

Société Française de Thermique
Journée Thématique

Les hydrates, de leur caractérisation à leur application



Etude thermique et énergétique des coulis d'hydrates de CO₂

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

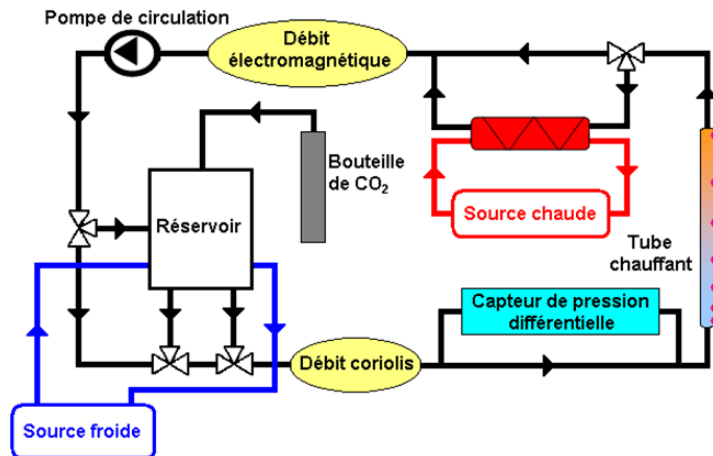


Etude thermique

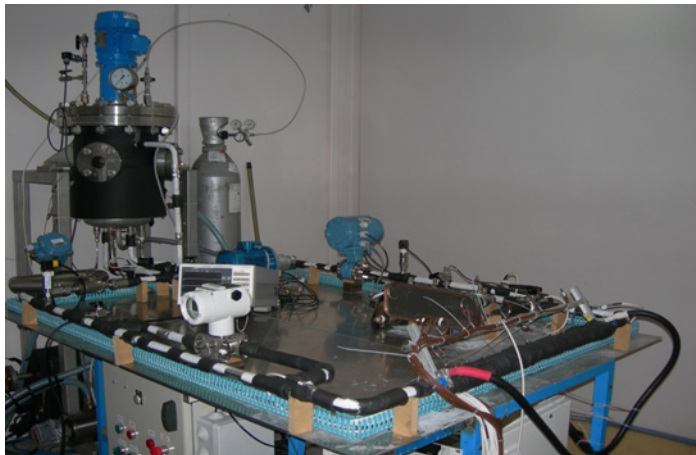
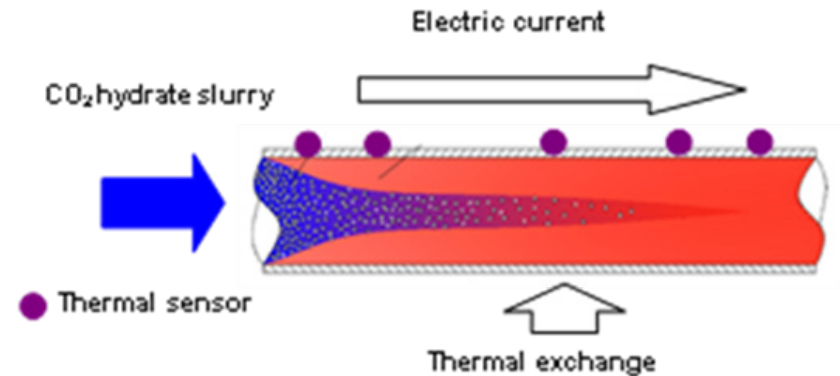
Objectif : Evaluer les coefficients d'échange convectifs des coulis d'hydrates de CO_2

Présentation du montage expérimental

Boucle + réacteur



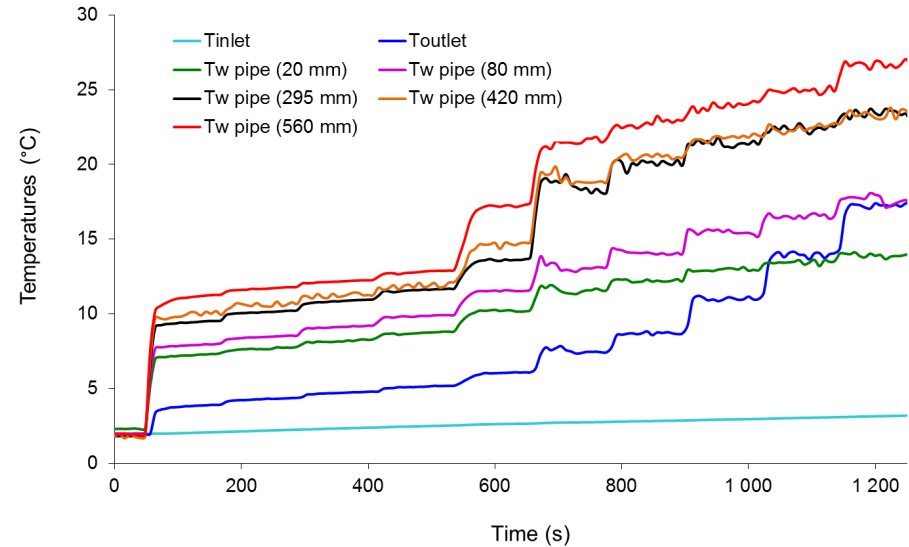
Tube chauffant



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

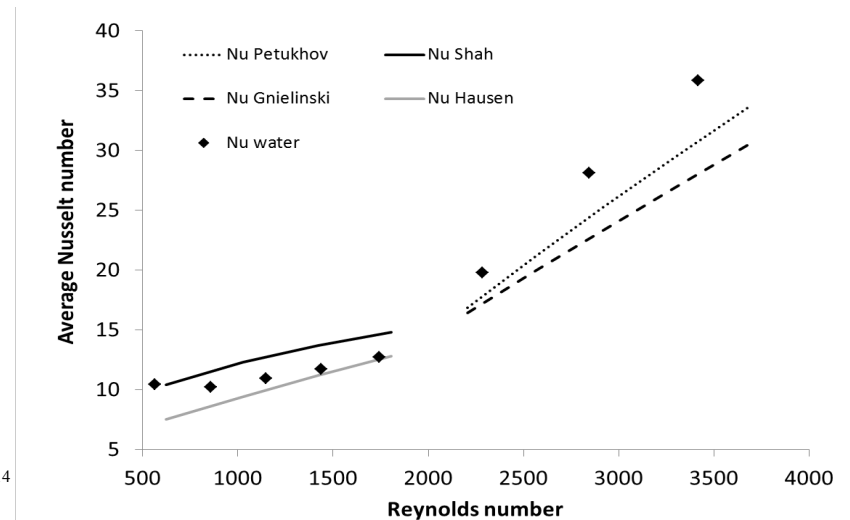
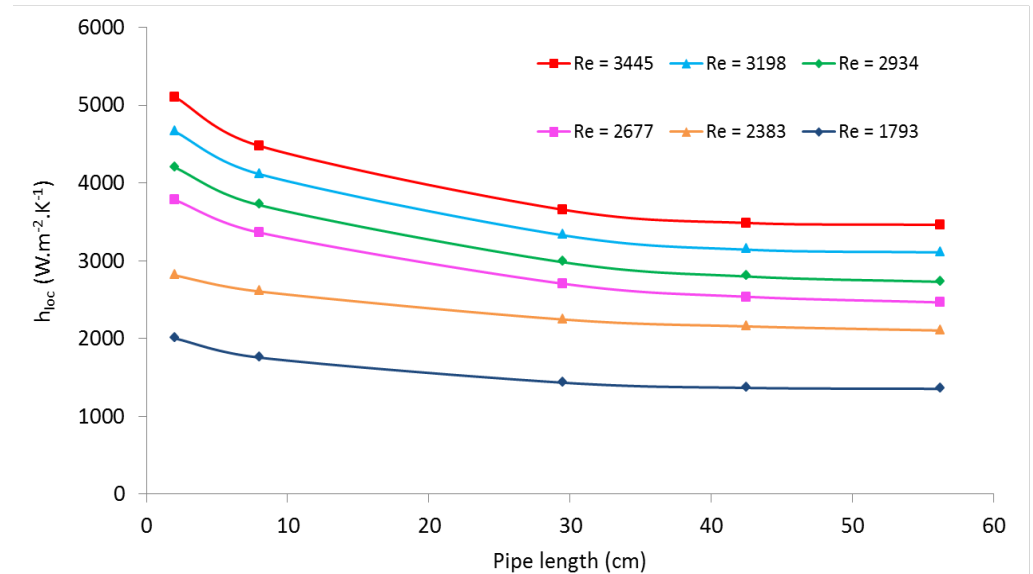
- Corrélations turbulentes :

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

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

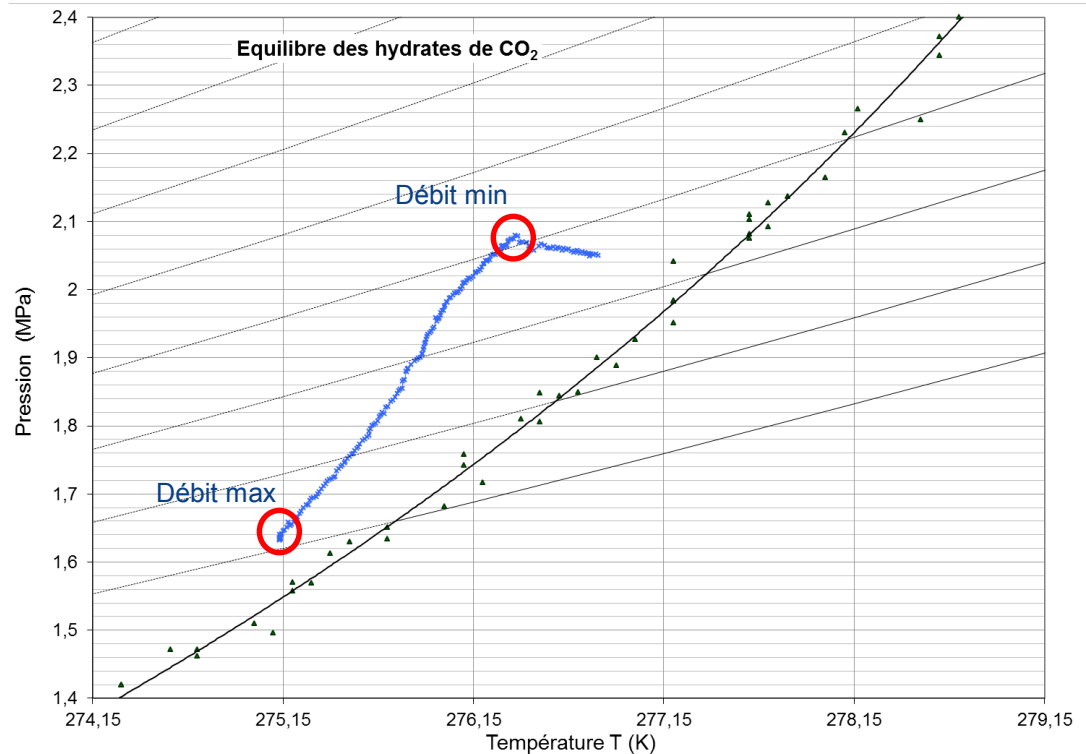
Gnielinski :
$$Nu_0 = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

- 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 CO_2 (T_i , P_i , T_f , P_f)



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

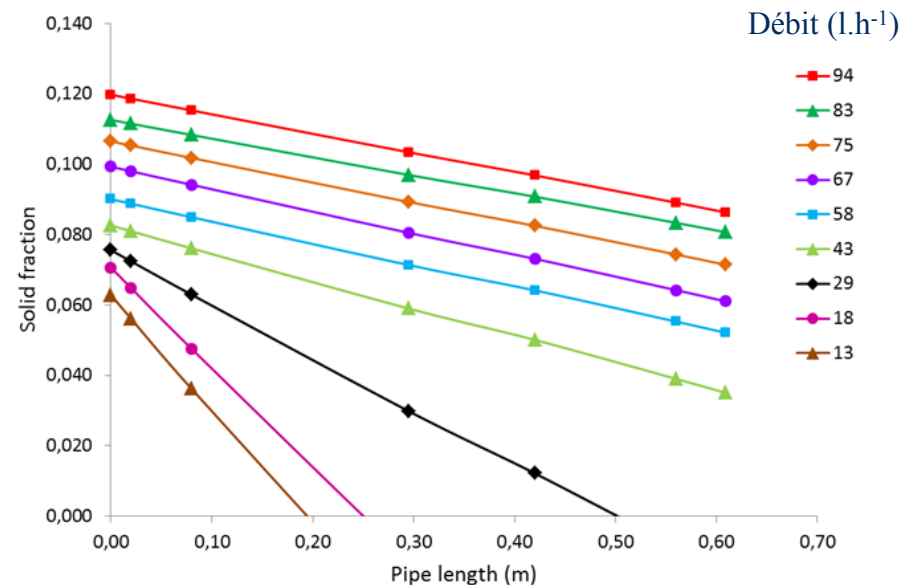
Calcul et évolution de la fraction au sein du tube

Bilan enthalpique sur le tube

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

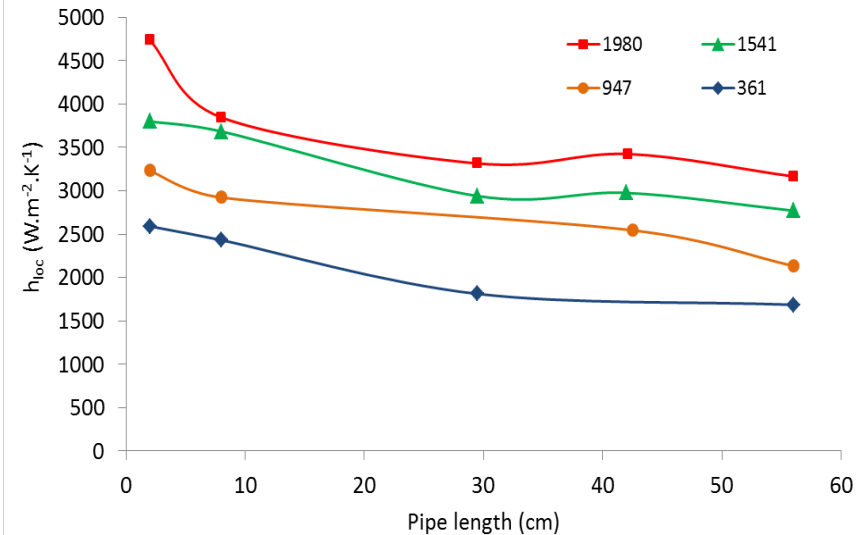
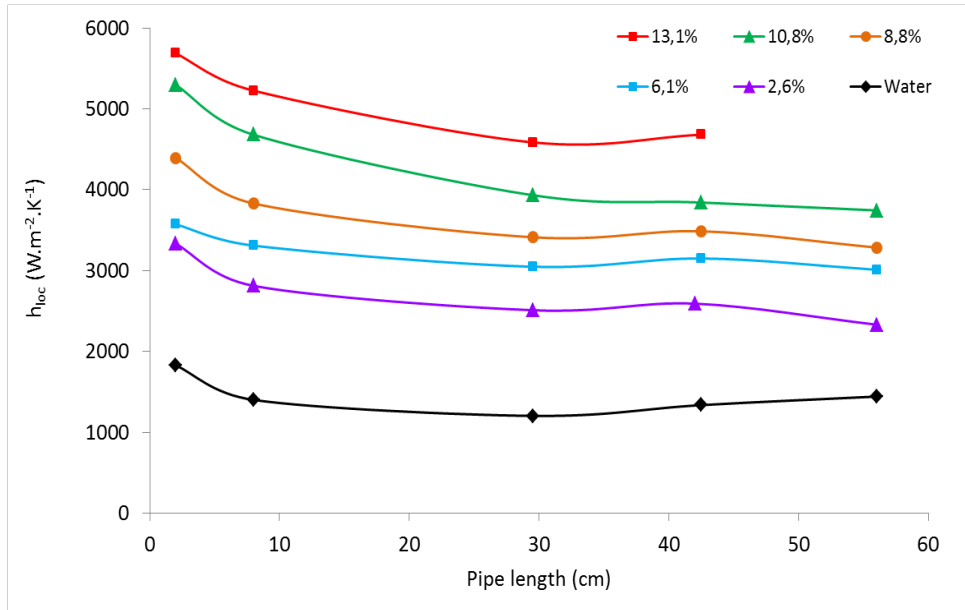
- Evolution du débit
- Débit_{max} = 94 l.h⁻¹
- Débit_{min} = 13 l.h⁻¹
- Evolution de la fraction d'entrée
6% < Φ_s < 12%

Fraction initiale : Φ_s = 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



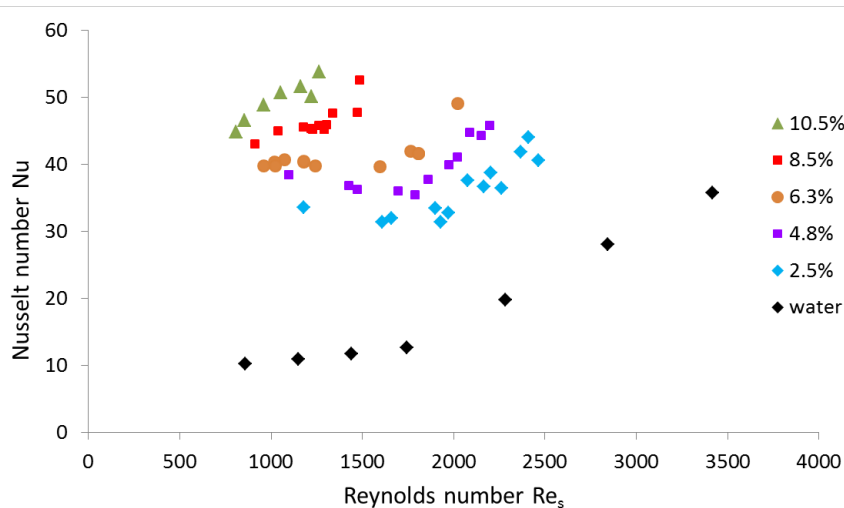
- Nombre de Reynolds moyen constant:
 $Re = 1150$
- Augmentation du h_{loc} avec la fraction:
facteur 2 entre l'eau et un coulis à 2,6%
- Stabilisation du hloc sur la deuxième moitié du tube

- 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 :

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

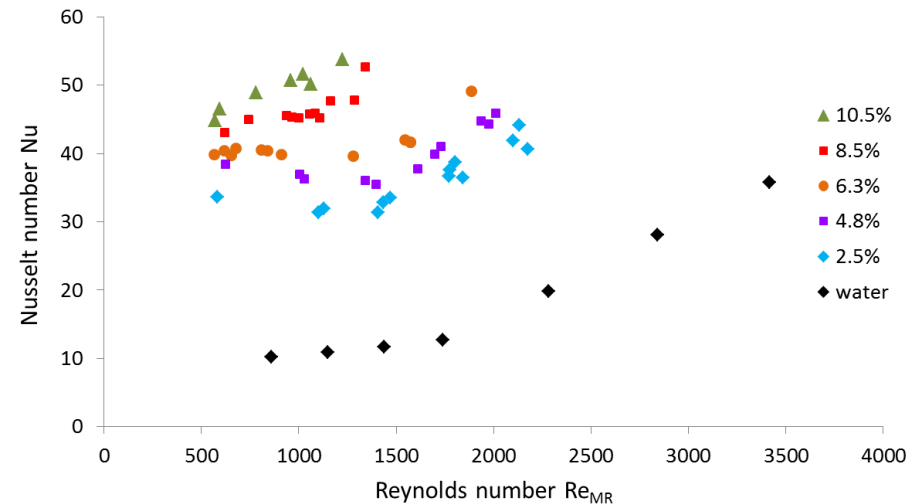
(Jerbi et al, 2013)

- 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 :

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

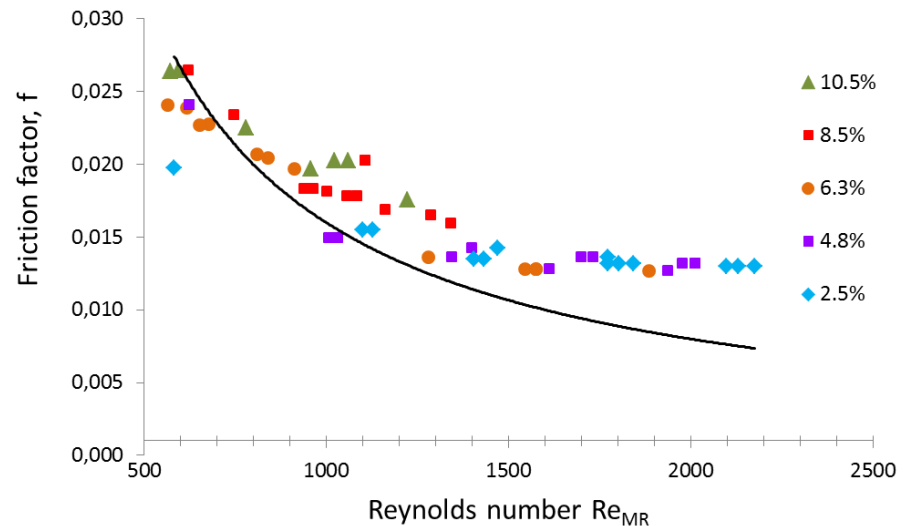
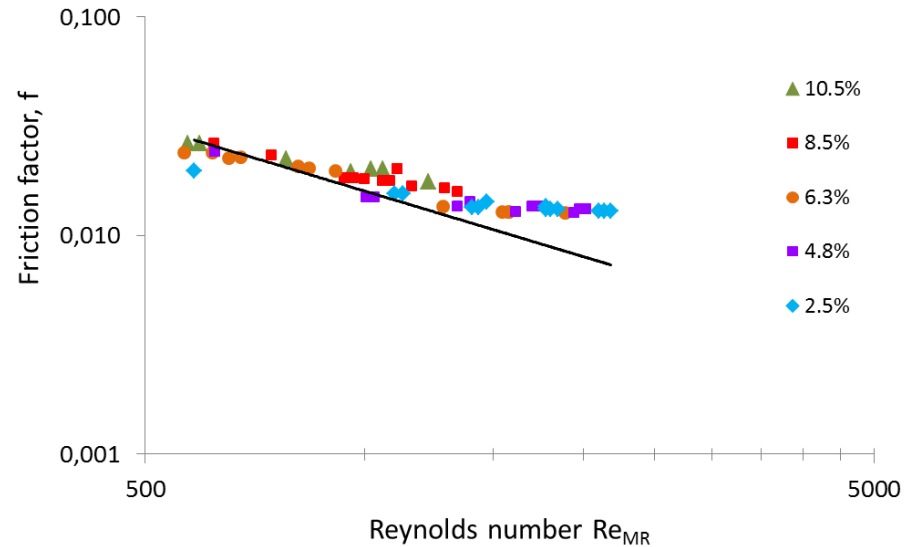
- Modèle d'Hagen-Poiseuille :

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

- Transition laminaire / turbulent

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

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





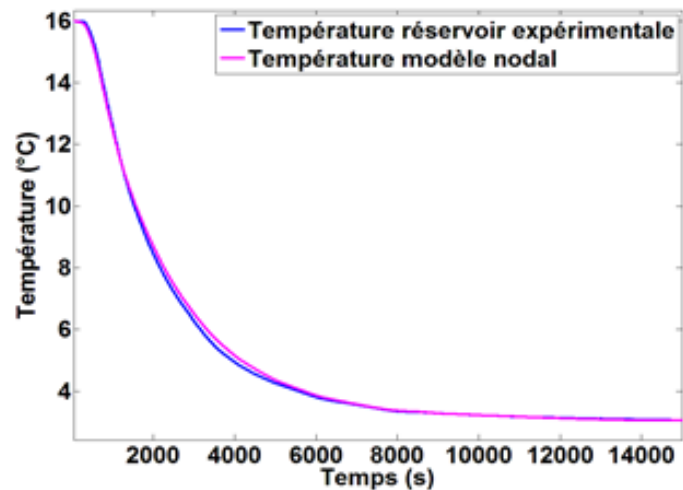
Etude Energétique

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

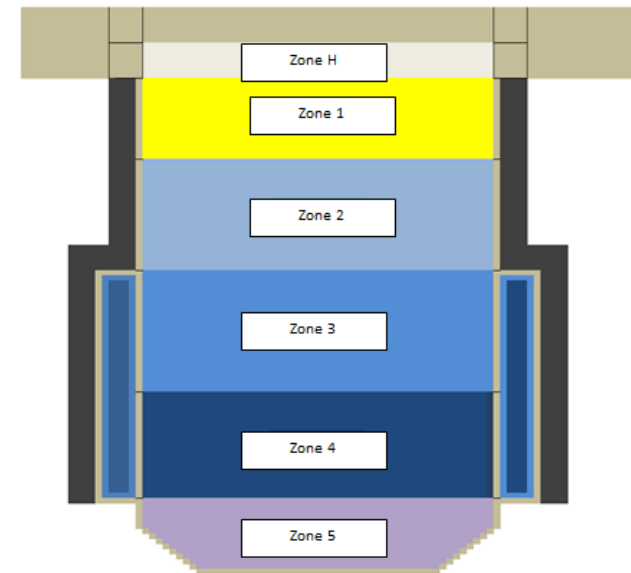
Ecriture du modèle

- 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 :

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

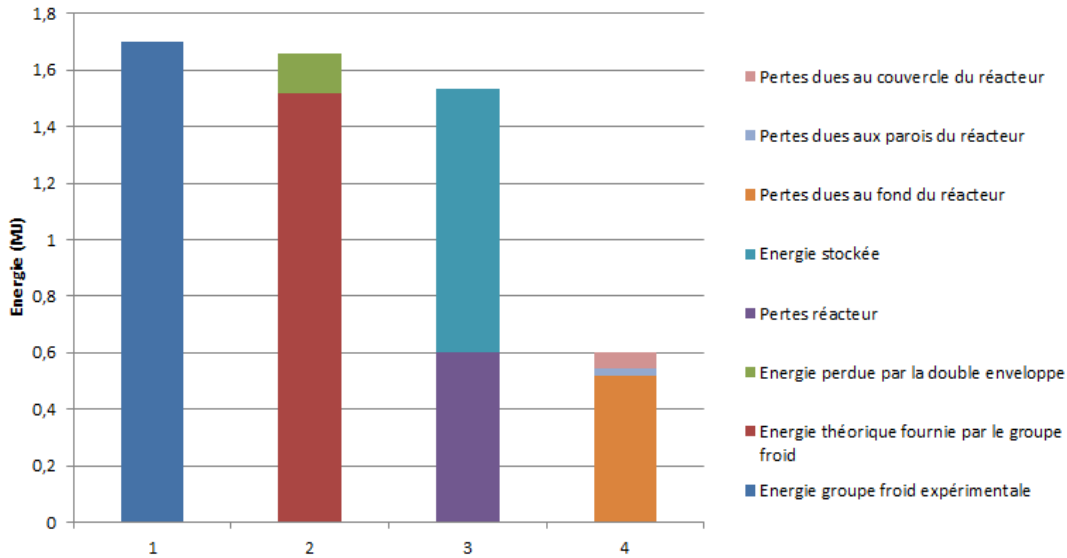
- Rendement stockage hydrate :

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

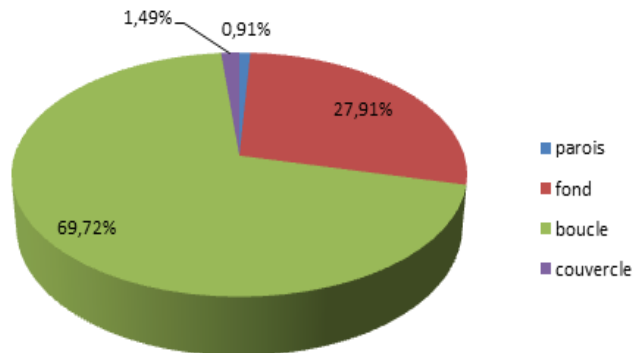
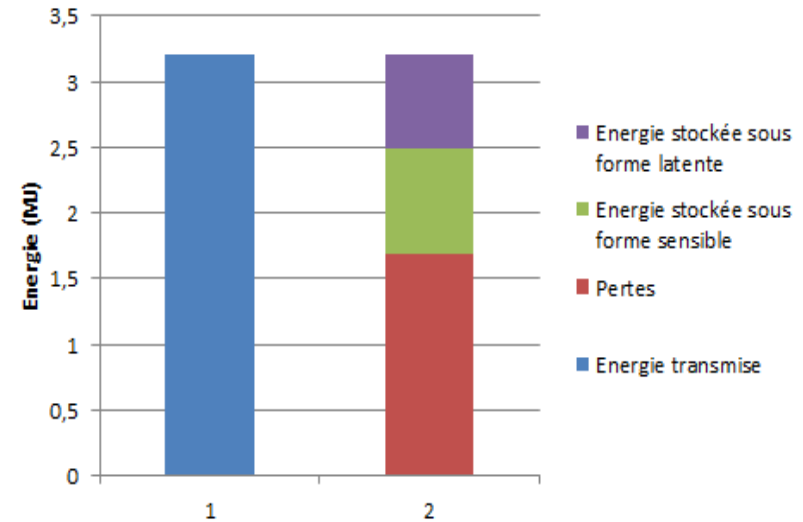
Φ_s	η_{global}	η_{form}	$\eta_{stockage}$
0 %	38 %	0 %	0 %
11.1%	47 %	22 %	47 %
15.8%	51 %	29 %	57 %
20.1%	61 %	45 %	73 %

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 CO₂.
- Etude énergétique :
 - Réalisation d'un modèle permettant de simuler le comportement énergétique du système.
- Perspectives :
 - Réaliser une modélisation exergétique du système.