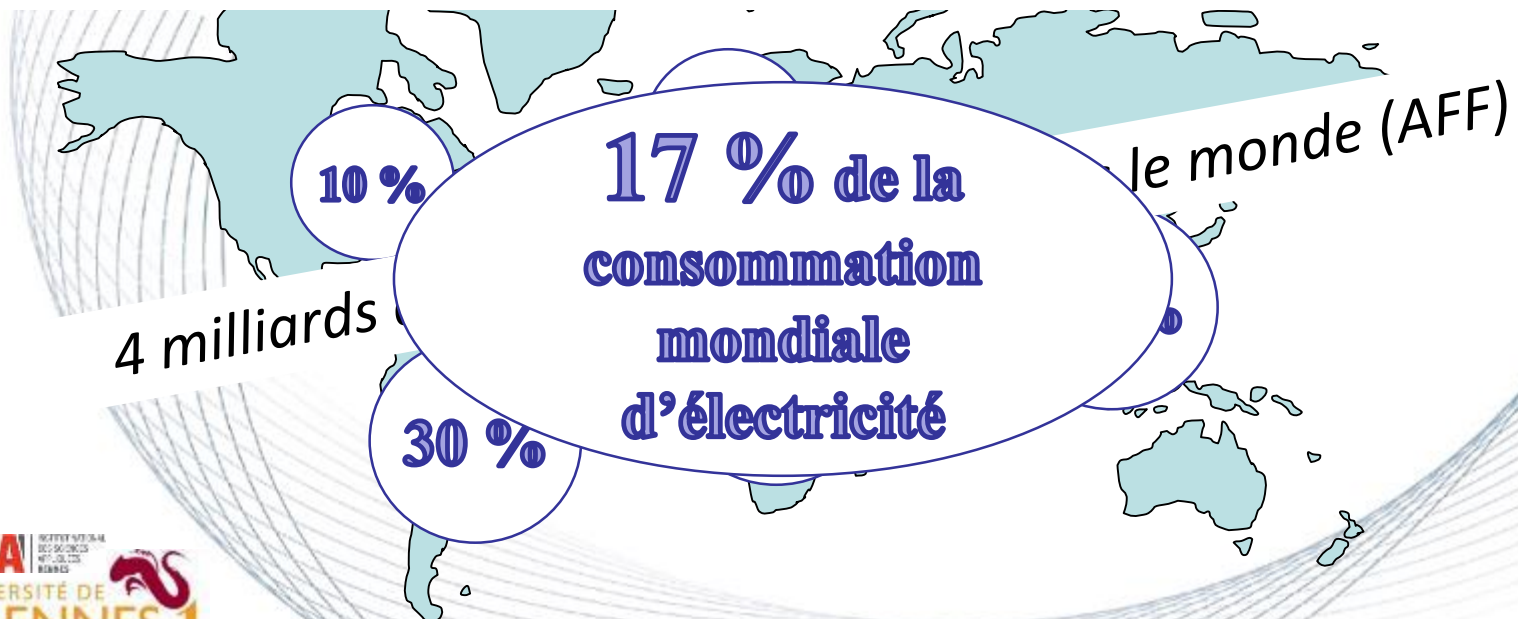
Source : Enerdata.net

La climatisation en 2014

Vakiloroaya V. et al. A review of different strategies for HVAC energy saving, Energy Conversion and Management 77 (2014) 738–754

- En Europe, le bâtiment = environ 40 % de la consommation d'énergie (aux USA, 50 %)
- En Australie, les bâtiments non résidentiels = 70 % de la consommation d'électricité
- En Inde, la climatisation = 32 % de la consommation d'électricité pour certains bâtiments
- A Hong Kong en 2006, le froid et la climatisation = 33 % de la consommation d'électricité
- Au Moyen Orient, le froid et la climatisation = plus de 70 % de la consommation d'énergie

Part de la consommation d'électricité des bâtiments



Tendances en 2000-2100

Isaac M. et al. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change, Energy Policy 37 (2009) 507–521

Avec la participation du réchauffement climatique,

- Baisse de 34 % pour le chauffage
- Hausse de 72 % pour la climatisation

Valorisons la chaleur perdue !

62 condenseurs

2 fois la surface

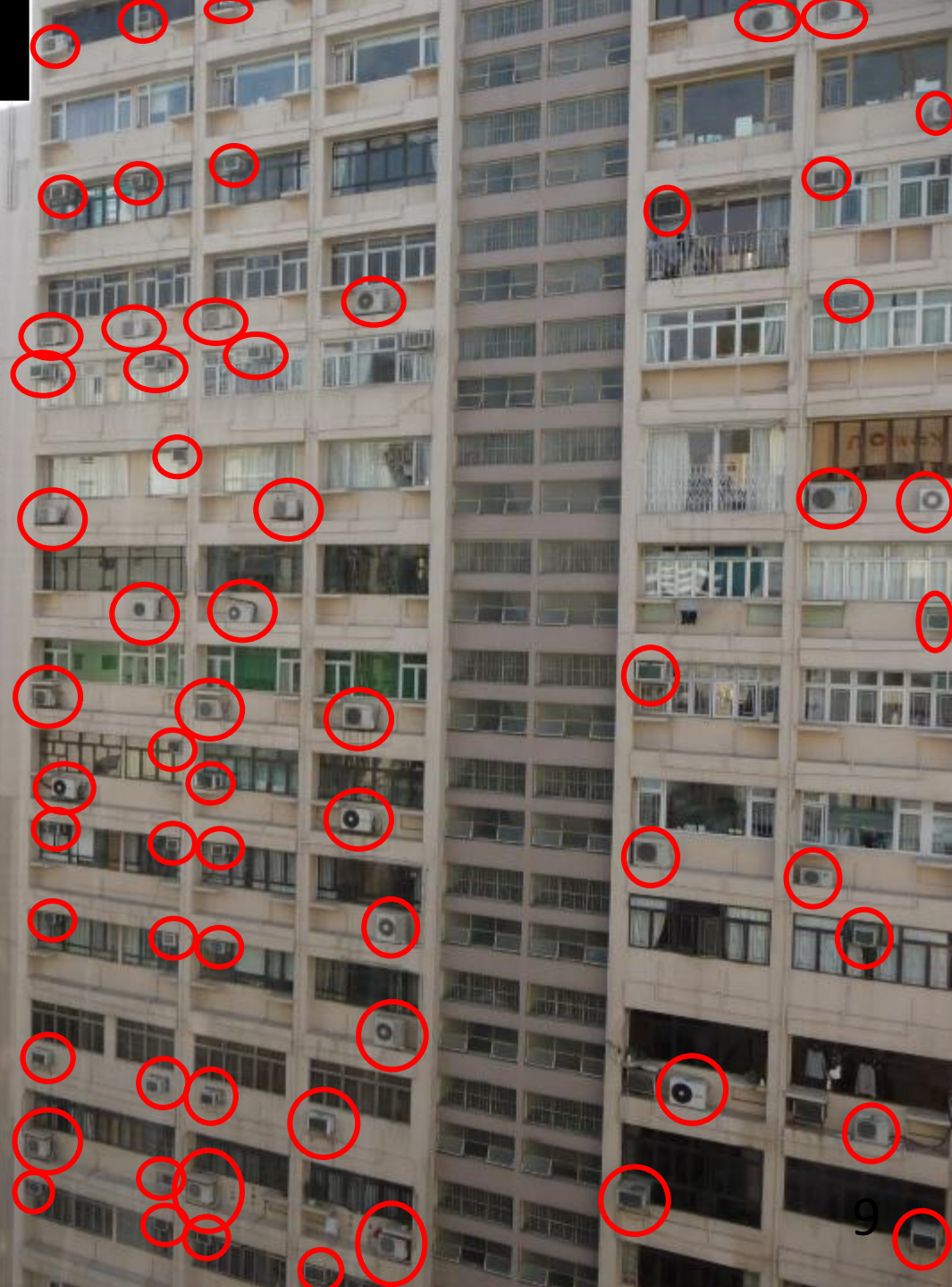
2 façades

~3 kW

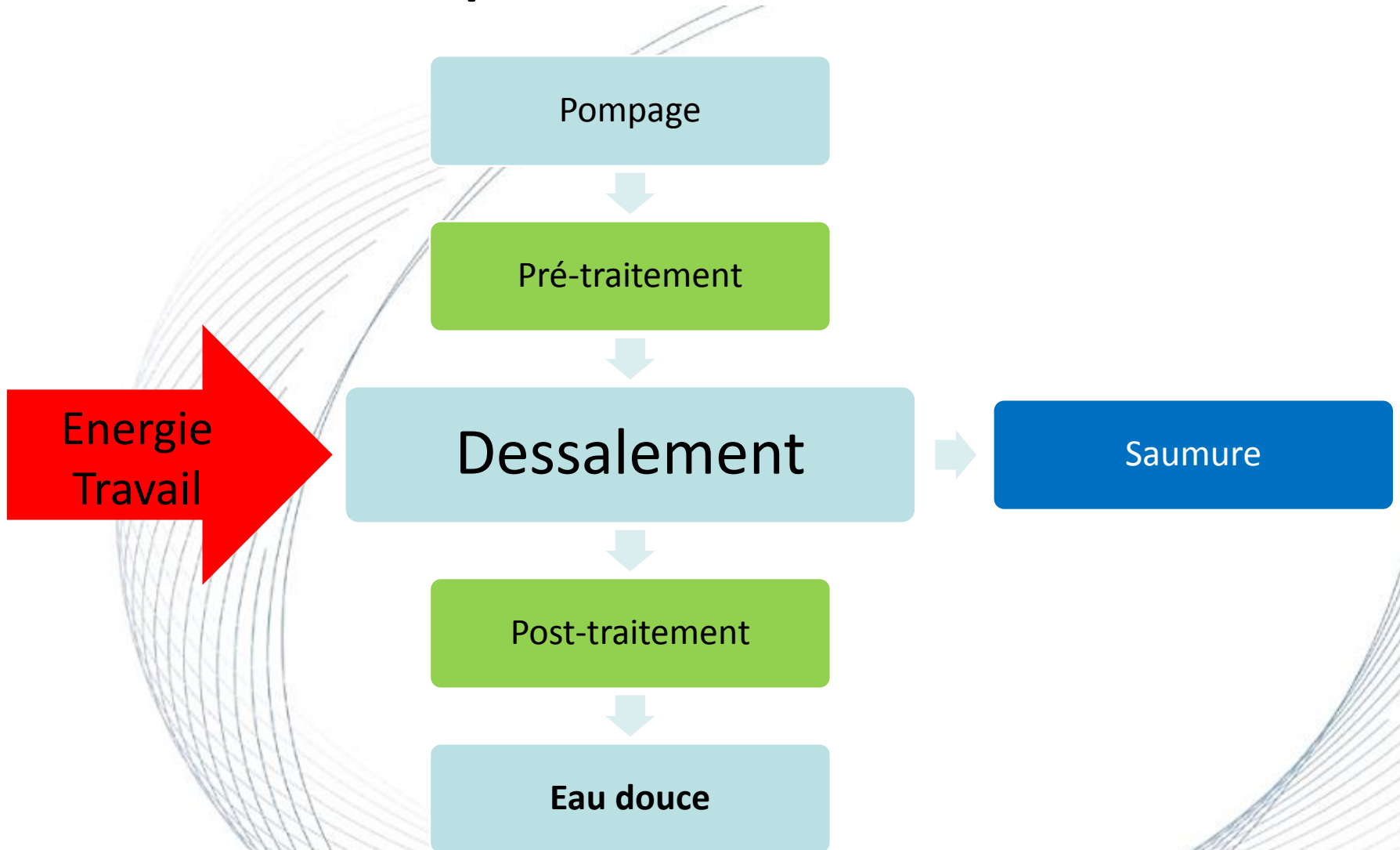
62 x 2 x 2 x 3

= 744 kW thermiques

**Soit la chaleur rejetée
par ~620 frigos de 100 l**

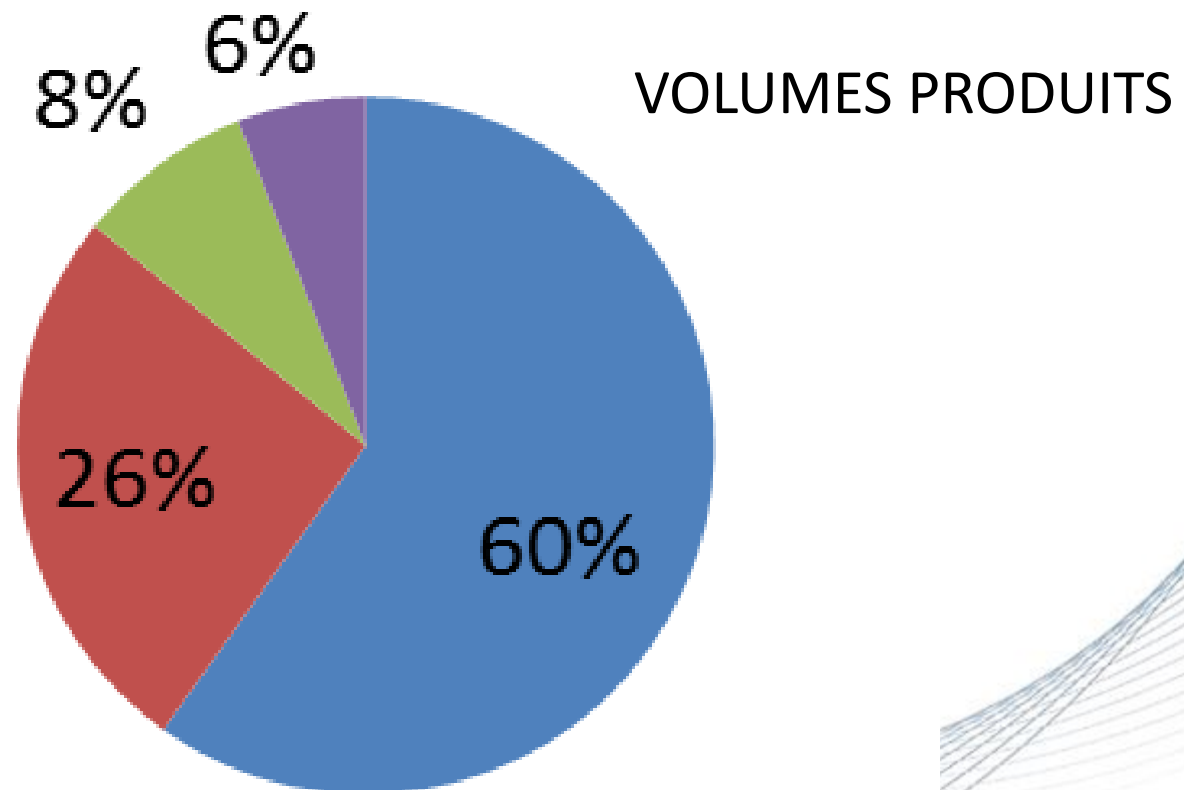


Principe du dessalement



Types de systèmes

- Osmose Inverse
- Distillation multi-stage flash
- Distillation multiple effet
- Autres

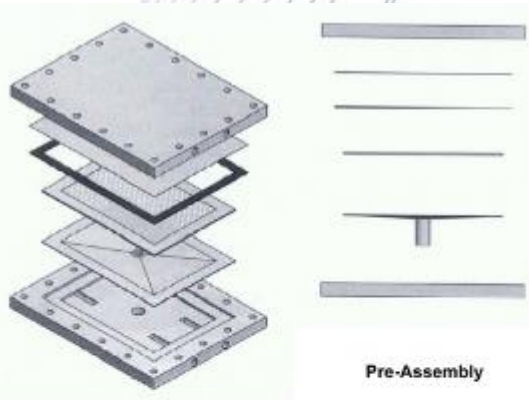


Distillation membranaire

- $T = 25 \text{ à } 80 \text{ °C}$

Compatible avec les niveaux de température d'un condenseur de climatiseur

- Technologie en développement rapide



MDS 40



MDS 500



MDS 1000



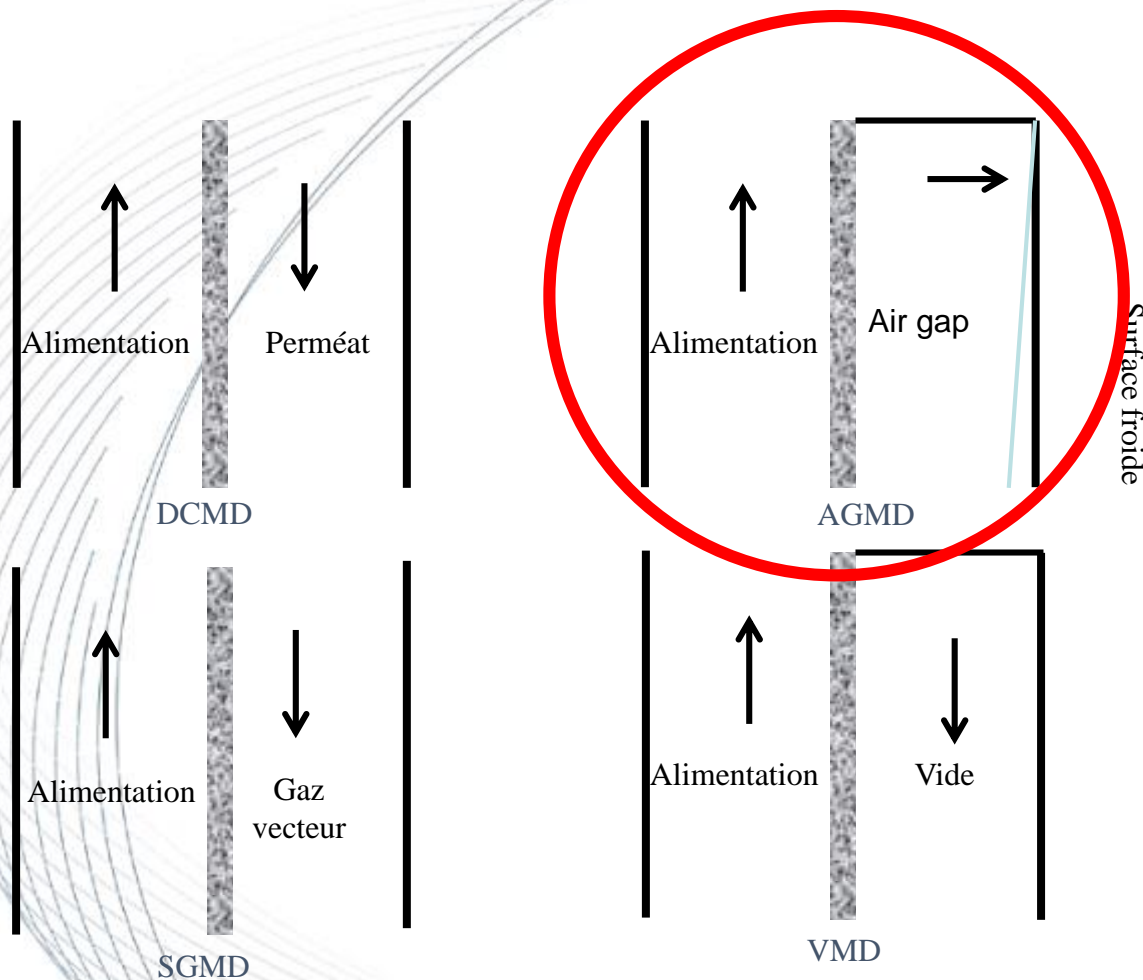
Serial	Quantity	Title Name, designation, material, dimension etc.	Article No./Reference			
Designer/Key	Checked by	Approved by - Date	File name	Date	Scale	
	Dr. Loeb R.L. Ng	Dr. Loeb R.L. Ng - 1-Feb-15	MS13 - DCMD	24-Jan-2013	N.A.	
		Direct Contact Membrane Distillation				
		MS13 - DCMD (A)	Edition 3	Sheet 1/1		

Membranes

- Microporeuses : $\sim 0,2 \mu\text{m}$
- Hydrophobes : seule la vapeur passe
- Polypropylène, PTFE (Teflon), PVDF, PAN...

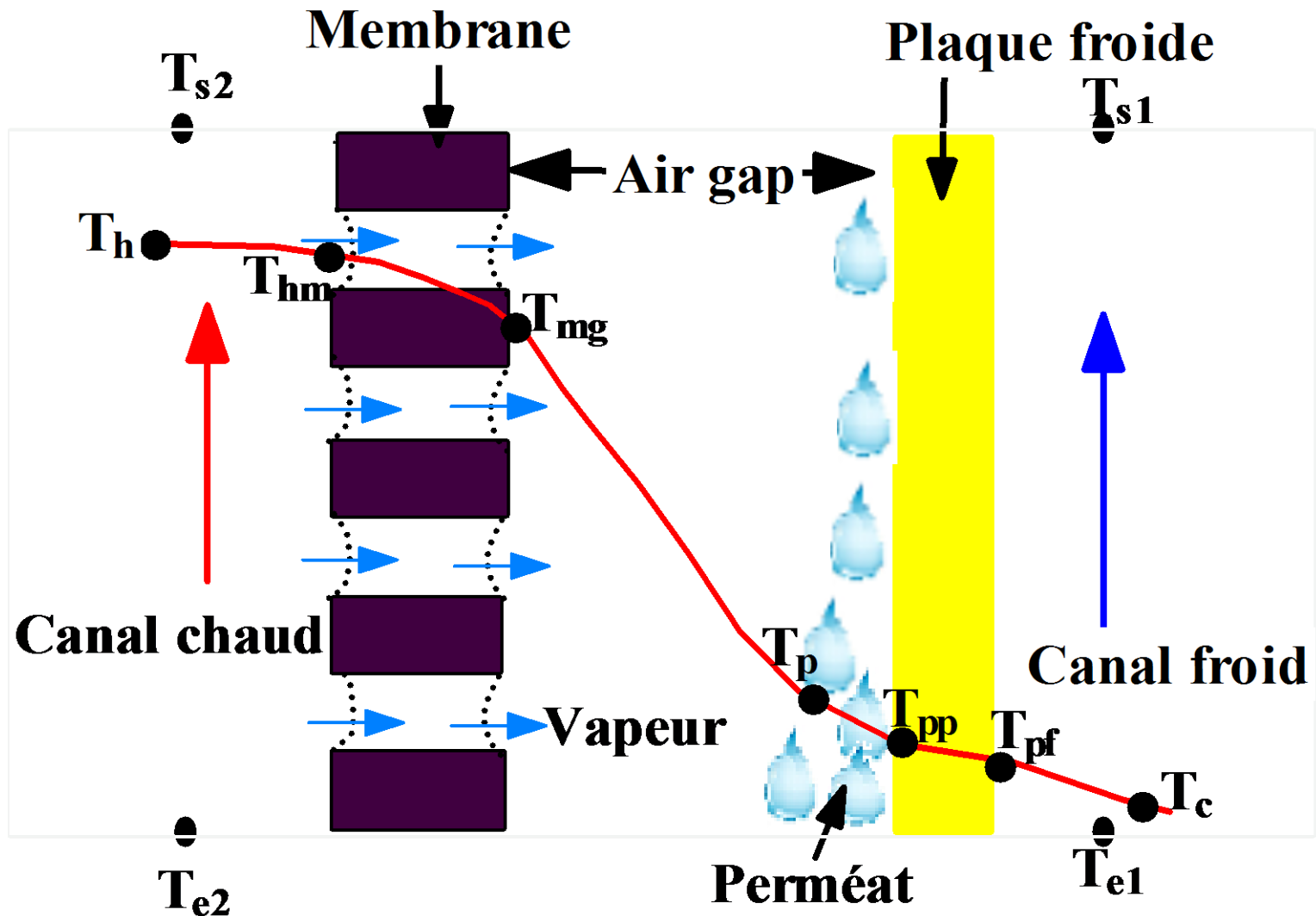


Types de distillation membranaire



1 pompe =
Pas d'autre
auxiliaire
Evacuation
du perméat
par gravité

Principe de l'AGMD



Pilote à l'ISCR

Canal
d'eau froide

Cassette

Perméat

Pompe

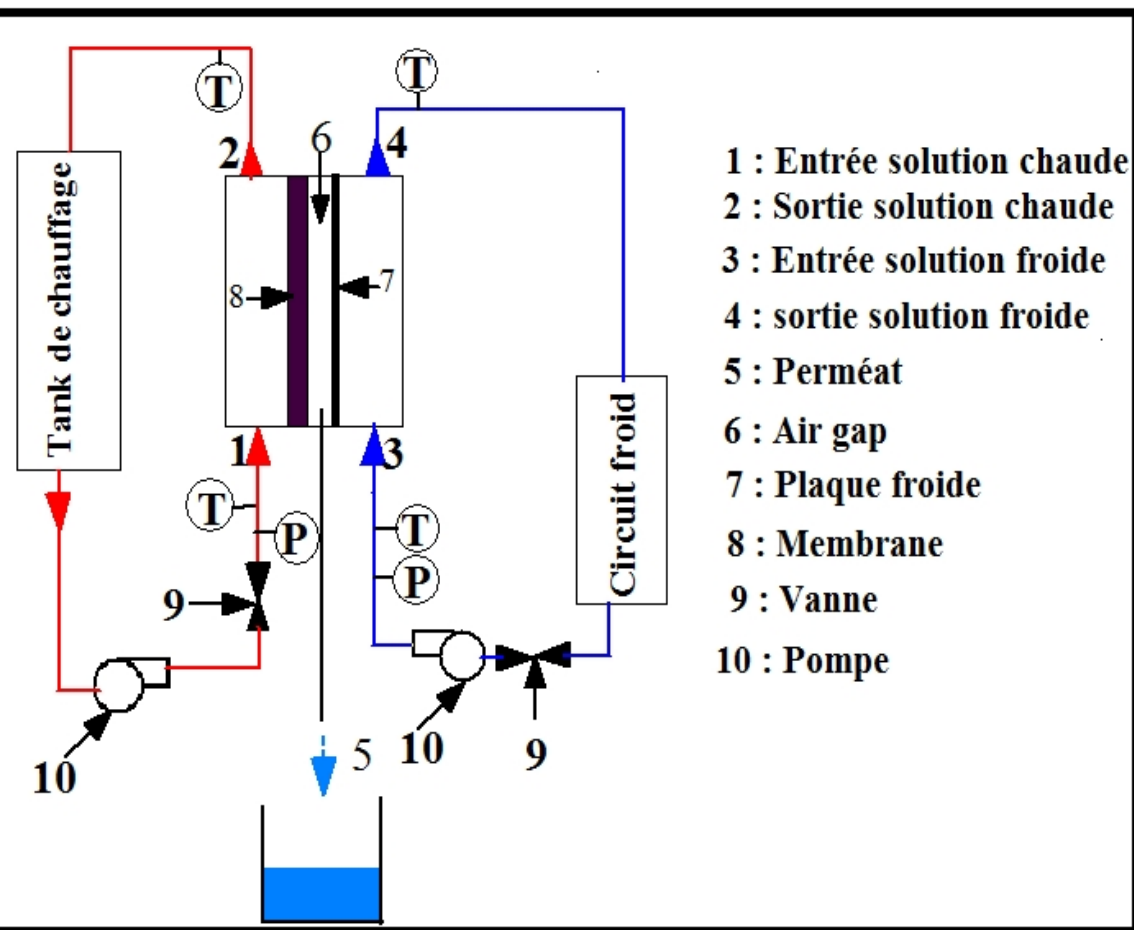
Réservoir

Chauffage
électrique

Boîtier
éclectique



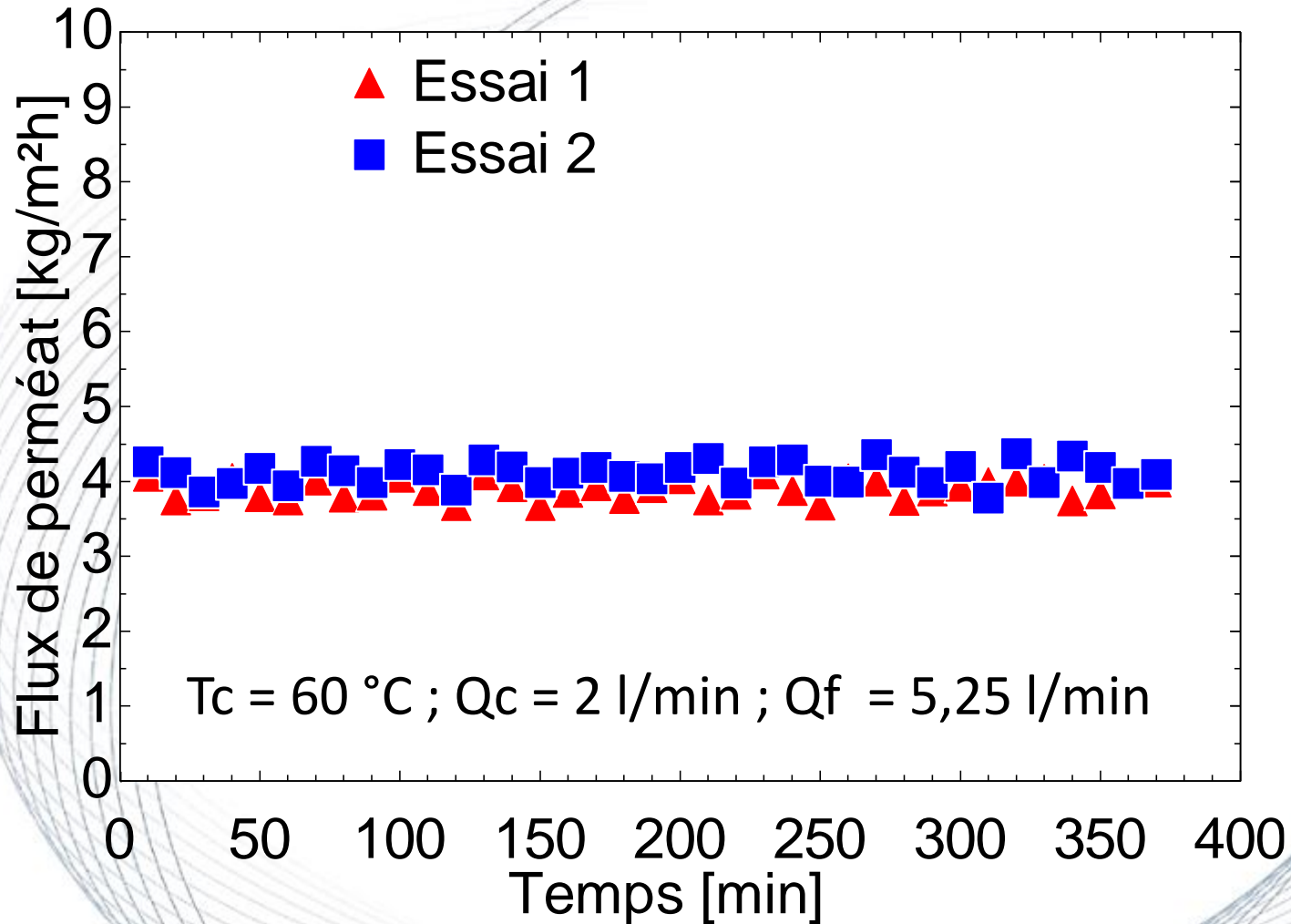
Dispositif expérimental



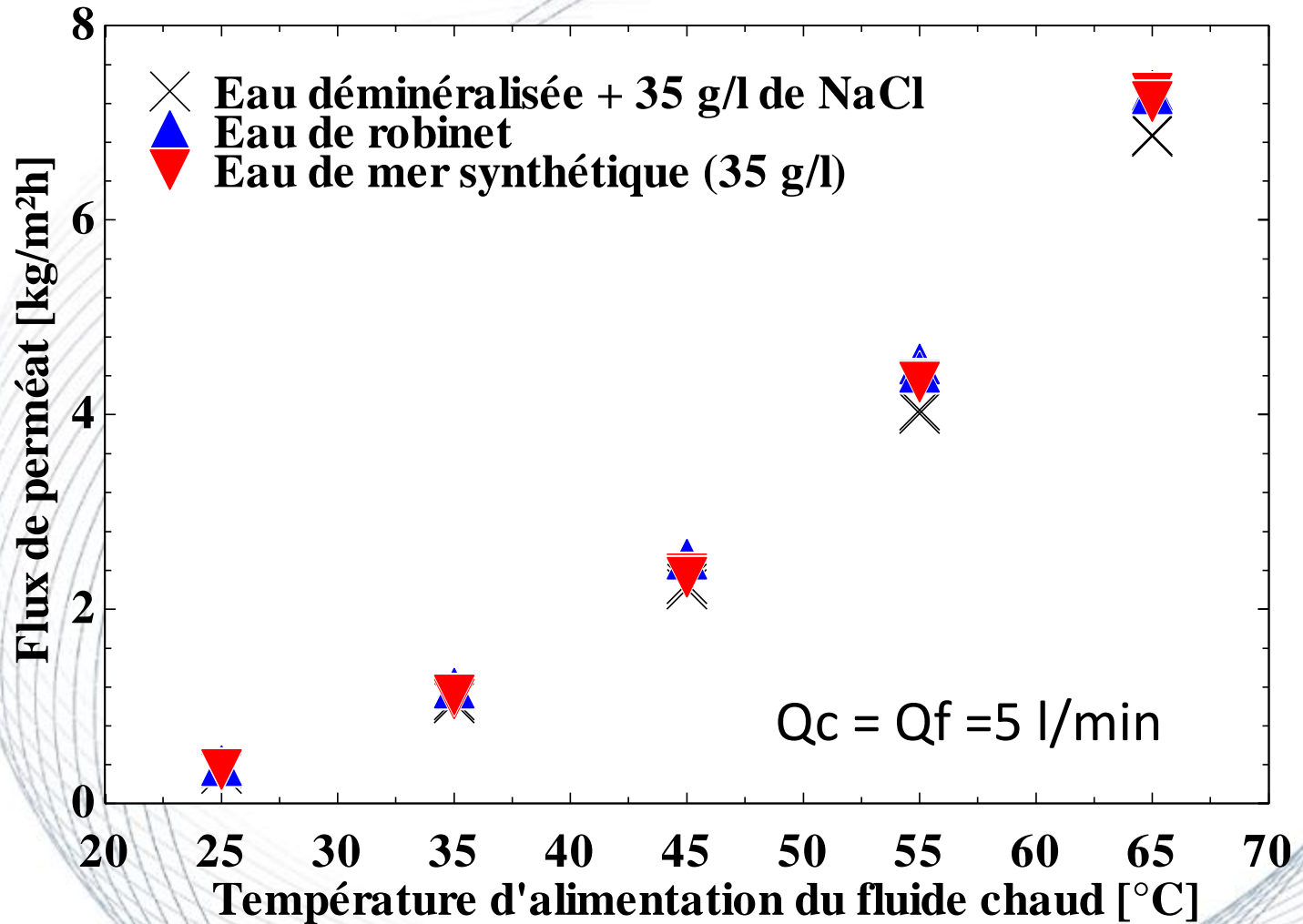
- 1 : Entrée solution chaude
- 2 : Sortie solution chaude
- 3 : Entrée solution froide
- 4 : sortie solution froide
- 5 : Perméat
- 6 : Air gap
- 7 : Plaque froide
- 8 : Membrane
- 9 : Vanne
- 10 : Pompe

Membrane PTFE
Porosité : 80 %
Taille de pores : 0,2 μ m
Prélèvement perméat : 20 mn
Balance incertitude : 0,1 g

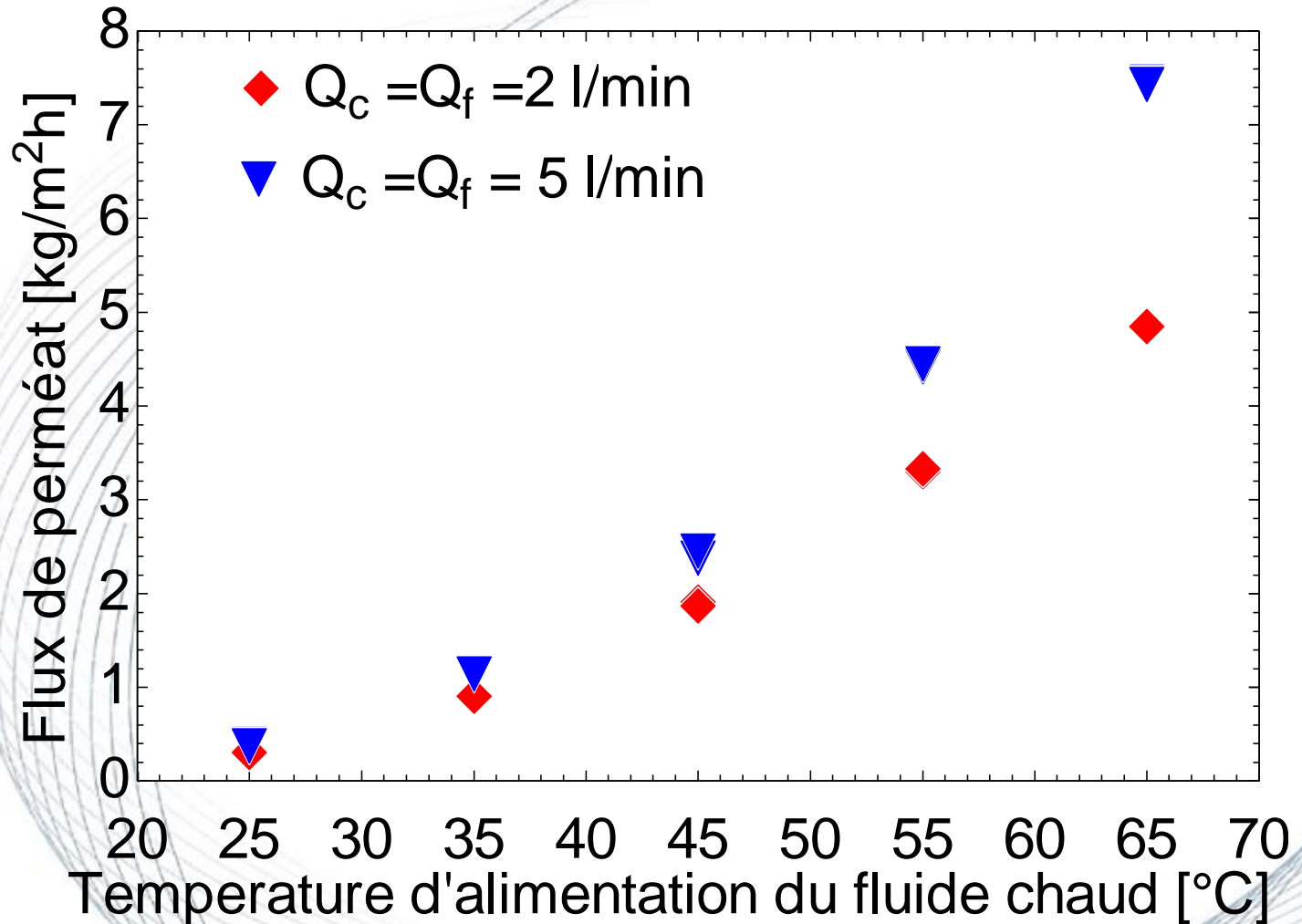
Essai de répétabilité



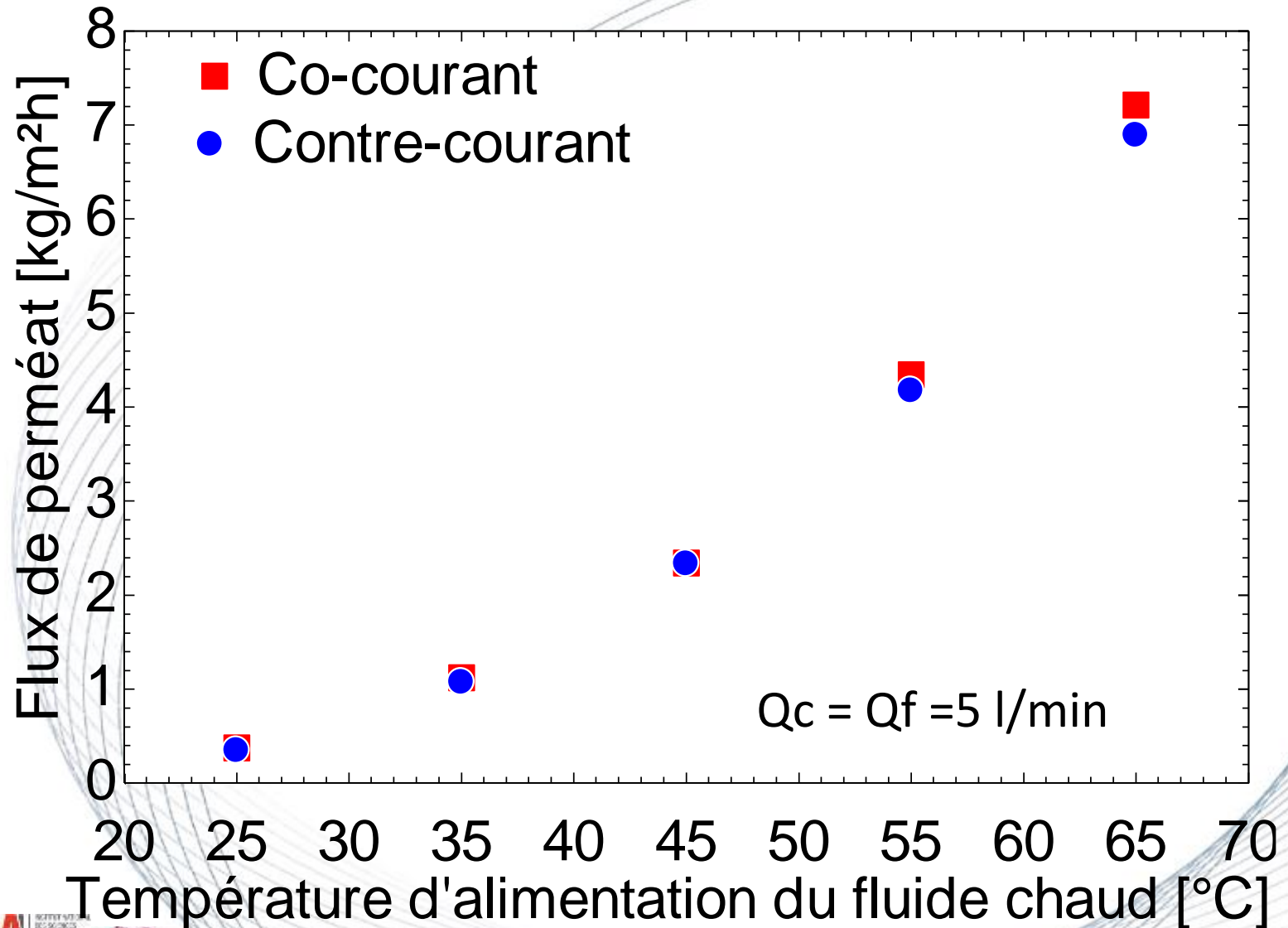
Effet de la nature de la solution



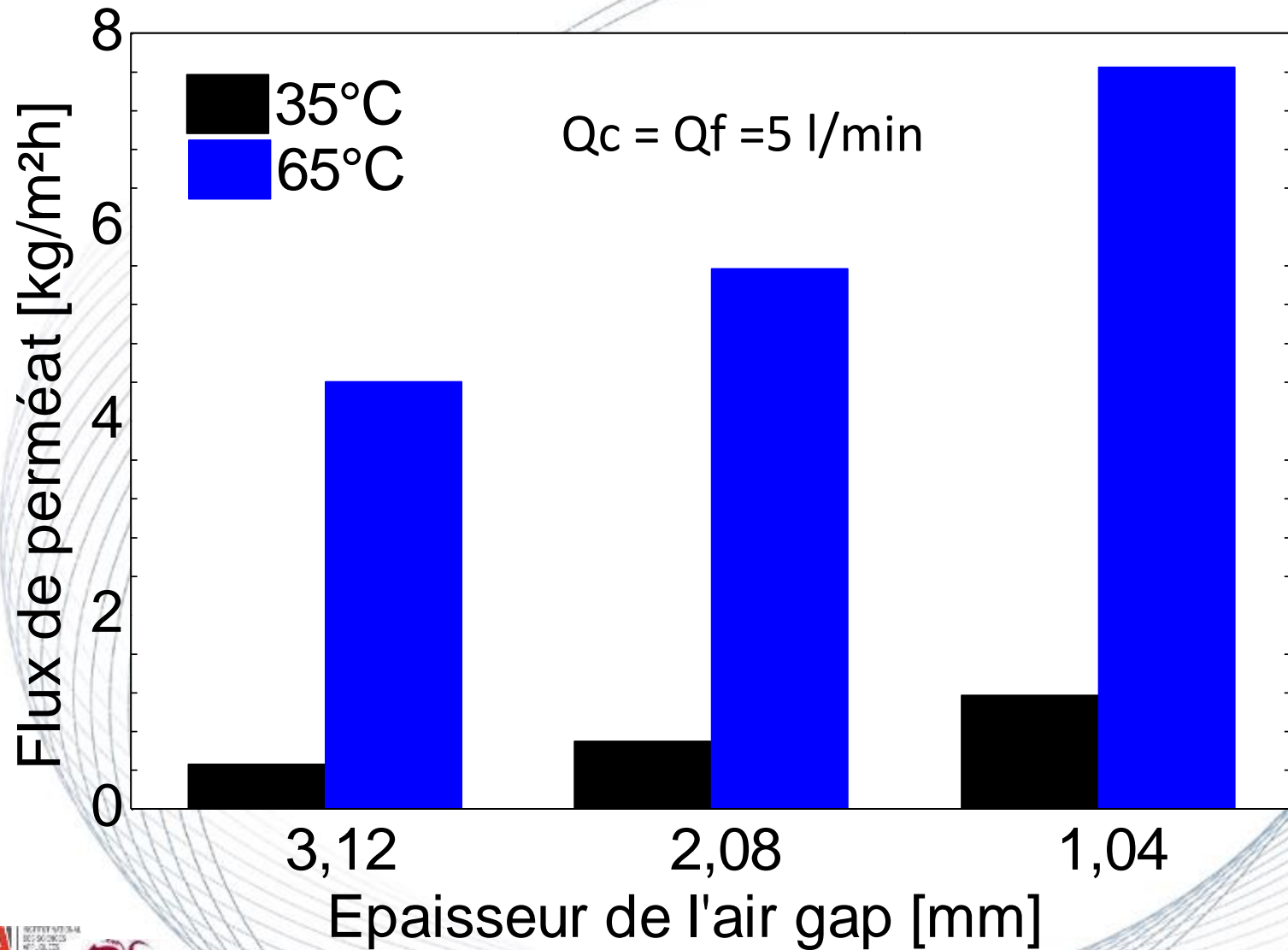
Influence du débit et de la température



Peu d'influence du type d'écoulement



Influence de l'épaisseur de l'air gap



Modèle de simulation 1/2

- **Transfert de chaleur**

Flux de chaleur de la solution chaude vers la membrane

$$h_h \cdot A_m \cdot (T_h - T_{hm}) = \frac{(\dot{m}_e + \dot{m}_s)}{2} C_{p_{sw}} \cdot (T_{e2} - T_{s2}) \quad (1)$$

Flux de chaleur de la surface de la membrane

$$\frac{1}{R_{mT}} (T_{hm} - T_{mg}) + J_v \cdot \Delta H_v = h_h (T_h - T_{hm}) \quad (2)$$

Flux de chaleur travers l'air gap

$$\frac{1}{R_g} (T_{mg} - T_p) = \frac{1}{R_{mT}} (T_{hm} - T_{mg}) + J_v \Delta H_v \quad (3)$$

Flux de chaleur de l'interface de la surface de condensation à la solution de refroidissement

$$h_c A_m (T_{pf} - T_f) = \dot{m} C_p (T_{e1} - T_{s1}) \quad (4)$$

Modèle de simulation 2/2

- **Transfert de masse**

Flux de vapeur traversant la membrane

$$J_w = B_w(P_{hm} - P_p) \quad (5)$$

Equation d'Antoine pour de l'eau

$$P = \exp\left(23,1964 - \frac{3816,44}{T-46,13}\right) \quad (6)$$

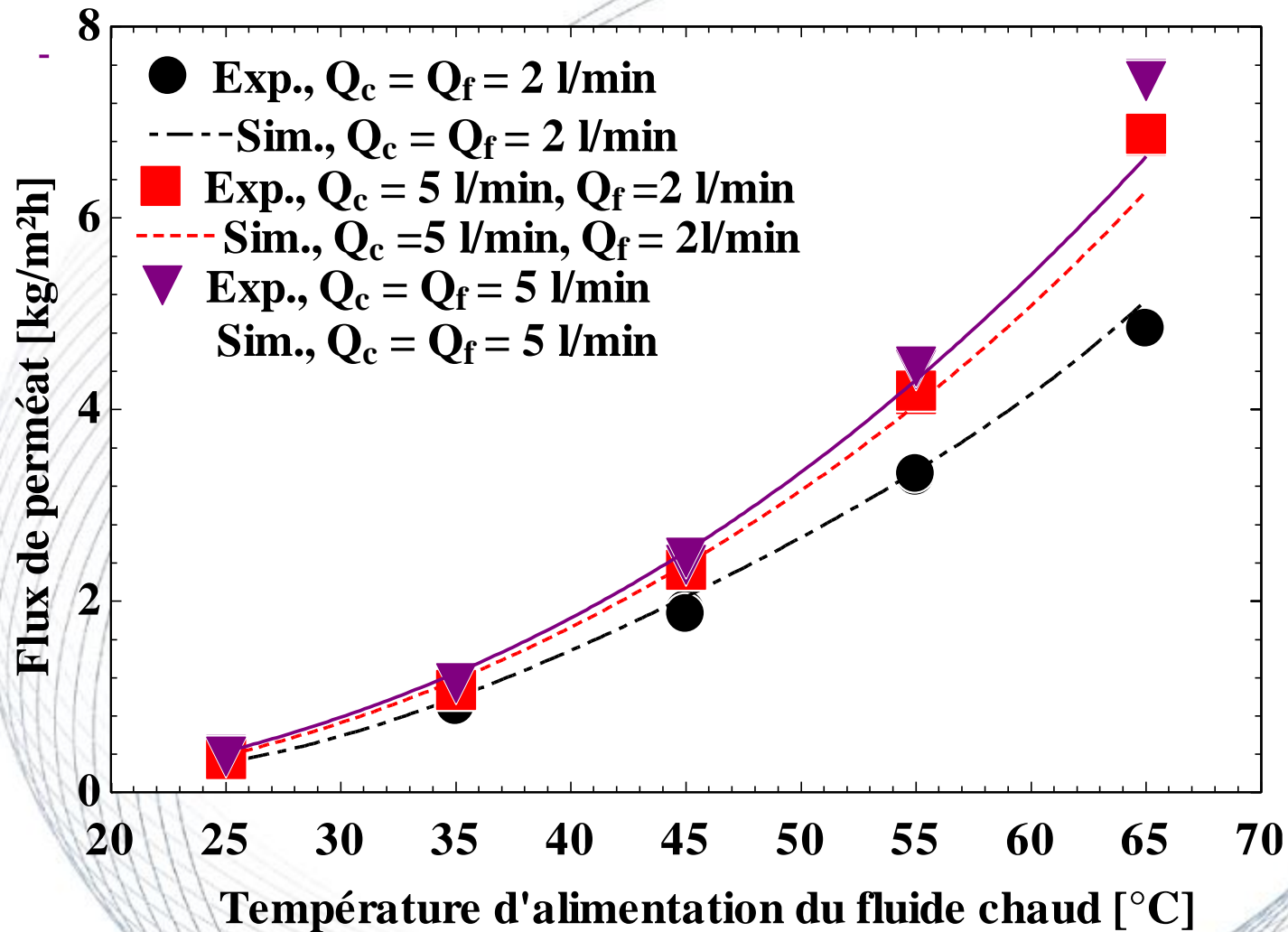
Perméabilité de la membrane

$$B_w = \frac{\varepsilon M_w P D_{ia}}{RT(\delta_m \tau + \delta_g) |P_a|_{ln,a}} \quad (7)$$

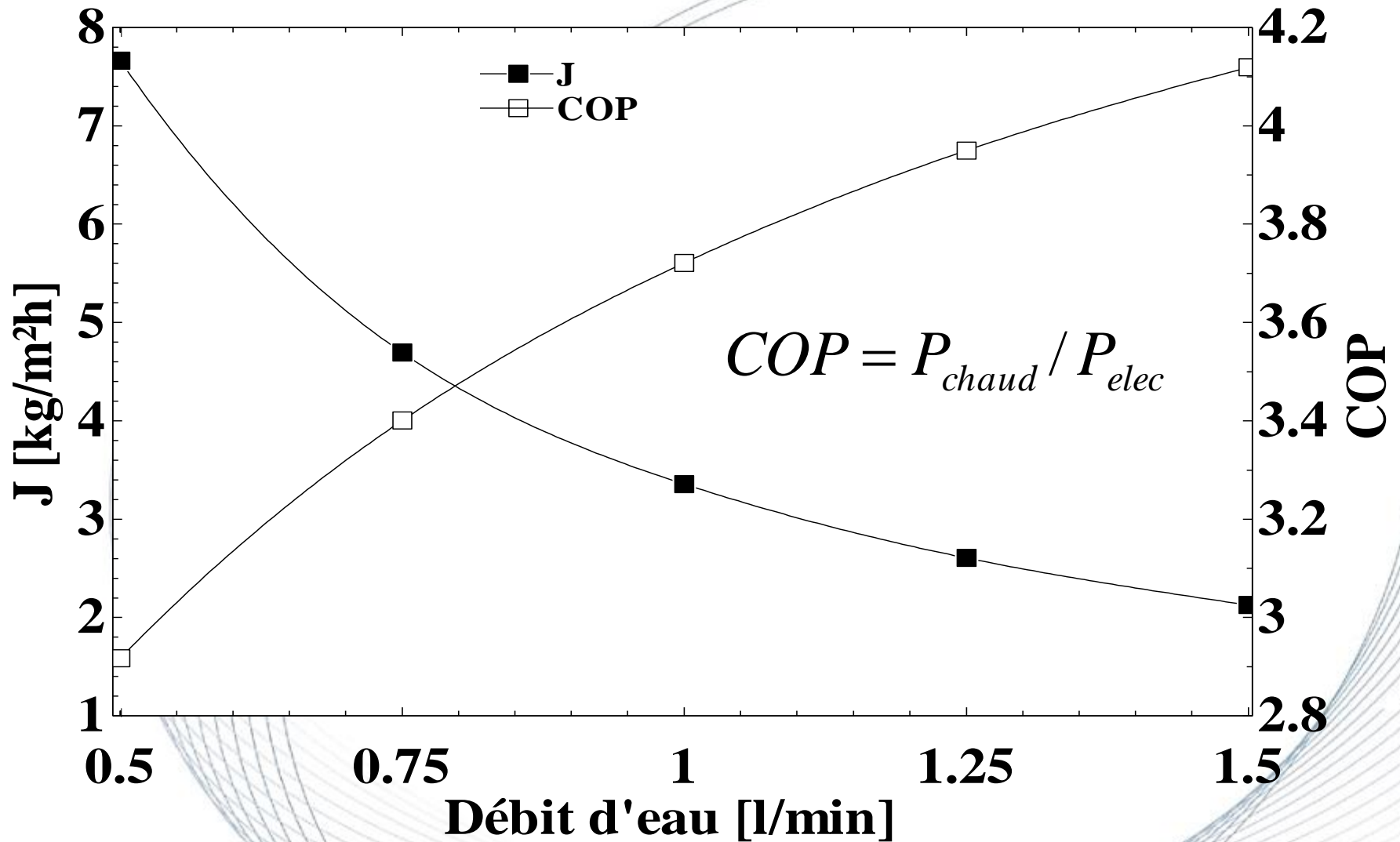
Moyenne logarithmique de la pression partielle

$$|P_a|_{ln,a} = \frac{P_{hm,a} - P_{p,a}}{\ln\left(\frac{P_{hm,a}}{P_{p,a}}\right)} \quad (8)$$

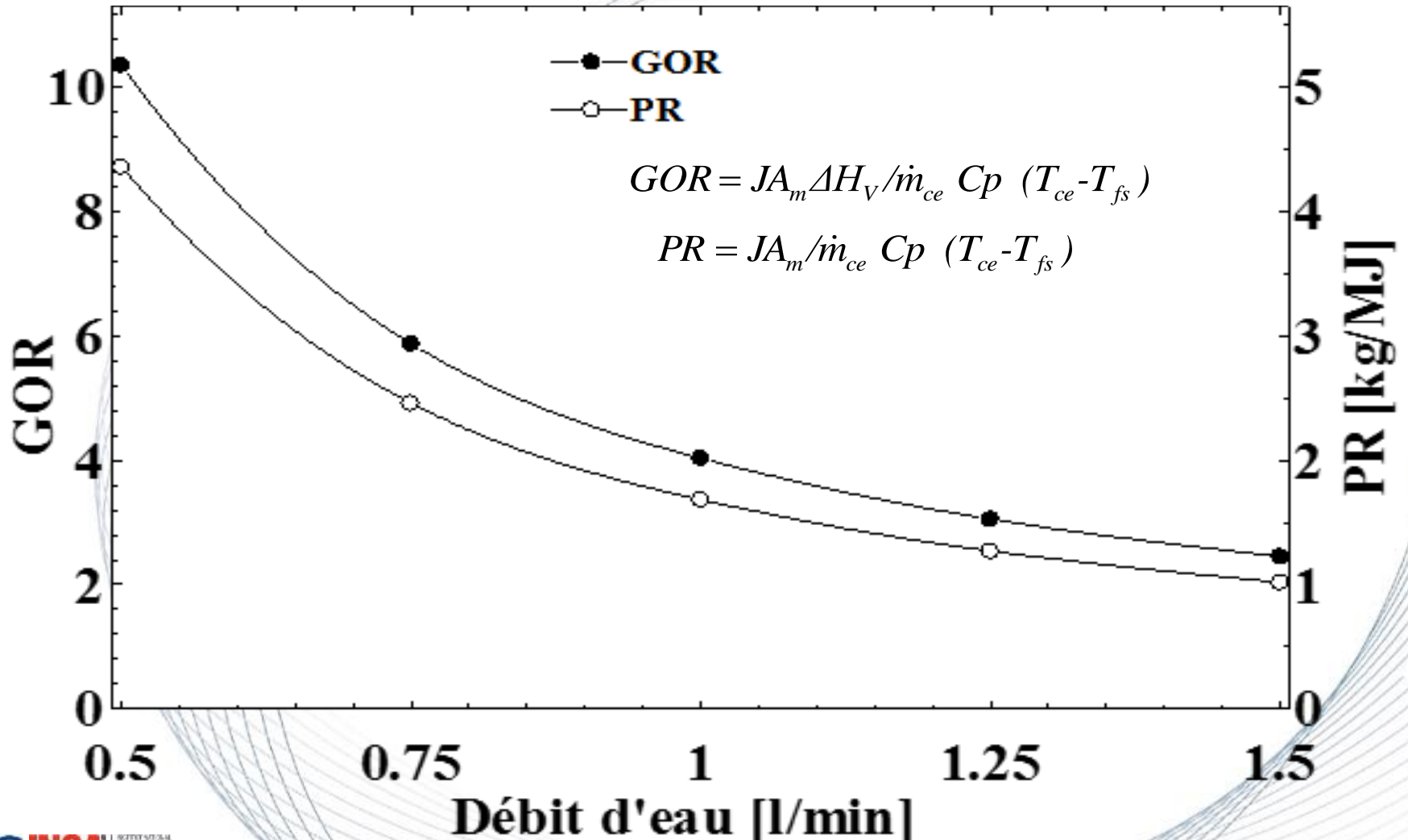
Validation du modèle



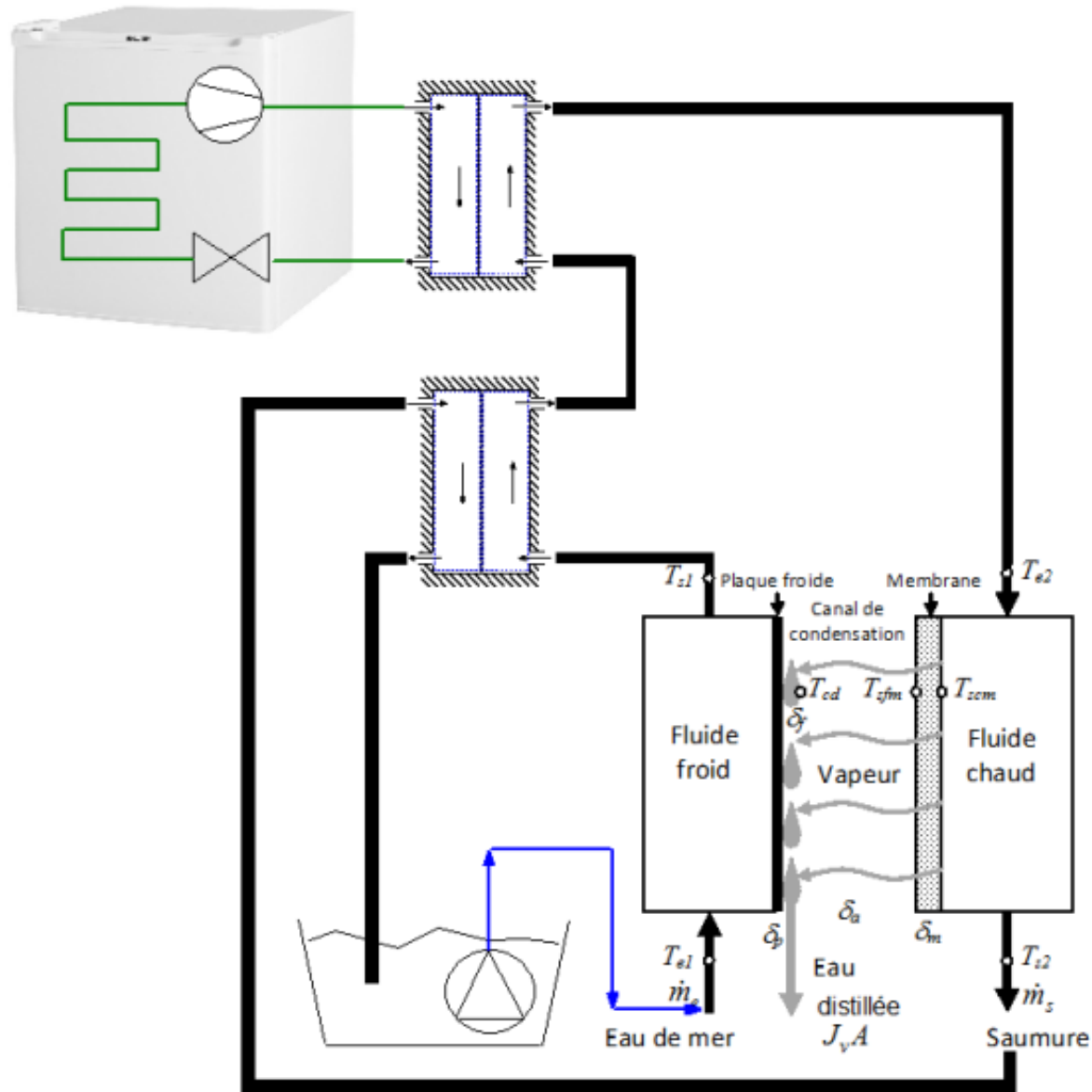
Résultats de simulation 1/2



Résultats de simulation 2/2

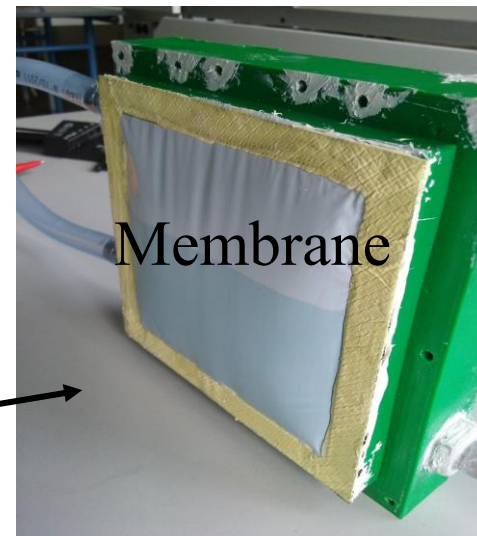
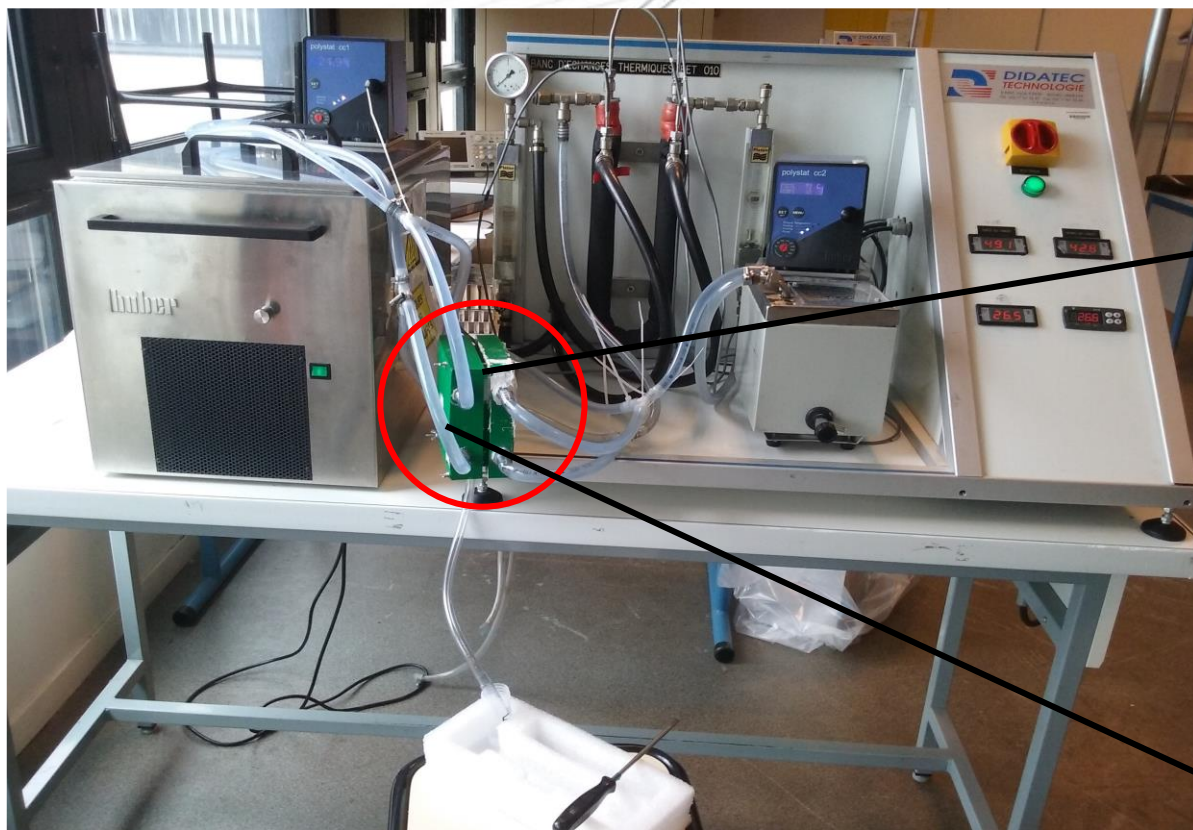


Prototype de machine couplée



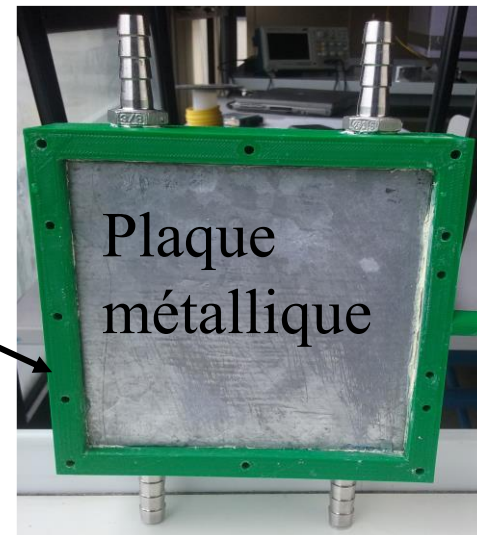
Prototype de distillation membranaire

Fabriqué avec une imprimante 3D



Membrane

Canal d'eau chaude



Plaque
métallique

Canal d'eau froide

Conclusions

- Le flux de perméat augmente avec la température et le débit d'alimentation du fluide chaud
 - **Limite ?**
- Le flux augmente lorsque l'épaisseur de l'air gap diminue
 - **Optimum ?**
- 99,9 % de taux de rejet de sel (essais complémentaires)
- Faibles températures de fonctionnement
 - Compatibilité avec les régimes de température d'une machine frigorifique

Perspectives

1. Modélisation des phénomènes
2. Dimensionnement et réalisation d'un prototype de TFP couplée à l'AGMD à petite échelle
 - Essais complémentaires : effet du colmatage dans des essais longue durée, effet de la température d'eau froide, stratégie de couplage...
3. Simulation d'installations pour la climatisation de bâtiments de bureaux et la production d'eau potable en régions côtières

Valorisons la chaleur perdue !

**62 condenseurs
2 fois la surface
2 façades
~3 kW**

62 x 2 x 2 x 3

= 744 kW thermiques

**Soit la chaleur rejetée par
~620 réfrigérateurs de 100 l**

**Modèle :
PR = 8.8 kg/MJ
1 MJ = 1000/3600 kWh
PR = 31,7 kg/kWh**

**Par appartement :
~3 kW_{th}
10,6 kg/h**

**Hyp : 2000 kWh_{elec}/an
6000 kWh_{th}/an
58 litres/jour
21 m³ d'eau douce !**

Références

- HLPE, 2015. L'eau, enjeu pour la sécurité alimentaire mondiale. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome 2015
- AFF, Communication aux Rendez-vous du Pôle Cristal 2014, Association Française du Froid
- Isaac M. et al. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change, *Energy Policy* 37 (2009) 507–521
- Vakiloroyaya V. et al. A review of different strategies for HVAC energy saving, *Energy Conversion and Management* 77 (2014) 738–754