

Société Française de Thermique  
*Journée Thématique*

*Les hydrates, de leur caractérisation à leur application*



# Etude thermique et énergétique des coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub>

Jérémy Oignet (Irstea)



*30 janvier 2015 – Espace Hamelin, Paris*

# Plan de la présentation

- Etude thermique
  - Objectif de l'étude
  - Montage expérimental
  - Calcul des coefficients d'échange
  - Validation expérimentale sur de l'eau
  - Résultats sur les hydrates
  
- Etude énergétique
  - Objectif de l'étude
  - Description du modèle
  - Calculs de rendements
  - Bilan énergétique
  
- Conclusions et perspectives

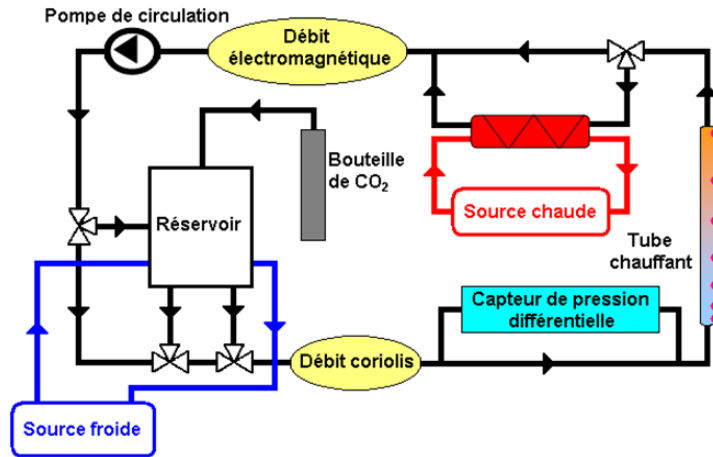


# Etude thermique

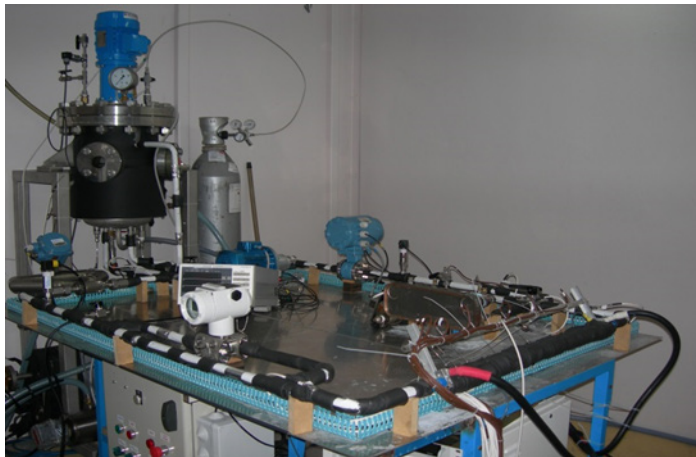
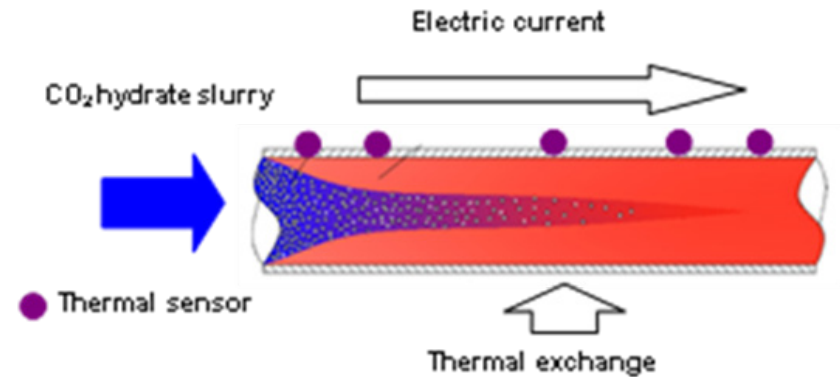
**Objectif :** Evaluer les coefficients d'échange convectifs des coulis d'hydrates de  $\text{CO}_2$

# Présentation du montage expérimental

## Boucle + réacteur



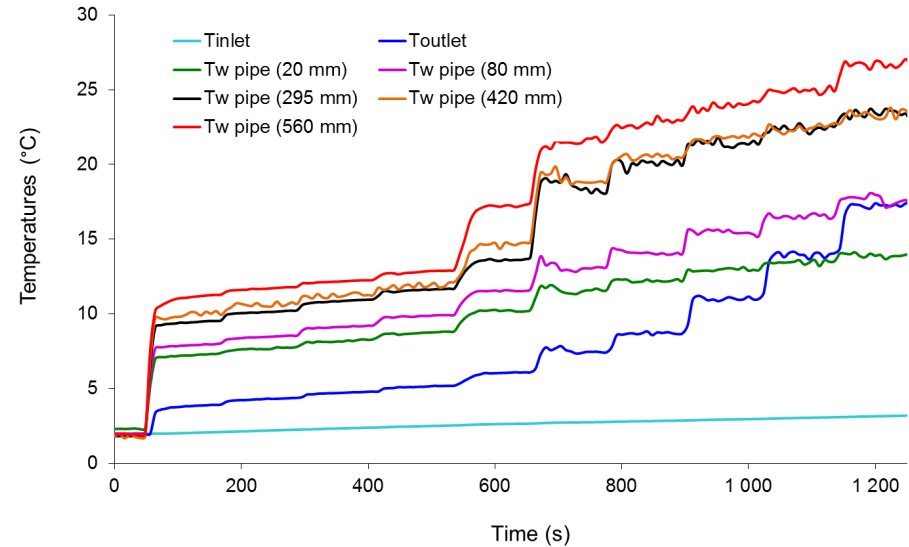
## Tube chauffant



- Circulation d'un courant électrique à la surface du tube
- Induction d'un flux de chaleur
- Transfert thermique entre la paroi et le coulis

# Calcul des coefficients d'échange

- Mesure des températures de surface pour différents débits
- Mesure de la température du fluide (entrée/sortie)
- Evaluation du coefficient d'échange local  $h_{loc}$
- Calcul de  $\Delta T_p$  entre la paroi et le tube



$$h_{loc} = \frac{\dot{Q}_{a\lim}}{2 \pi r L (T_p - T_f - \Delta T_p)}$$

$$\Delta T_p = \left[ \frac{\dot{Q}_{a\lim}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{inox} \cdot L} \right] \left[ \frac{\xi(1 - \ln \xi) - 1}{1 - \xi} \right]$$

$$\xi = (D_{ext} / D_{int})^2$$

# Validation sur de l'eau

- Augmentation du  $h_{loc}$  avec le Re

- Corrélations laminaires :

Hausen : 
$$Nu_0 = 4.36 + \frac{0.023 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)}{1 + 0.012 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{0.8}}$$

Shah : 
$$Nu_0 = 1.953 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

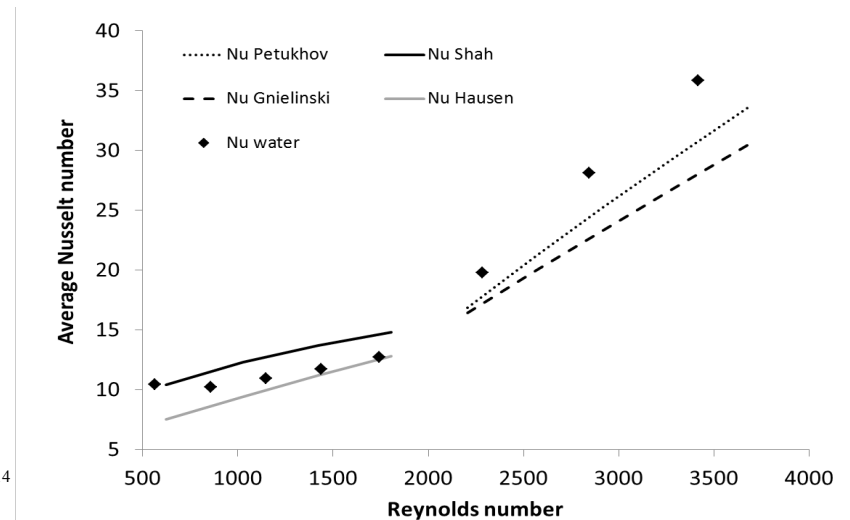
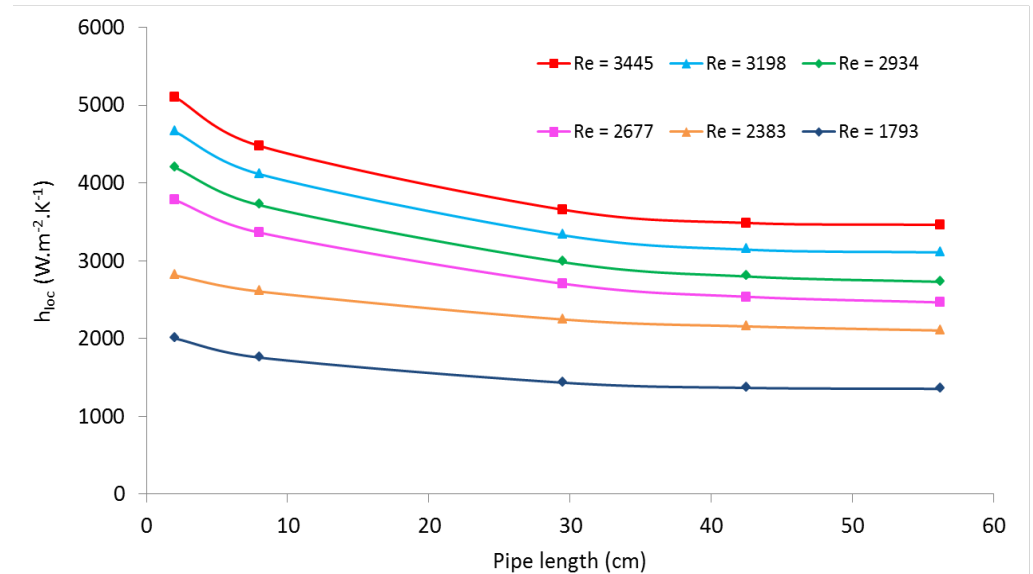
- Corrélations turbulentes :

Petukhov : 
$$Nu_0 = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{\xi}{8} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}} \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

$$\xi = \frac{1}{(1.82 \log Re - 1.64^2)}$$

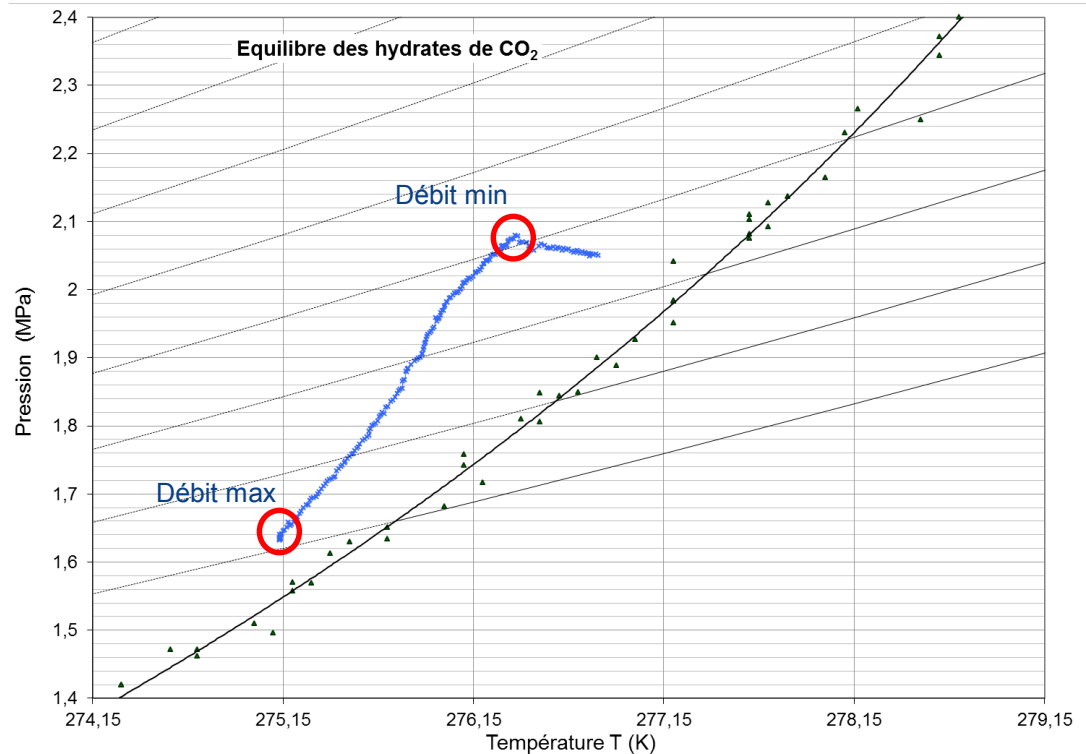
Gnielinski : 
$$Nu_0 = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

- Effet de la température : 
$$Nu = Nu_0 \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$



# Evaluation de la fraction solide à l'entrée du tube

- Système hors équilibre
- Evolution de la pression et température d'entrée
  - Début / Fin manip:
    - $\Delta T_{\text{entrée}} = 1,2^{\circ}\text{C}$
    - $\Delta P = 0,45 \text{ MPa}$
- Calcul de la fraction d'entrée :
- Bilan de matière sur le  $\text{CO}_2$  ( $T_i$ ,  $P_i$ ,  $T_f$ ,  $P_f$ )



- Evolution de la fraction solide à l'entrée du tube

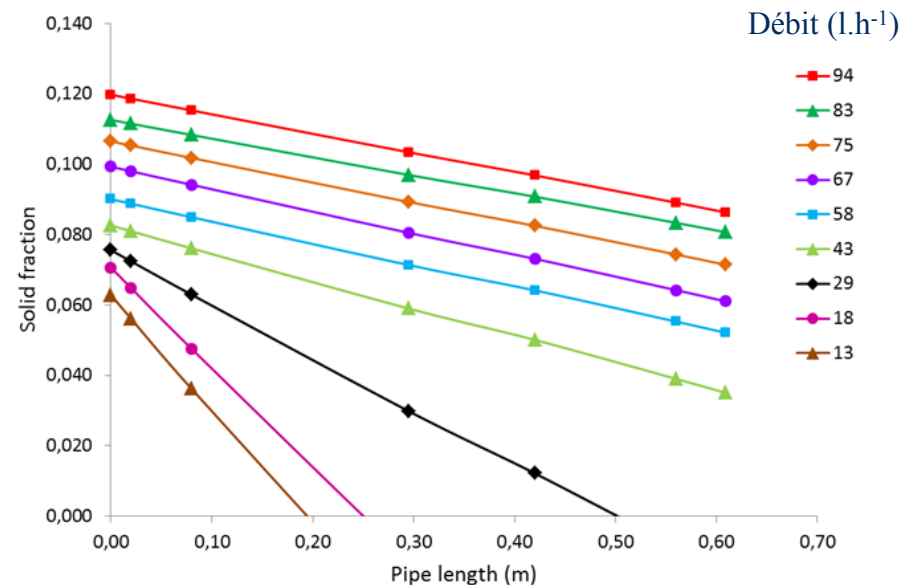
# Calcul et évolution de la fraction au sein du tube

## Bilan enthalpique sur le tube

$$Q_{chaud} = m\Delta\phi\Delta H + \int_e^s mcp_l d[(1-\phi)T] + \int_e^s mcp_s d(\phi T)$$

- Evolution du débit
- Débit<sub>max</sub> = 94 l.h<sup>-1</sup>
- Débit<sub>min</sub> = 13 l.h<sup>-1</sup>
- Evolution de la fraction d'entrée  
6% < Φ<sub>s</sub> < 12%

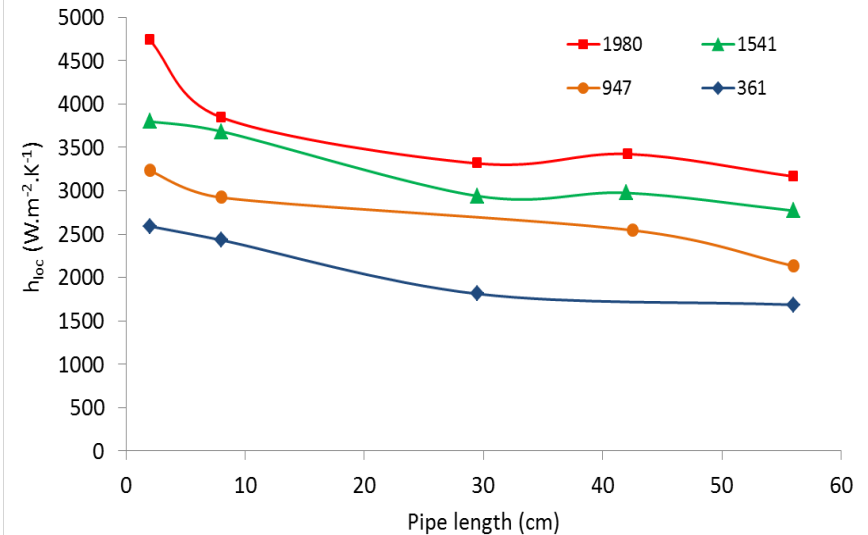
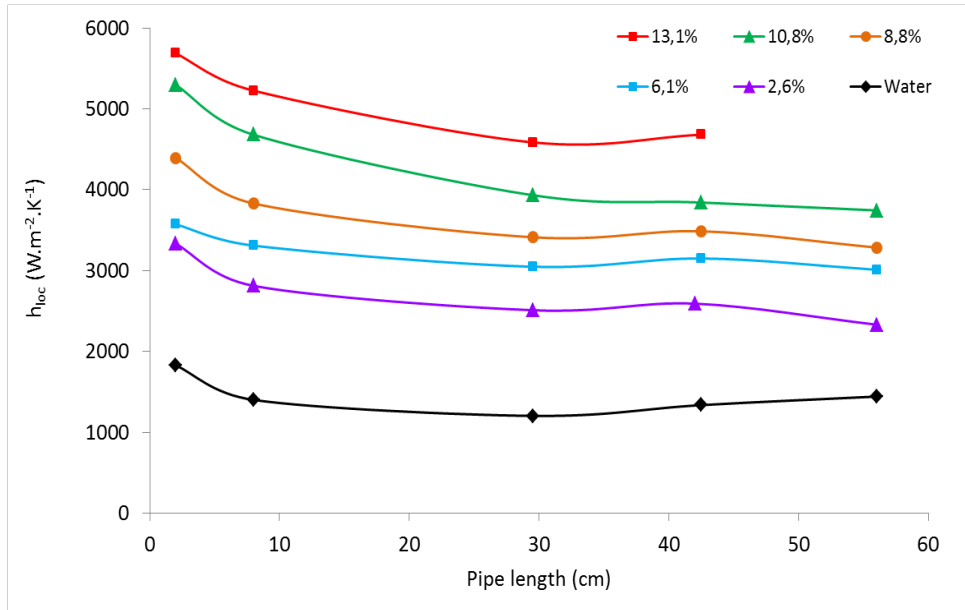
Fraction initiale : Φ<sub>s</sub> = 12%



- Variation de la fraction en entrée du tube chauffant en fonction du débit
- Diminution de la fraction au sein du tube



# Représentation des coefficients d'échange



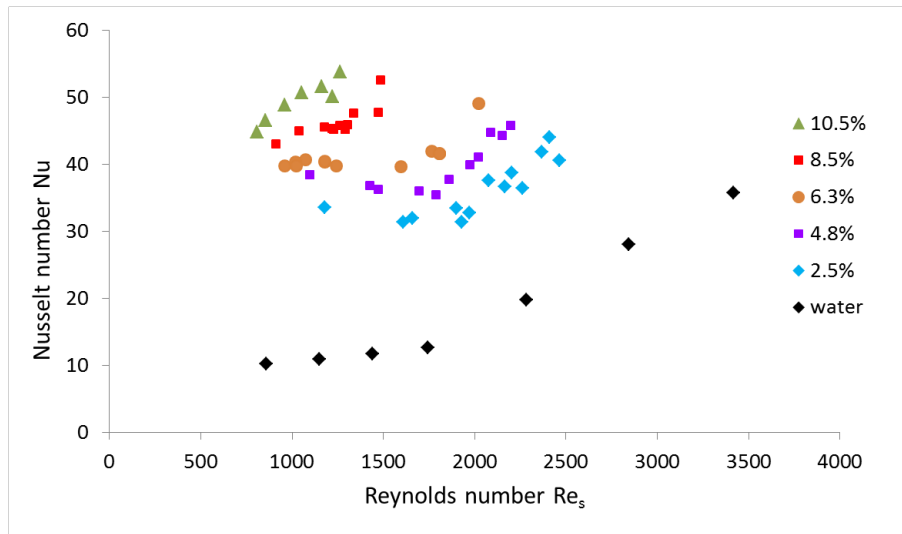
- Nombre de Reynolds moyen constant:  
 $Re = 1150$
- Augmentation du  $h_{loc}$  avec la fraction:  
facteur 2 entre l'eau et un coulis à 2,6%
- Stabilisation du hloc sur la deuxième moitié du tube

- Fraction solide moyenne constante:  
 $\Phi_s = 5,7\%$
- Augmentation du hloc avec le Re:  
Facteur 2 entre un Re à 360 et un Re à 2000

# Représentation des coefficients d'échange

- Reynolds coulis

$$Re_s = \frac{\rho_s u D}{\mu_s}$$



- Viscosité calculée par un modèle rhéologique :

$$\mu_s = 0.0018 \exp^{(17.976\phi)} \gamma^{(-1.82\phi)}$$

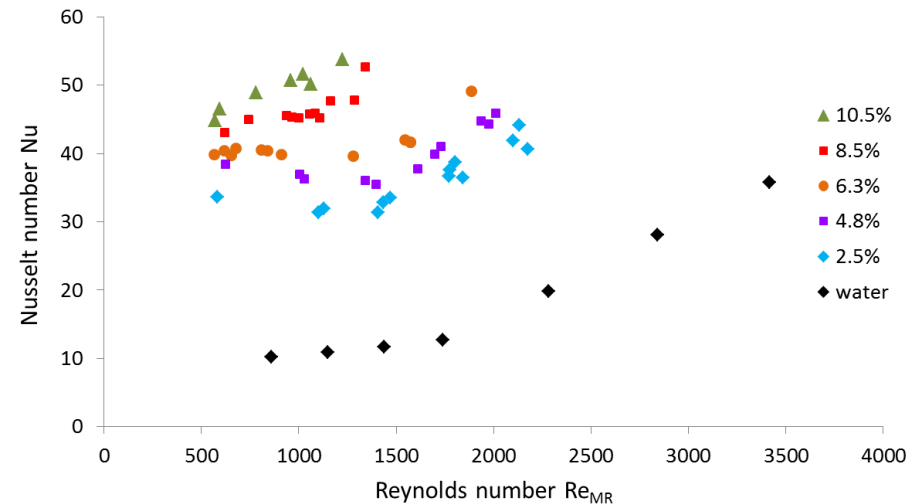
(Jerbi et al, 2013)

- Masse volumique du coulis :

$$\rho_s = \rho_H \phi + (1 - \phi) \rho_W$$

- Reynolds Metzner-Reed

$$Re_{MR} = \frac{D^n u^{2-n} \rho_s}{k \left( \frac{1+3n}{4n} \right)^n 8^{n-1}}$$



- Indice de consistance k :

$$k = 0.0018 \exp^{(17.976\phi)}$$

- Indice de comportement n :

$$n = -1.82\phi + 1$$

# Représentation du coefficient de frottement

- Calcul du facteur de friction :

$$f = \frac{D\Delta P}{2\rho_s Lu^2}$$

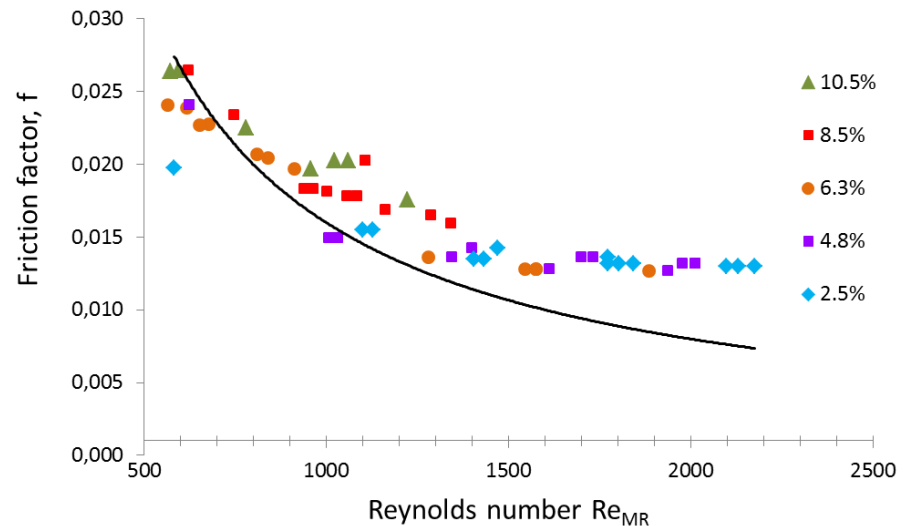
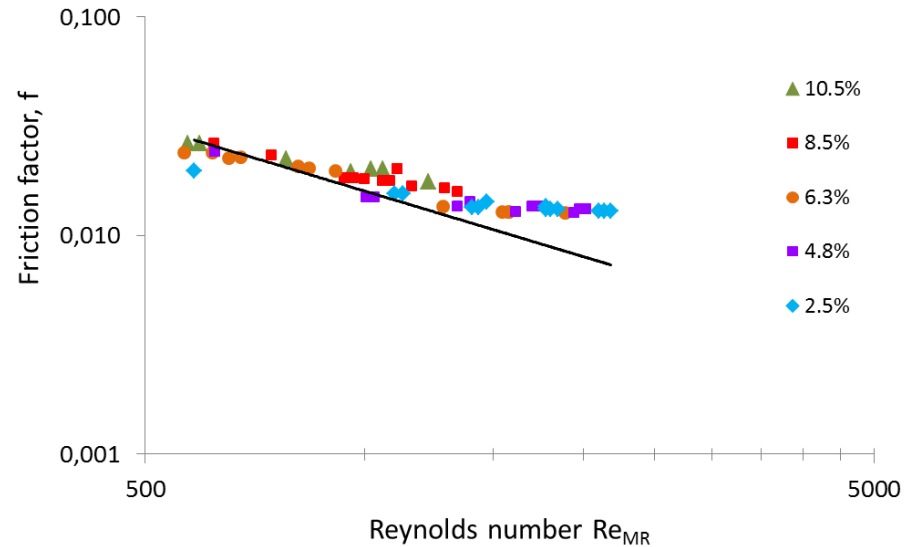
- Modèle d'Hagen-Poiseuille :

$$f = \frac{16}{\text{Re}_{MR}}$$

- Transition laminaire / turbulent

- Régime laminaire :  
 $500 < \text{Re} < 1700$

- Régime turbulent :  
 $1700 < \text{Re} < 2500$





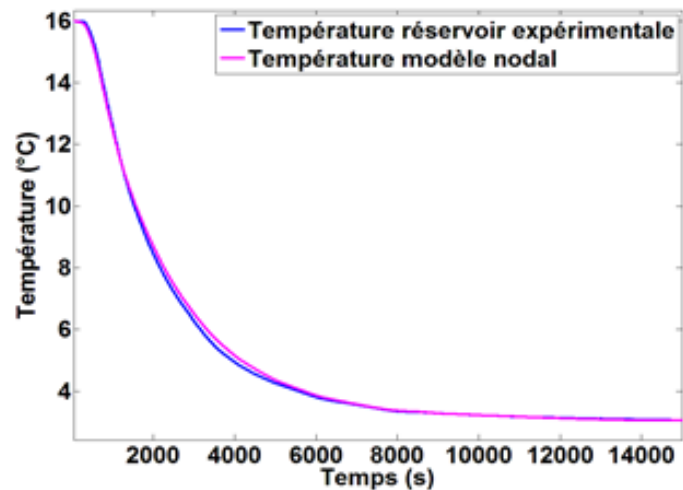
# Etude Energétique

**Objectif :** Evaluer les quantités d'énergies stockées par le système

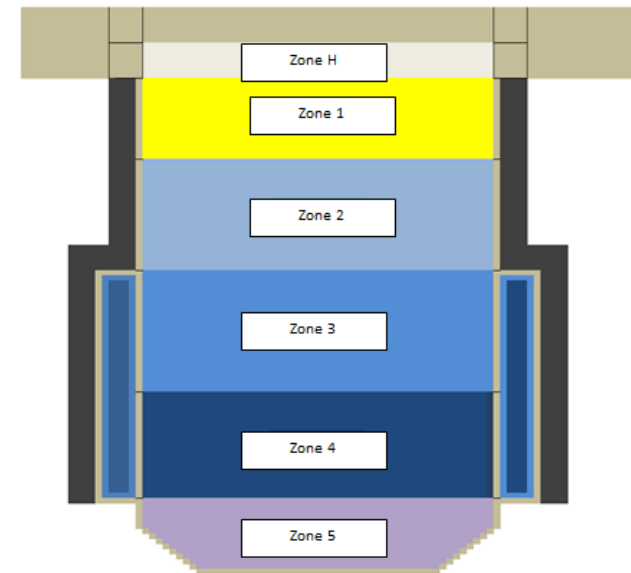
# Ecriture du modèle

- Méthodes des volumes finis
- Schéma de discrétisation temporelle implicite
- Bilan des flux de chaleur appliqué à chaque maille du système

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \sum \phi_{cond} + \sum \phi_{conv}$$



- Maillage du réacteur
- Découpage en différentes zones



- Validation du modèle sur de l'eau

# Evaluation des rendements

- Energie totale stockée :

$$Q_{stockée} = \int \left( \frac{m_l C_{p_l} \Delta T}{dt} + \frac{m_h C_{p_h} \Delta T}{dt} + \frac{dm_h \Delta H}{dt} \right) dt$$

- Stockage par hydrates :

$$Q_{hyd} = \int \left( \frac{m_h C_{p_h} \Delta T}{dt} + \frac{dm_h \Delta H}{dt} \right) dt$$

- Stockage par l'eau :

$$Q_{liq} = \int \left( \frac{m_l C_{p_l} \Delta T}{dt} \right) dt$$

- Rendement global :

$$\eta_{global} = \frac{Q_{stockée}}{Q_{GF}} = \frac{Q_{GF} - Q_{pertes}}{Q_{GF}}$$

- Rendement de formation :

$$\eta_{formation} = \frac{Q_{hyd}}{Q_{GF}}$$

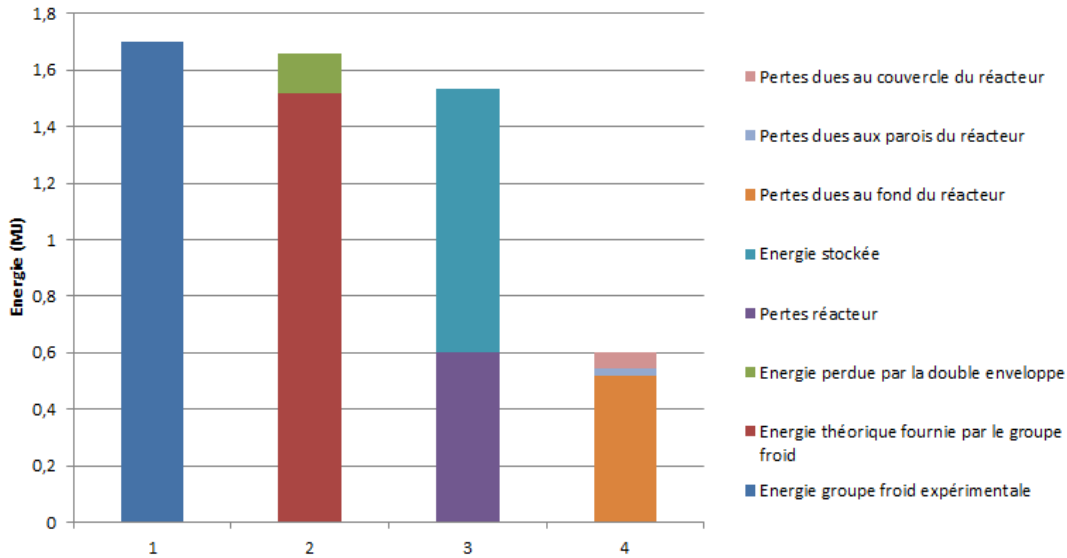
- Rendement stockage hydrate :

$$\eta_{stockage\ hyd} = \frac{Q_{hyd}}{Q_{stockée}} = \frac{Q_{hyd}}{Q_{hyd} + Q_{liq}}$$

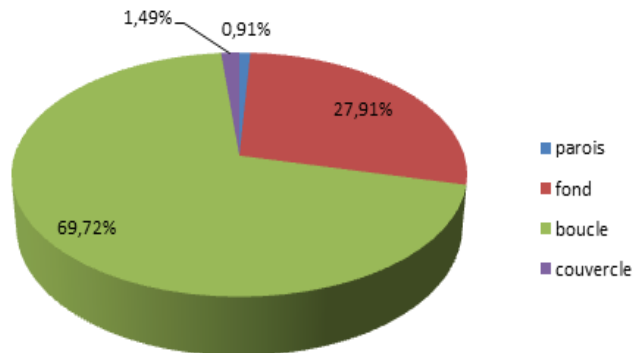
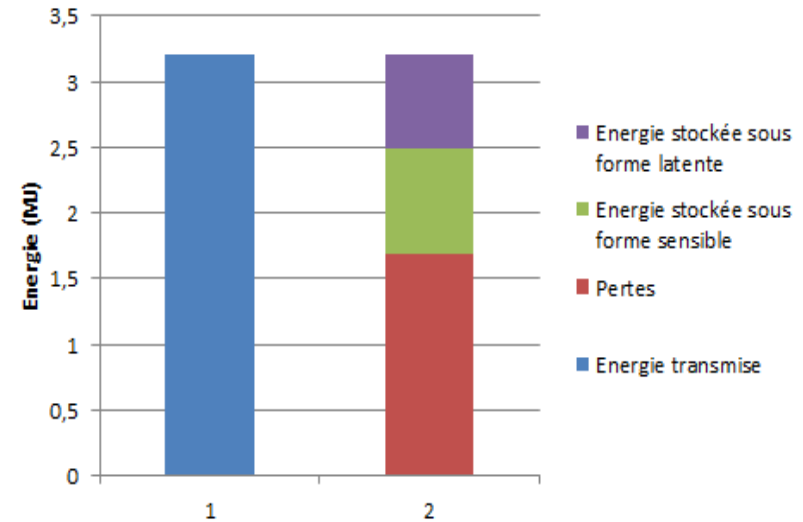
$\Phi_s$	$\eta_{global}$	$\eta_{form}$	$\eta_{stockage}$
0 %	38 %	0 %	0 %
11.1%	47 %	22 %	47 %
15.8%	51 %	29 %	57 %
20.1%	61 %	45 %	73 %

# Bilan énergétique du système

- Bilan sur le réacteur



- Coulis d'hydrates à 11%
- Bilan sur le système boucle + réacteur



- Bilan des pertes sur le système

# Conclusion et perspectives

- Etude thermique :
  - Obtention d'une base de données sur les coefficients d'échange des coulis d'hydrates de CO<sub>2</sub>.
- Etude énergétique :
  - Réalisation d'un modèle permettant de simuler le comportement énergétique du système.
- Perspectives :
  - Réaliser une modélisation exergétique du système.