



Thermodynamique des boucles de réfrigération secondaire

M. Pons

CNRS-LIMSI, Orsay

<http://perso.limsi.fr/mpons/>



Journée SFT - 30 janvier 2015
Les hydrates, de leur caractérisation à leur application

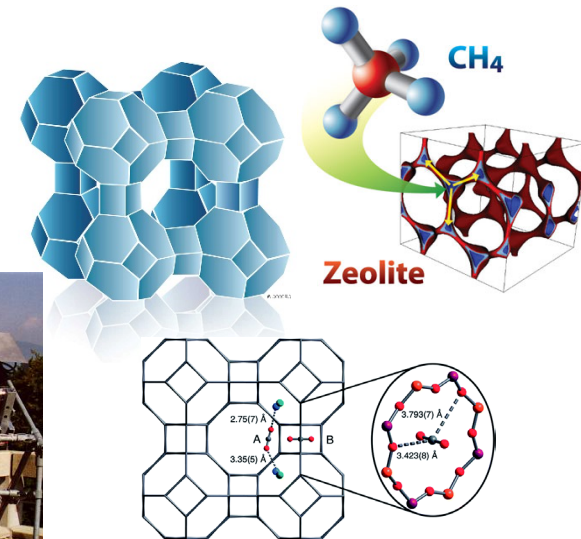


FORMHYDABLE

- Projet exploratoire PEPS « Energie » de l'INSIS 2013
- M. Pons CNRS-LIMSI, Orsay
- A. Delahaye, H.M. Hoang, L. Fournaison IRSTEA, Antony
- Expérience : l'adsorption (zéolite-eau) et son utilisation pour les procédés frigorifiques (réfrigérateurs solaires, pompes à chaleur, etc.) de préférence à haute performance énergétique.



(C) Copyright E.I.Vel et C.N.R.S.-L.I.M.S.I.



Application des hydrates : La réfrigération secondaire

- Réfrigération = 8 % des émissions de gaz à effet de serre, principalement à cause des fuites de réfrigérant.
- Injonctions à réduire ces fuites ; régulations pour diminuer le volume de réfrigérant ; recherche de solutions pour installations frigorifiques distribuées (hôpitaux, hôtels ...)
- La réfrigération secondaire : entre production et utilisation du froid une boucle de distribution remplie d'un fluide sans risque pour l'environnement.

Coulis d'hydrate comme fluide *secondaire*

AVANTAGE d'un coulis comme fluide secondaire

- Utilisation de la chaleur latente fusion : transport d'une quantité importante de chaleur sur un écart de température limité.

INCONVENIENT

- Risque de **colmatage** des canalisations

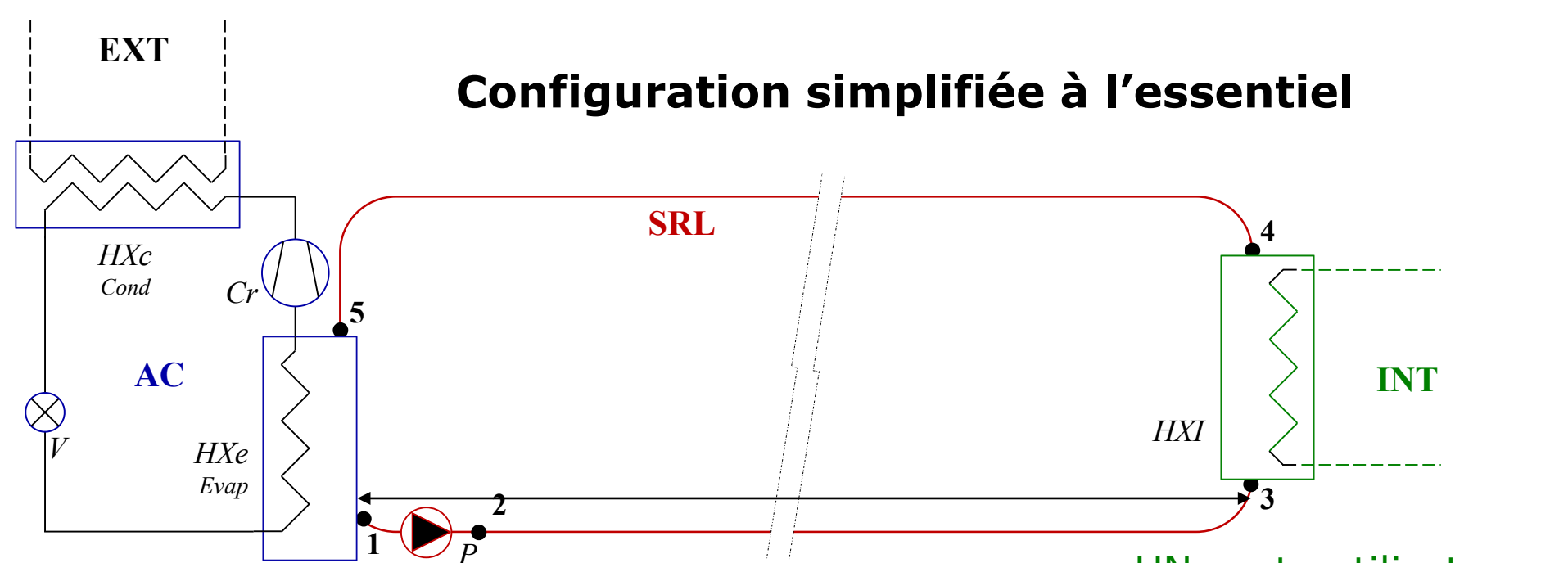
AVANTAGE des coulis d'hydrate

- Grande **variété** (THF, TBPB, TBAB ... ; CO₂, CH₄ ... ; mixtes ...) avec pour chacun une **température de fusion propre**.
- -> Possibilité d'adapter le type de coulis à l'utilisation.

Comment quantifier ces avantages qualitatifs ?

- Développer l'analyse énergétique **globale** d'un procédé machine frigorifique + boucle secondaire + utilisation : critères de dimensionnement + consommation énergétique globale.
 - Approche **rare dans la littérature** sur les hydrates : Leiper *et al.* (Energy Conservation in ice slurry applications, Appl. Therm. Eng. 2013) étudient l'effet du mode de production de glace (*raclée* ou *concassée*) sur le COP du cycle frigorifique et donc sur sa consommation énergétique.
 - Ici : **comparaison de différents coulis**, dans un cadre assez similaire, afin de quantifier les effets des différences.
- + **OPTIMISER = MAXIMISER**/minimiser une fonction **sous CONTRAINTE** donnée

Configuration simplifiée à l'essentiel



- Climatiseur centralisé rejetant sa chaleur sur l'air extérieur à 40°C

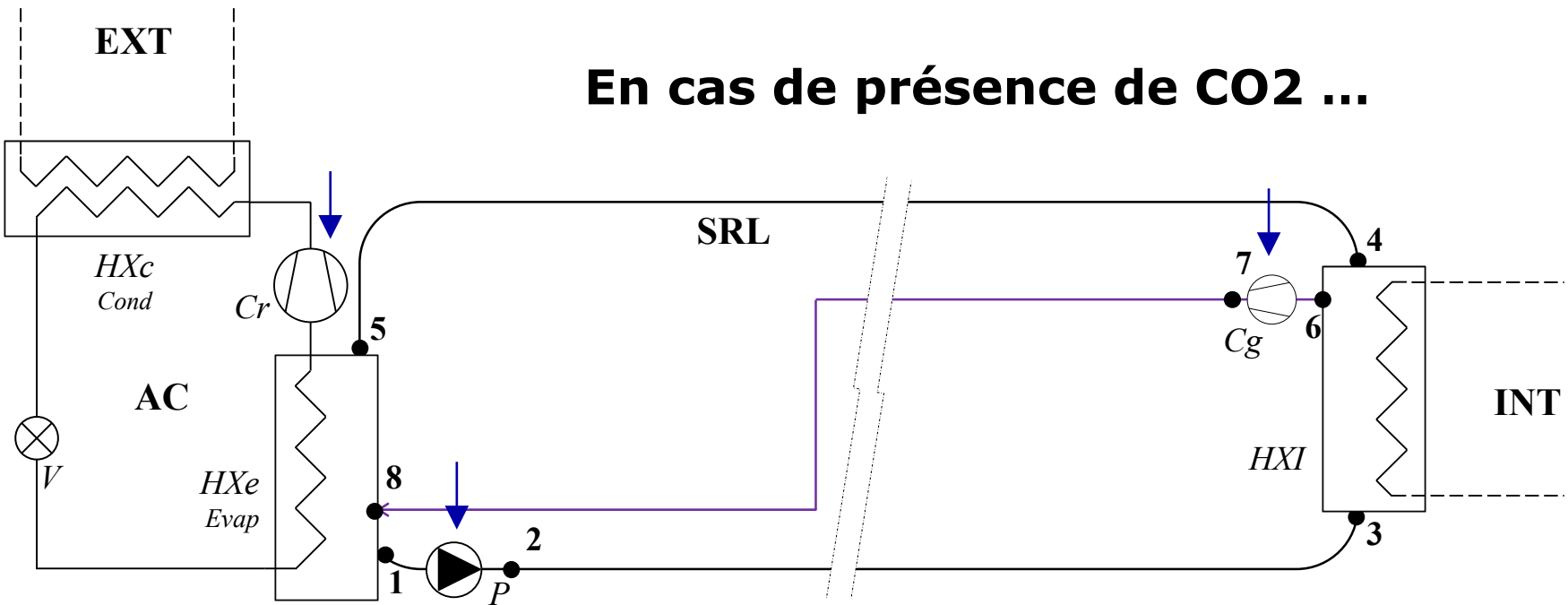
- Distance de 30 m

- UN poste utilisateur : puissance frigorifique (30 kW) délivrée à l'air intérieur à 25°C

- Dimensions & résistances thermiques des trois échangeurs fixées, t.q. écarts température à peu près fixés (env. 10 K) (investissement fixe)

- Boucle de réfrigération secondaire en ÉTAT STATIONNAIRE, avec coulis partout À L'ÉQUILIBRE (cinétique très rapide, $X_{\min} = 0,03$)

En cas de présence de CO2 ...



- ... il est supposé que la fusion provoque la **séparation des phases gazeuse et liquide**, chacune devant être ramenée séparément vers l'unité centrale où a lieu la cristallisation (échangeur *HXe*).
- La consommation énergie mécanique totale $\dot{W}_{tt} = \dot{W}_{Cr} + \dot{W}_P + \dot{W}_{Cg}$ doit être minimisée.

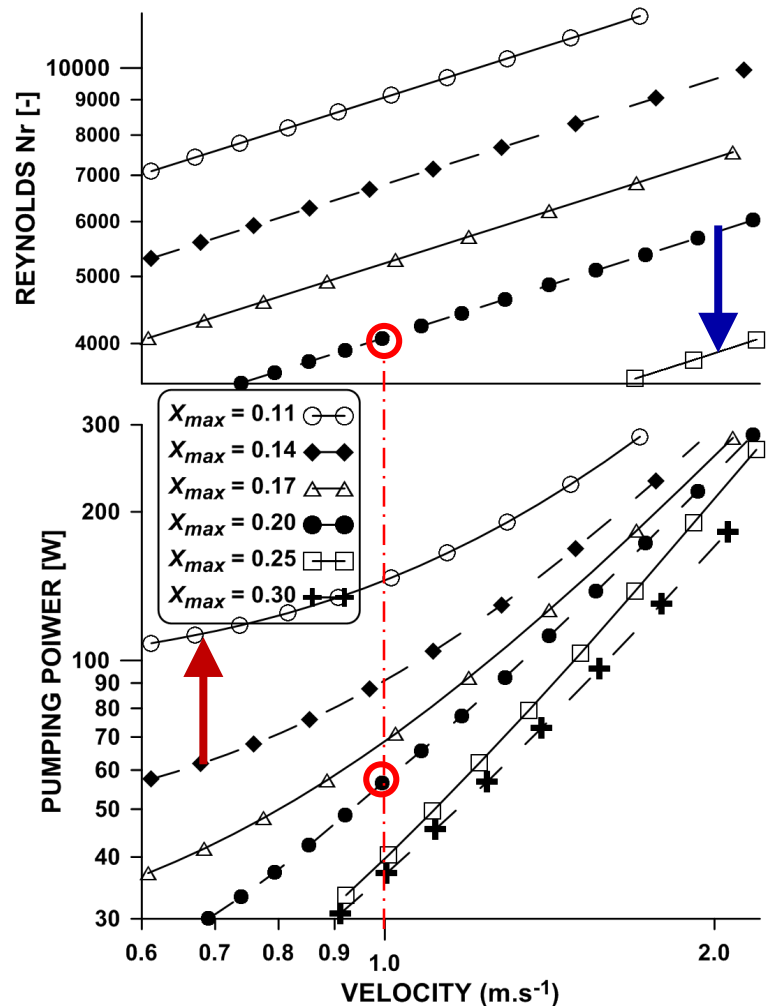
Comparaison de différents coulis

code	Définition	T _{fusion} °C	ΔH(kJ/kg)
WG008	Eau + mono-propylène-Glycol à 8 % _w	-2,7	333,6
WG000	Eau pure	0	333,6
CO120	Hydrate de CO ₂ sous 12,0 bars	0	374
CO303	Hydrate de CO ₂ sous 30,3 bars	7,2	374
TB020	Hydrate de TBPB dans solution à 20 % _w	7,2	204
Mx100	Hydrate mixte TBPB+CO ₂ dans solution à 16,1 % _w et sous 1,00 bar de CO ₂	7,2	220
Ma720	Hydrate mixte TBPB+CO ₂ dans solution à 20,0 % _w et sous 7,20 bar de CO ₂	12,1	223,5

Démarche

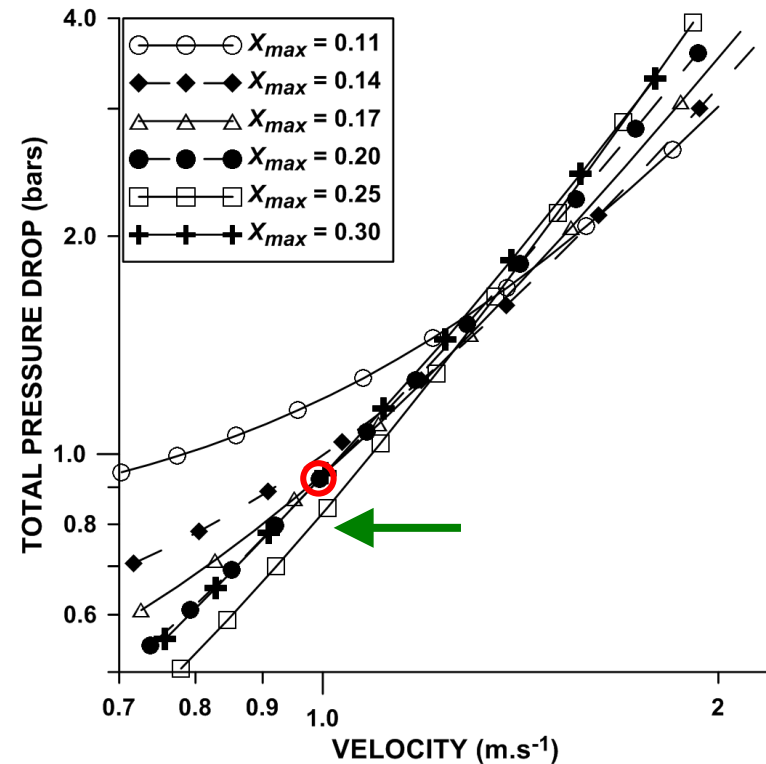
- Sont choisis :
 - le diamètre des canalisations de la boucle,
 - la valeur max du taux de cristaux dans le coulis X_{\max} (jusqu'à 0,3)
- En sont déduits :
 - Le débit massique de coulis, $\dot{m}_{s3}X_3 - \dot{m}_{s4}X_4 = \dot{Q}_I / \Delta H$
 - la vitesse, le Reynolds, la perte de charge totale, et donc la puissance de pompage $\dot{W}_P = \dot{m}_s \Delta P_{tt} / \rho_s$
 - Si CO2 : le débit volumique dégagé par la fusion la perte de charge de retour, la puissance de recompression.
 - Les flux thermiques échangés aux échangeurs du climatiseur les températures du réfrigérant dans les échangeurs, le COP du cycle, et la puissance consommée par le compresseur.

Eau + mono-propylène-Glycol à 8 %_w



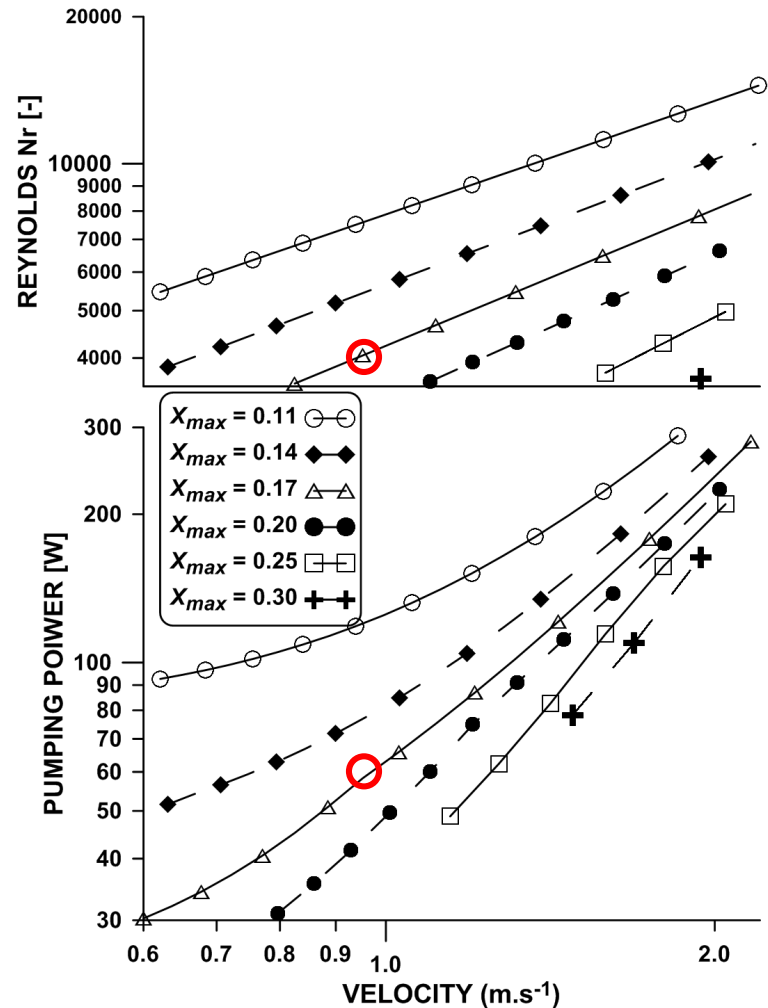
- *La condition $Re > 3500$ limite la valeur de X_{max} (forte viscosité & diamètres réduits)*

- *X_{max} faible : débit coulis et WP forts.*

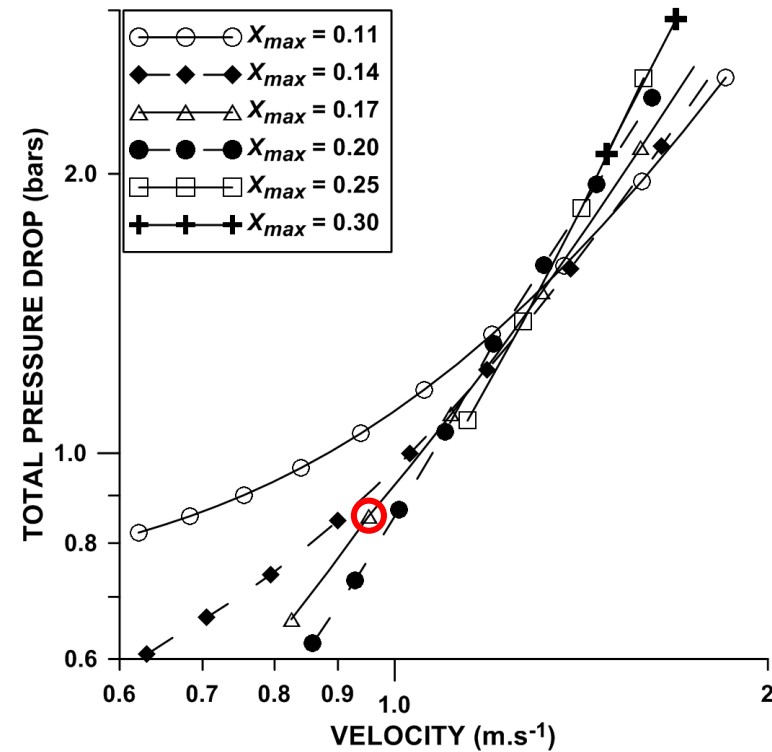


- *À vitesse d'écoulement donnée $\approx 1\text{m/s}$, la perte de charge totale dans la boucle peut être minimisée avec un X_{max} « intermédiaire ».*

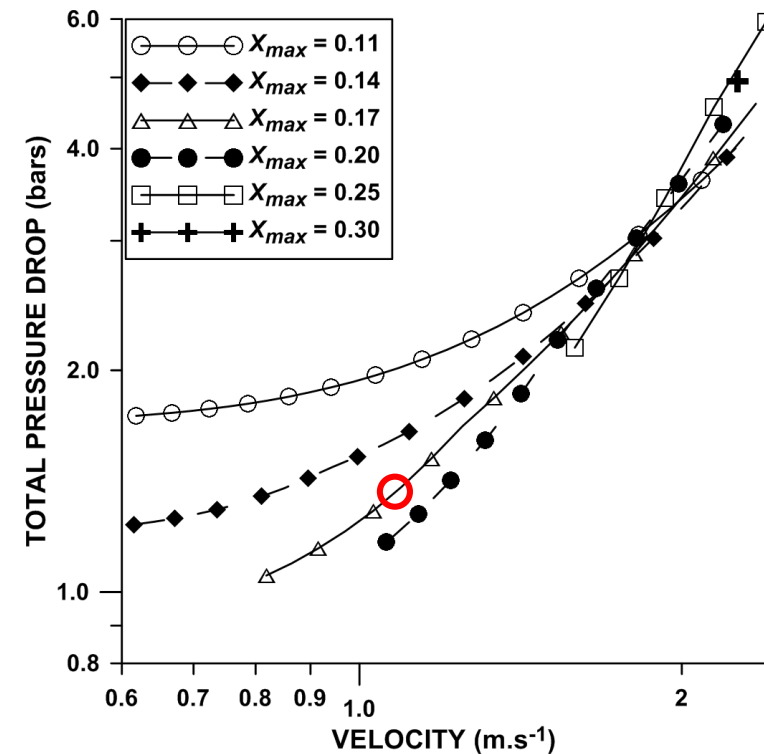
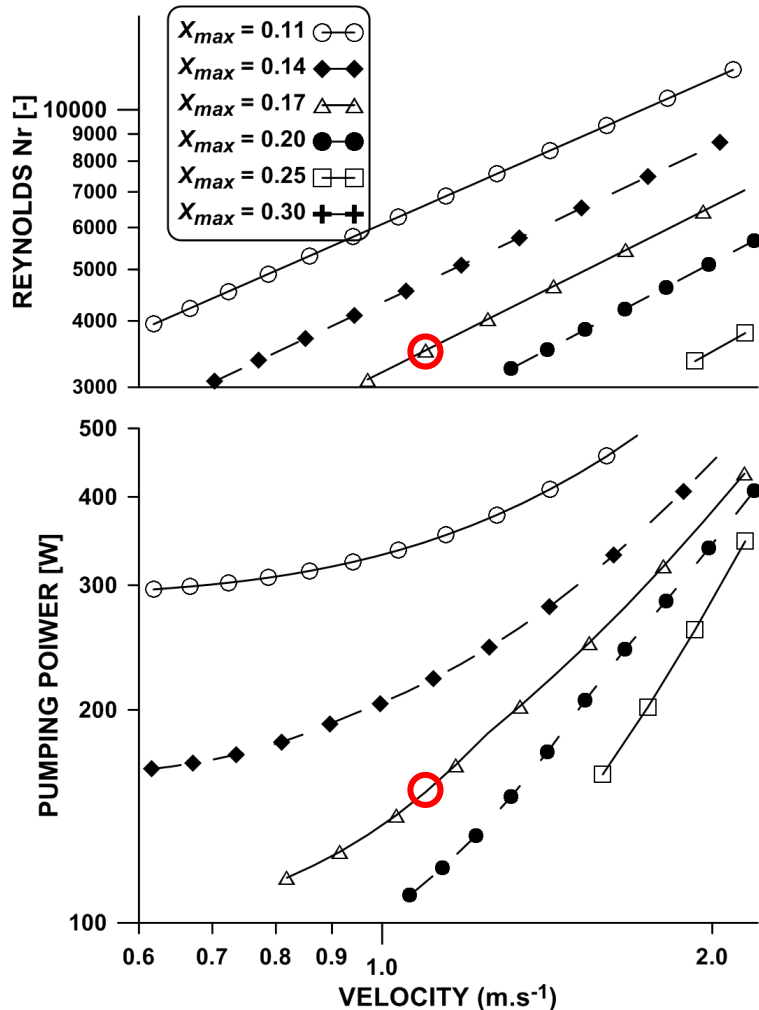
Hydrate de CO₂ sous 30,3 bars



- Mêmes traits généraux
- Pénalisation des fortes valeurs de X_{max} encore plus marquée.

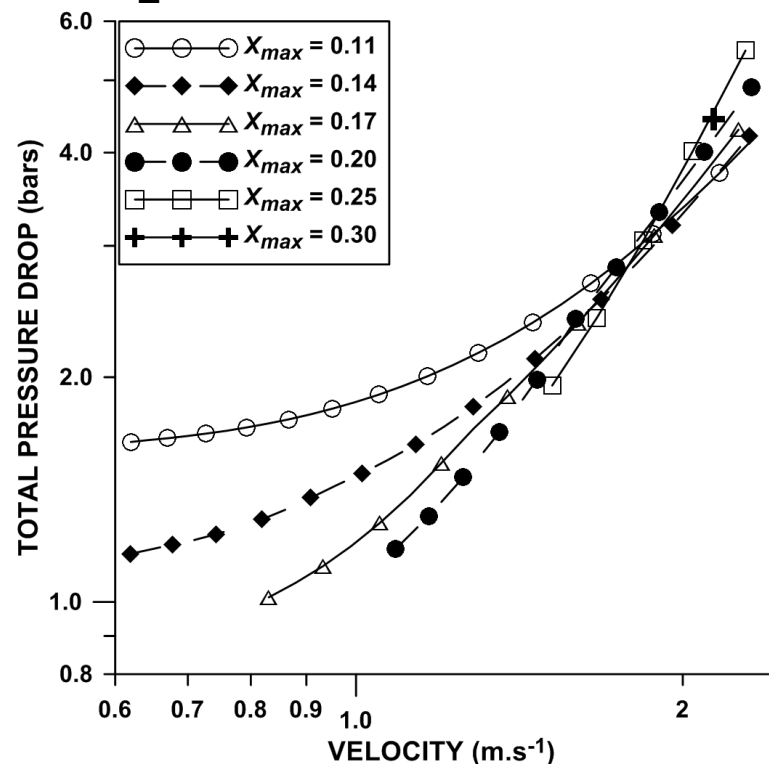
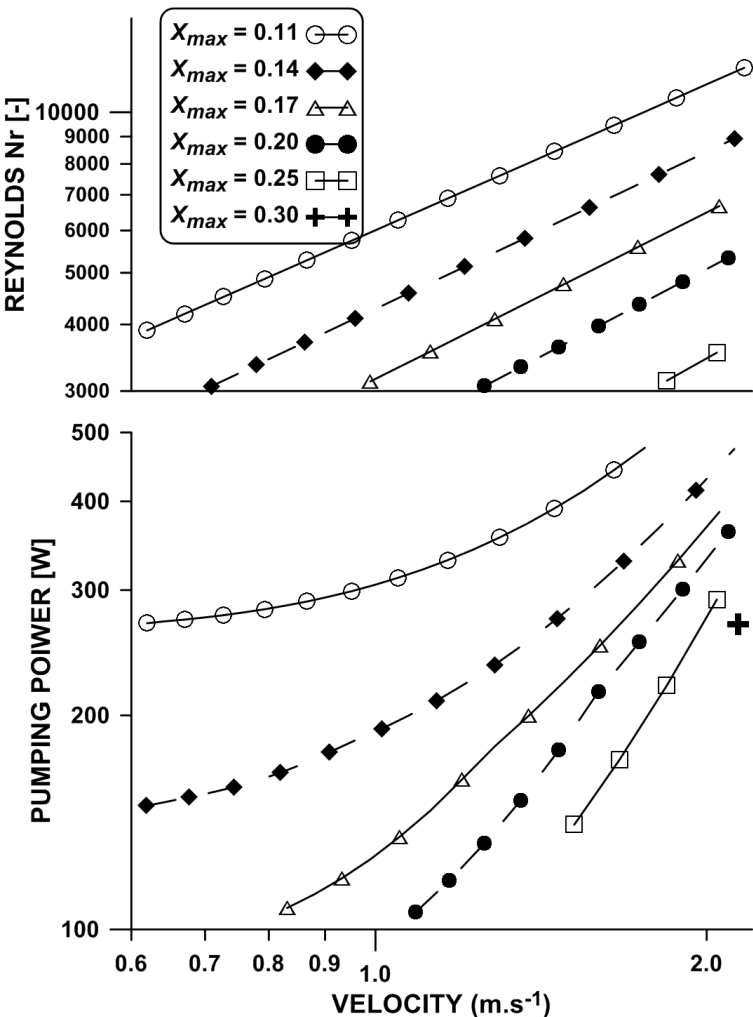


Hydrate de TBPB dans solution à 20 %_w



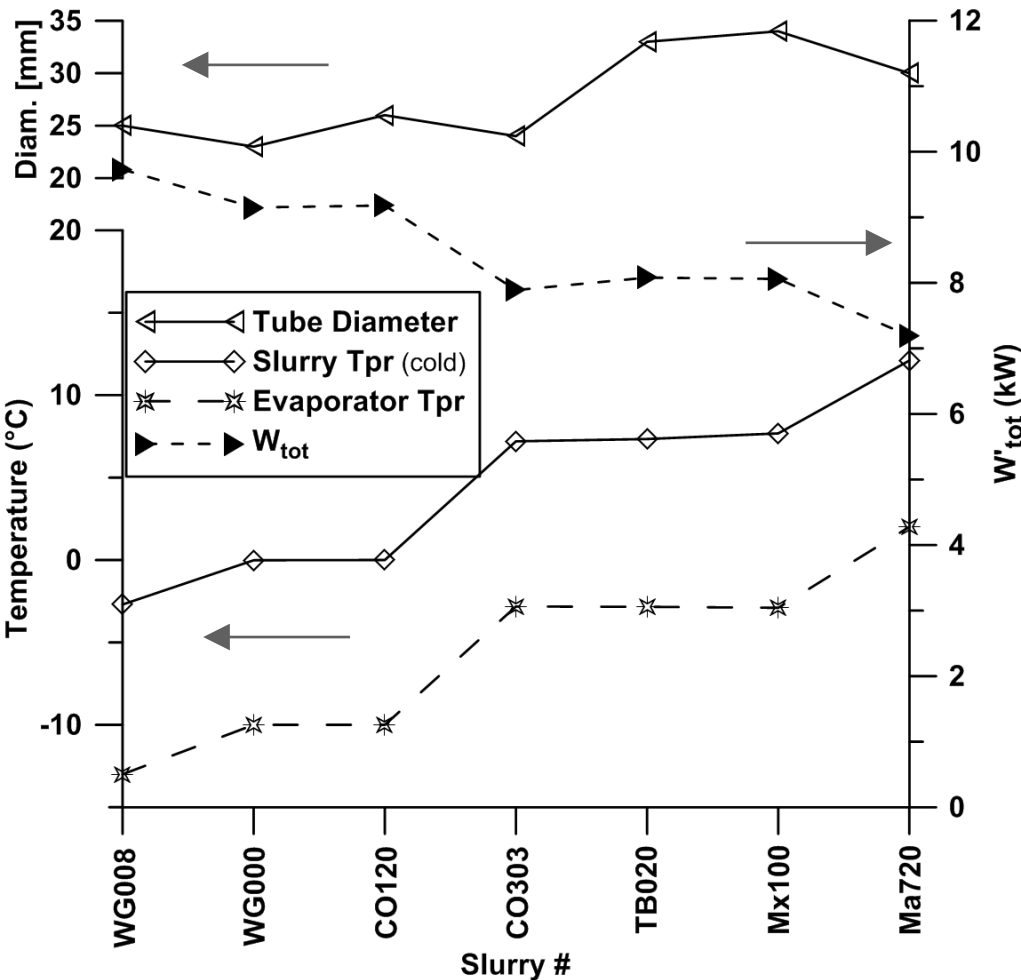
- Mêmes traits généraux
- Nette hausse de la perte de charge et de la puissance de pompage

Hydrate mixte TBPB+CO₂ dans solution à 20,0 %_w et sous 7,20 bar de CO₂



- Influence limitée de la présence de CO₂ dans l'hydrate

Graphe récapitulatif



- La dépense énergétique dépend principalement de la température de fusion du coulis.
- Le diamètre « s'adapte » au débit, lequel dépend du ΔH .
- Coulis de glace : $T = 0^{\circ}\text{C}$.
- Coulis de glace dans eau glycolée : $T < 0^{\circ}\text{C}$.
- Coulis d'hydrate (eau + sel) : $T > 0^{\circ}\text{C}$, mais $\Delta H < 300$ kJ.
- Coulis d'hydrate de CO_2 : $T > 0^{\circ}\text{C}$, $\Delta H \approx 300$ kJ, mais $P \gg 1$ b.
- Coulis d'hydrate mixte de CO_2 (eau + sel) : $T > 0^{\circ}\text{C}$, $\Delta H \approx 300$ kJ, et $P \approx \text{qq bars}$.
- Équilibre tri-phasique (au moins), avec un degré de liberté « supplémentaire » : la pression de CO_2 .

Conclusions

- Conclusion partiellement contre-intuitive :
 - Oui, le changement de phase est favorable au transport de froid ;
 - Non, cela ne veut pas dire qu'il faut charger le coulis avec autant de cristaux que possible.
- La température de fusion est le paramètre principal pour la consommation du groupe froid (déjà connu dans la littérature)
- La dimensionnement de la boucle doit être global (du ΔH au ΔP)

Merci

- PEPS Energie INSIS *FORMHYDABLE*
 - Camille de Romémont

**pour votre attention
et vos questions**