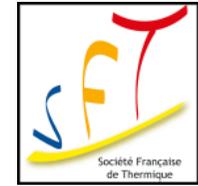


Société Française de Thermique

*Journée Thématique*

*Les hydrates, de leur caractérisation à leur application*



# Etude dynamique d'une boucle de réfrigération secondaire par coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub> Analyse des performances au niveau de l'échangeur de chaleur

Thomas Dufour (Iristea)



*22 janvier 2016 – Espace Hamelin, Paris*



## Plan de la présentation

- Projet ANR Crisalhyd (2015 – 2018)
- Etude thermique de coulis d'hydrates dans un échangeur
  - Modélisation de l'échangeur
  - Analyse énergétique & exergétique
- Conclusions et perspectives



## Projet ANR Crisalhyd (2015 – 2018)

Objectif: *Valider le concept de réfrigération secondaire par coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub> (transport et stockage de froid)*

Partenaires: - 2 industriels  
- 3 laboratoires (ENSTA, Irstea, LIMSI)

Verrous : maîtrise de la cristallisation / efficacité du système

Approche multi-échelle :

1. Micro: amélioration des propriétés physico-chimiques (additifs, intensification)
2. Macro: étude cinétique, rhéologique & thermique
3. Labo: modélisation prédictive de systèmes instationnaires
4. Industrielle: évaluation énergétique, environnementale, économique

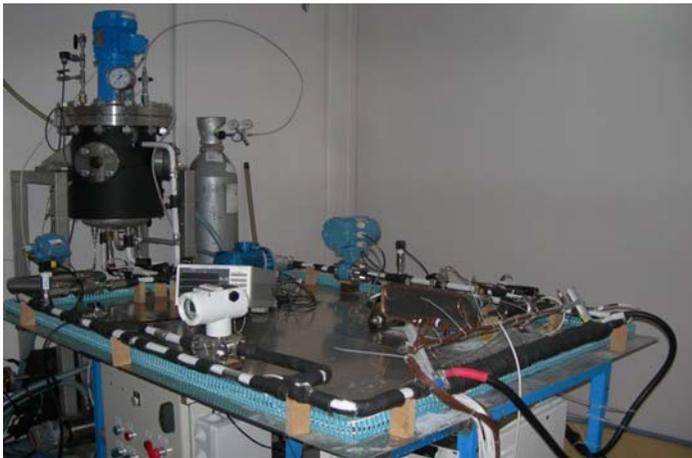
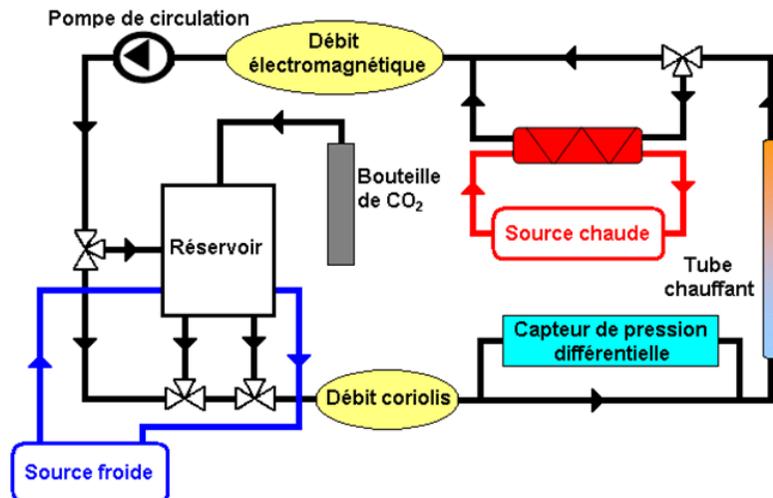


# Etude de coulis d'hydrates dans une boucle de réfrigération secondaire

Objectif : Evaluer les performances des coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub> sur les dynamiques de stockage et de restitution de l'énergie

1. Prédire le comportement du coulis dans un échangeur lors de la dissociation
2. Evaluer l'impact de la fraction sur l'efficacité d'un échangeur.
3. Evaluer le rôle de la chaleur latente du coulis.

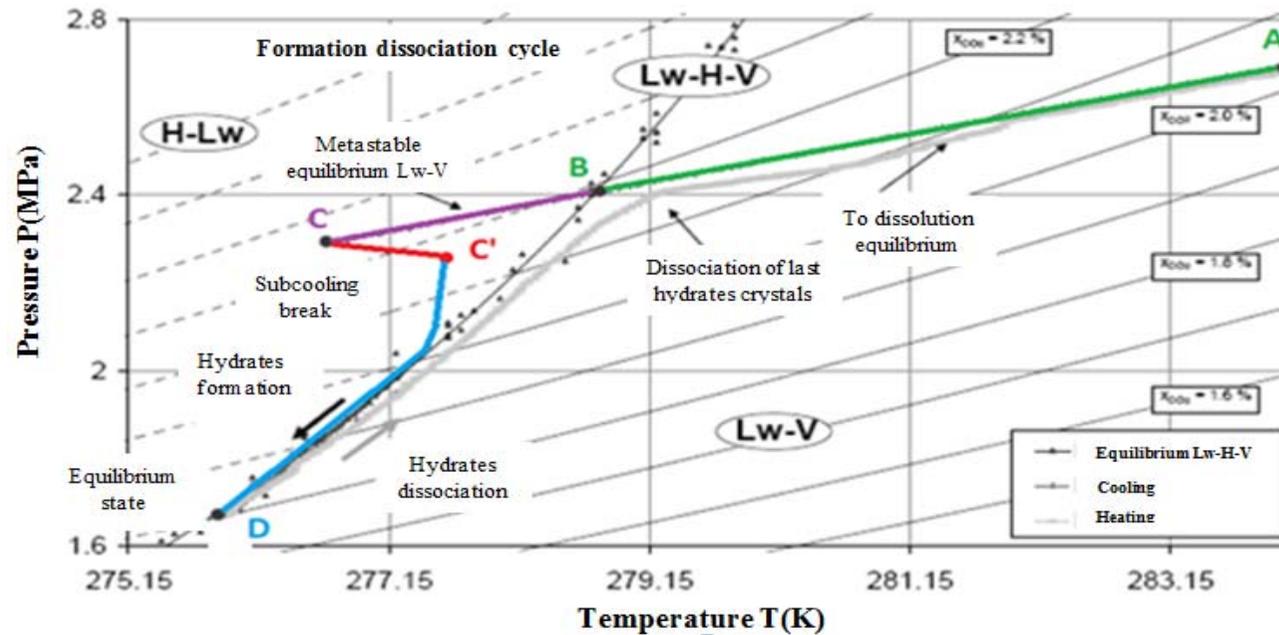
# Montage expérimental



## Instrumentation de la boucle:

- Sondes de température et pression
- Capteur de pression différentiel:
  - Évaluer les pertes de charges en fonction du débit, fraction
- Tube chauffant:
  - Évaluer les coefficients de convection en fonction du débit, fraction

# Protocole expérimental



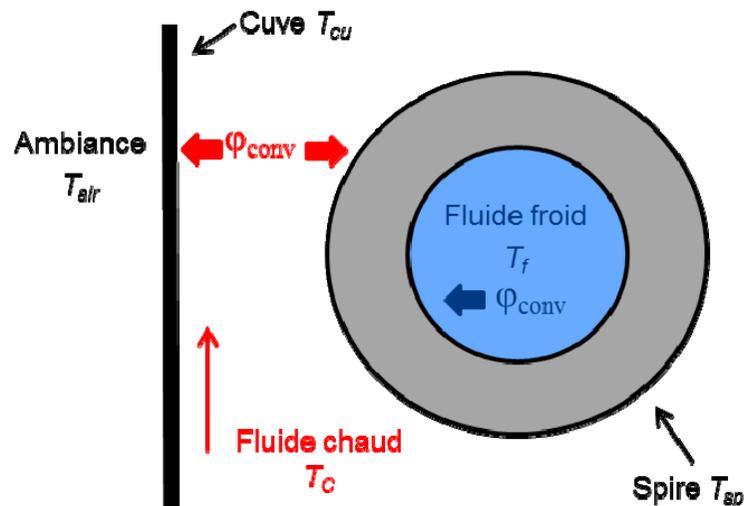
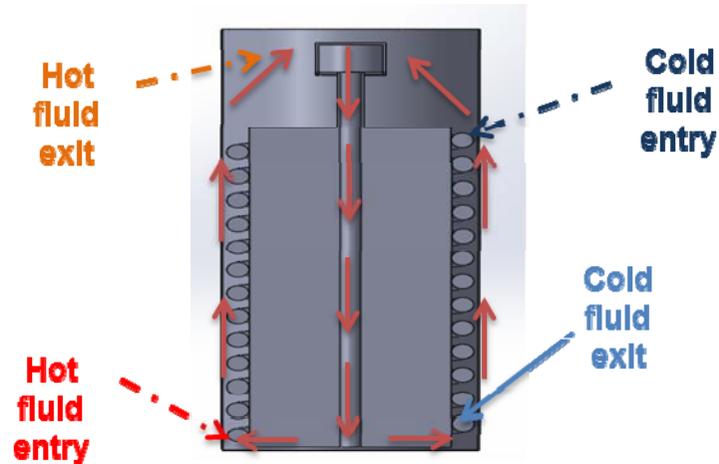
1 – Formation dans le réacteur

- Injection de  $CO_2$  et stabilisation (A)
- Refroidissement du réservoir (A - B - C)
- Formation après la rupture de surfusion (C - C')
- Conditions finales (C' - D)

2 – Dissociation dans l'échangeur (D - A)

- Apport de chaleur par la source chaude (20-40°C)

# Evaluation des transferts thermiques



## Bilan thermique sur les fluides

$$\dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,s} - T_{c,e}) + m_c C_{p,c} \frac{dT_c}{dt} = h_c S_{wc} \Delta TLM_c$$

$$\dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,s} - T_{h,e}) + m_h C_{p,h} \frac{dT_h}{dt} = h_h S_{wh} \Delta TLM_h$$

## Bilan thermique sur les parois

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = -h_h S_{wh} \Delta TLM_h - h_c S_{wc} \Delta TLM_c$$

# Evaluation des transferts thermiques

Evaluation de la fraction d'hydrates

$$\phi = f(P, T) \quad \text{Bilan CO}_2 \text{ Marinhas et. al 2007}$$

Evaluation de la viscosité

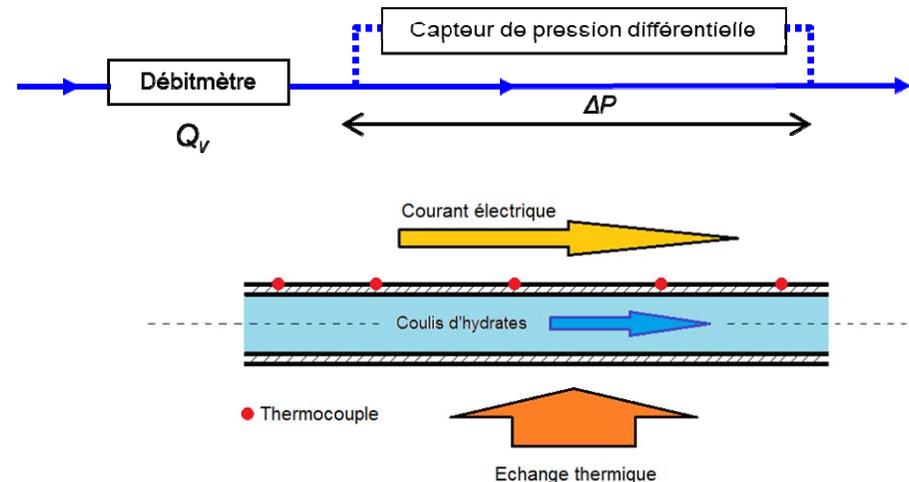
$$\mu_p = 1,8 \cdot 10^{-3} e^{18,0\phi} \gamma^{-1,82\phi}$$

Evaluation des transferts convectifs

$$Nu = 21,3 Re^{0,26} Pr^{-0,71} (1 + \phi)^{11,48}$$

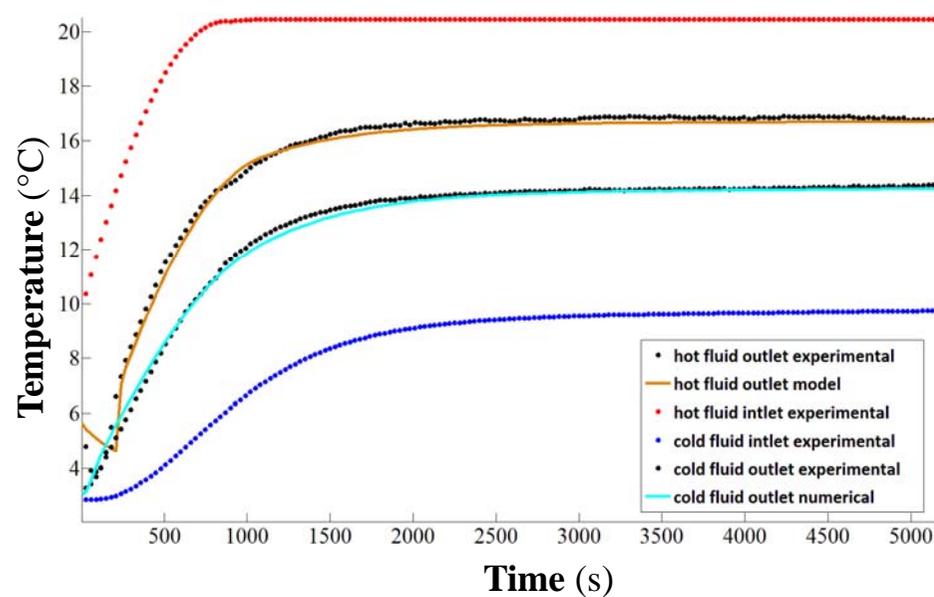
Méthode du Cp apparent

$$C_{p-ap}(T) = \frac{\Delta H d w t_s + C p_L (1 - w t_s) d T + C p_s w t_s d T}{d T}$$

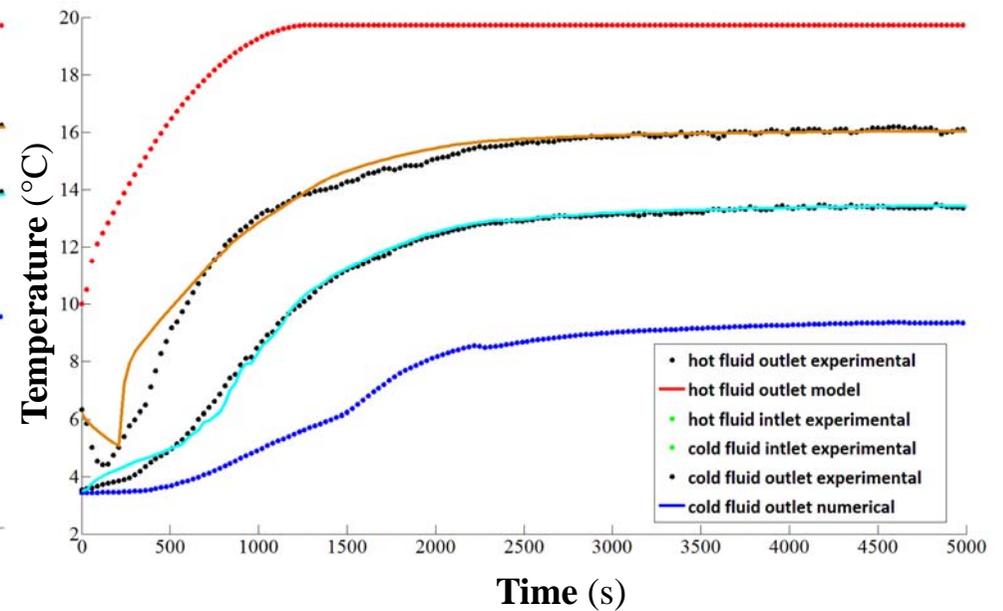


# Validation expérimentale du modèle thermique

## Validation sur de l'eau



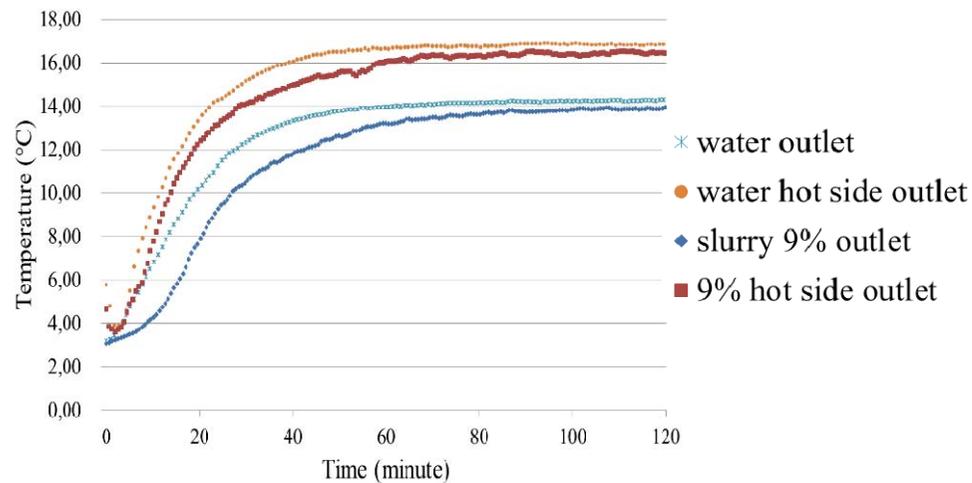
## Validation sur coulis à 13%



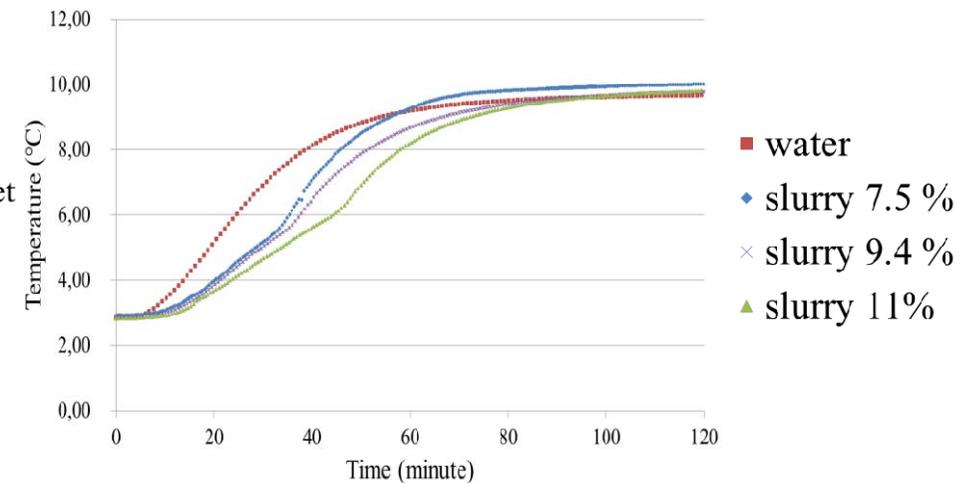
- Bon suivi en température en régime stationnaire et instationnaire
- Protocole à améliorer au moment du lancement du groupe chaud

# Analyse énergétique

## Température sortie échangeur



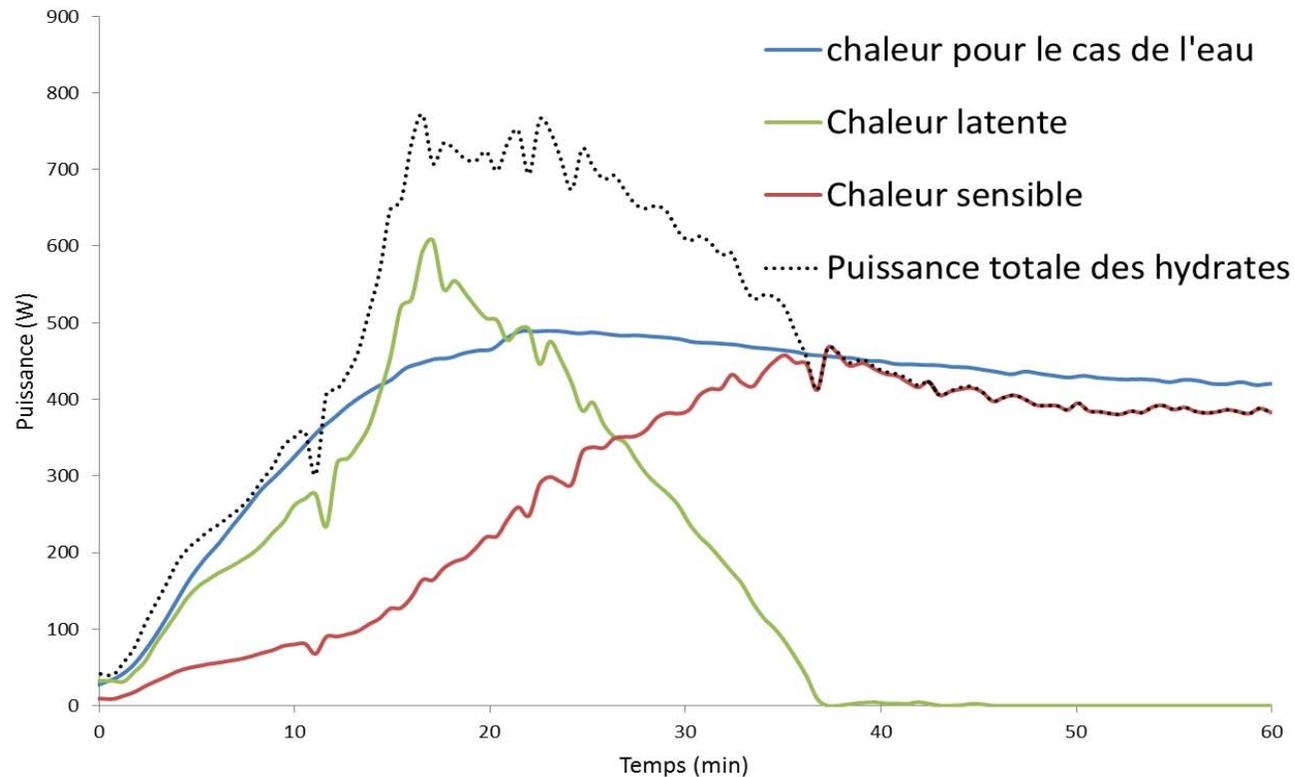
## Température réacteur



- Temps de déstockage plus long avec hydrates
- Température de sortie échangeur plus basse avec hydrates
- Quid de la puissance échangée?

# Analyse énergétique

## Bilan puissance échangée



Puissance sensible

$$\dot{Q}_s = (\dot{m}_h C_{p_h} \Delta T + \dot{m}_l C_{p_l} \Delta T)$$

Puissance latente

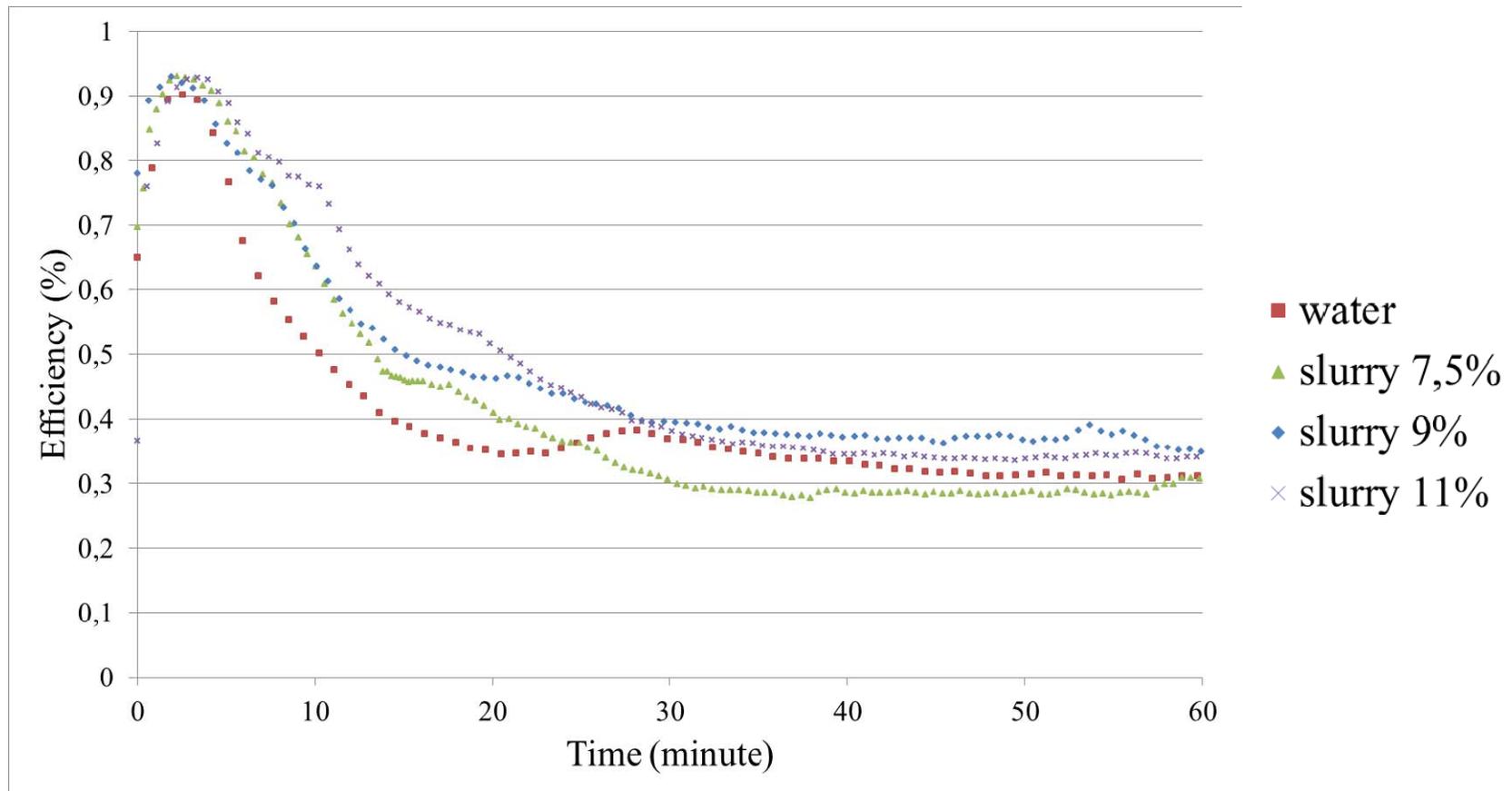
$$\dot{Q}_h = d \dot{m}_h \Delta H$$



- Puissance échangée plus importante avec les hydrates
- Déstockage plus long avec les hydrates

# Analyse énergétique

Impact des coulis d'hydrates sur l'efficacité d'un échangeur

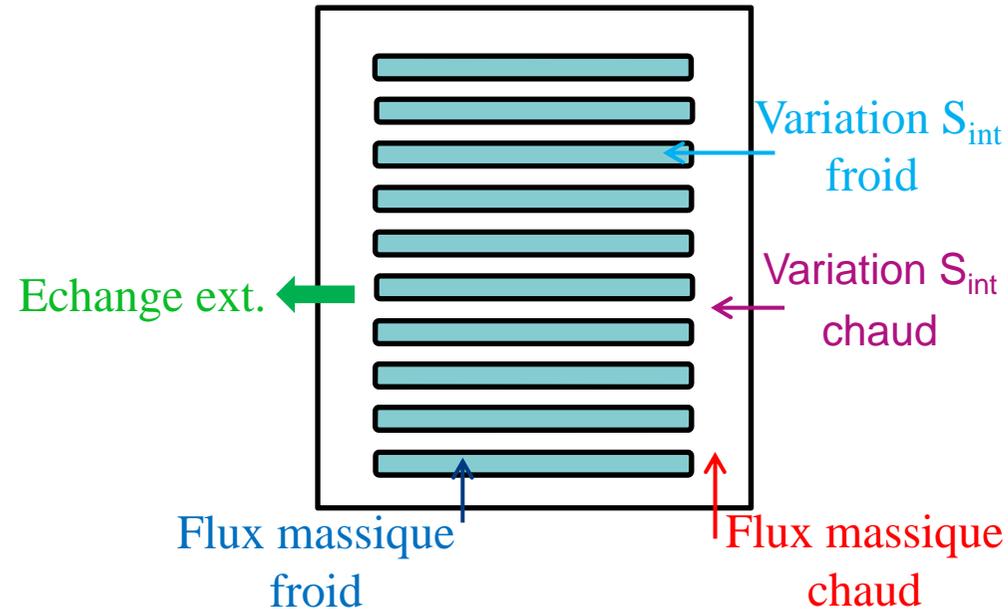


Efficacité de l'échangeur

$$\varepsilon = \frac{\dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})}{(\dot{m} C_p)_{\min} (T_{h_{in}} - T_{c_{in}})}$$

# Analyse exergetique

Schéma simplifié de l'échangeur



$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS}{dt} - \left( \dot{m}_{f,e} s_f(T_{f,e}) + \dot{m}_{c,e} s_c(T_{c,e}) \right) + \left( \dot{m}_{f,s} s_f(T_{f,s}) + \dot{m}_{c,s} s_c(T_{c,s}) \right) - \frac{\dot{Q}_a}{T_a}$$

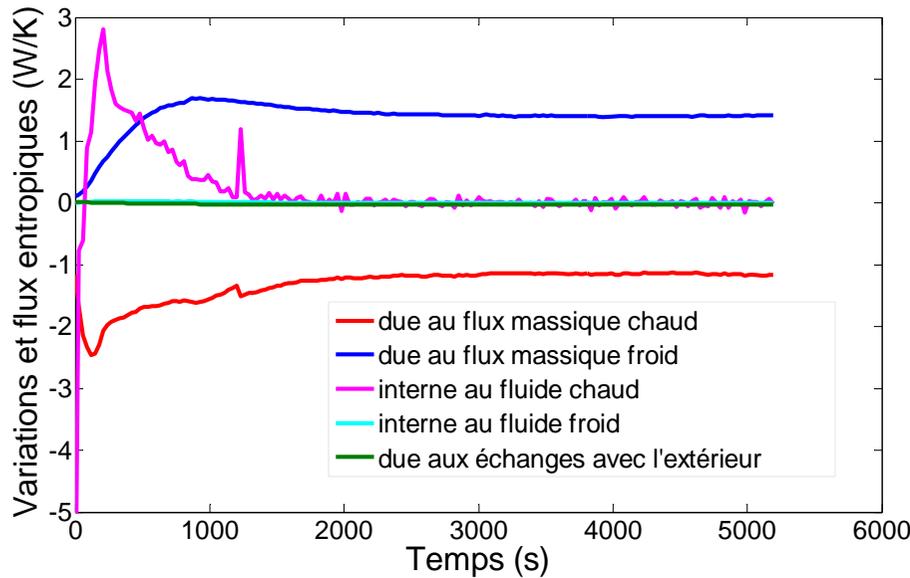
Contribution entropique	Définition
Variation d'entropie interne	$\frac{dS}{dt}$
Flux massique	Froid : $\dot{m}_{f,s} s_f(T_{f,s}) - \dot{m}_{f,e} s_f(T_{f,e})$ Chaud : $\dot{m}_{c,s} s_c(T_{c,s}) - \dot{m}_{c,e} s_c(T_{c,e})$
Echanges avec l'extérieur	$-\frac{\dot{Q}_a}{T_a}$

Pertes exergetiques

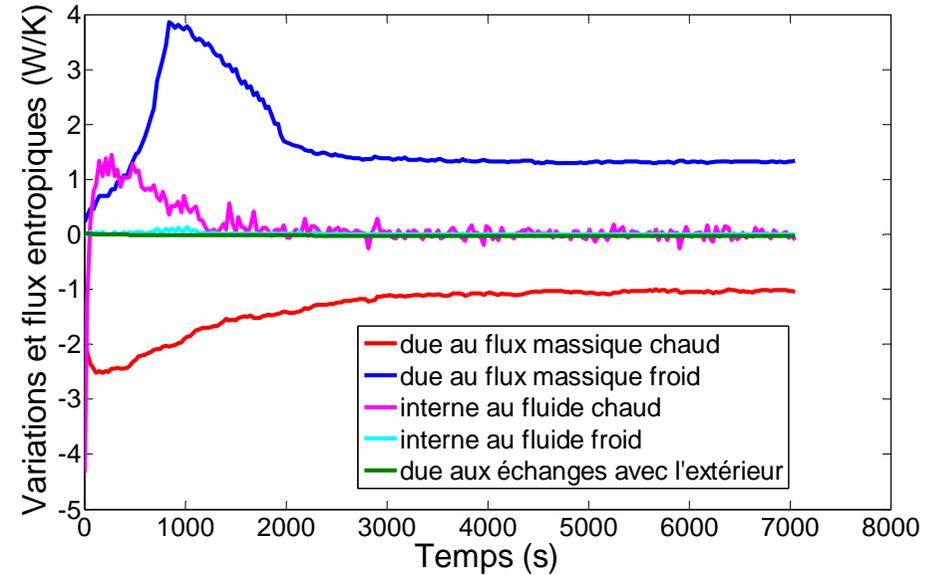
$$\dot{P}_{ex} = T_0 \dot{S}_{gen}$$

# Analyse exergétique

Fluide froid : eau  
 $T_{GC} = 20^{\circ}\text{C}$



Fluide froid : coulis 12 %  
 $T_{GC} = 20^{\circ}\text{C}$

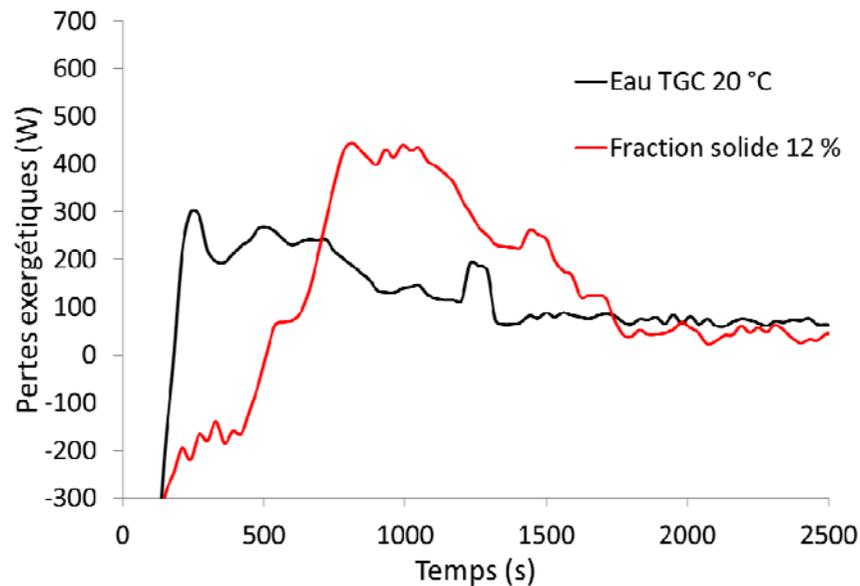


Contribution entropique	Définition
Variation d'entropie interne	Froid / Chaud : $\frac{dS}{dt}$
Flux massique	Froid : $\dot{m}_{f,s} s_f(T_{fs}) - \dot{m}_{f,e} s_f(T_{f,e})$ Chaud : $\dot{m}_{c,s} s_c(T_{cs}) - \dot{m}_{c,e} s_c(T_{c,e})$
Echanges avec l'extérieur	$\frac{\dot{Q}_a}{T_a}$

- Gradient thermique plus important (entrée/sortie échangeur) avec le coulis

- Plus forte génération de flux entropique pour le coulis

# Analyse exergétique



Comparaison pertes exergétiques eau, coulis 12 %

- Décalage dans le temps du maximum de pertes exergétiques
- Pertes exergétiques légèrement supérieures à l'eau dans le cas du coulis
- Meilleure efficacité exergétique tant que le système contient des hydrates

**Puissance utile moyenne :**

**Eau : 278 W      Coulis : 321 W**



# Conclusion & perspective

## Conclusions :

- Modèle développé validé pour eau et hydrates
- Contribution des hydrates
  - Augmentation de la puissance échangée
  - Augmentation de l'efficacité de l'échangeur
- Meilleure efficacité exergétique tant qu'il reste des hydrates

## Perspectives :

- Développement du modèle global avec réacteur et échangeur
- Analyse exergétique du système
- Cinétique de formation et de dissociation: fonctionnement en continu
- Application du modèle sur différents scénarios

