

Modélisation dynamique d'un système pompe à chaleur (PAC) – stockage par matériau à changement de phase (MCP), approche par réseau de zones uniformes.

Participants au projet pour le LAGEP

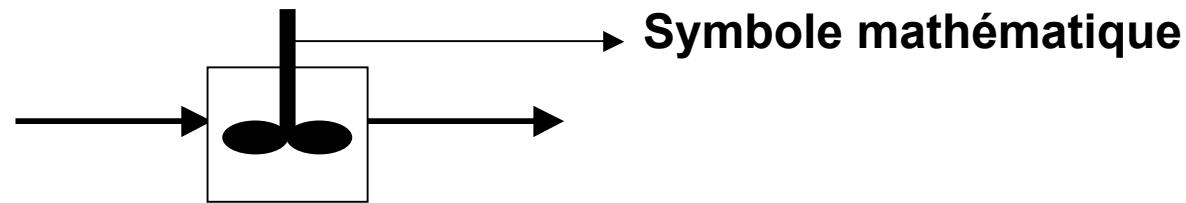
**J. WU, F. COUENNE, E. GAGNIERE, B. HAMROUN,
C. JALLUT**

**Workshop ACLIRSYS
CNAM -Paris, 20 mars 2014**

La Brique de Base pour les écoulements

le Réacteur Parfaitement Agité Continu (RPAC)

Concept issu du Génie de la Réaction Chimique



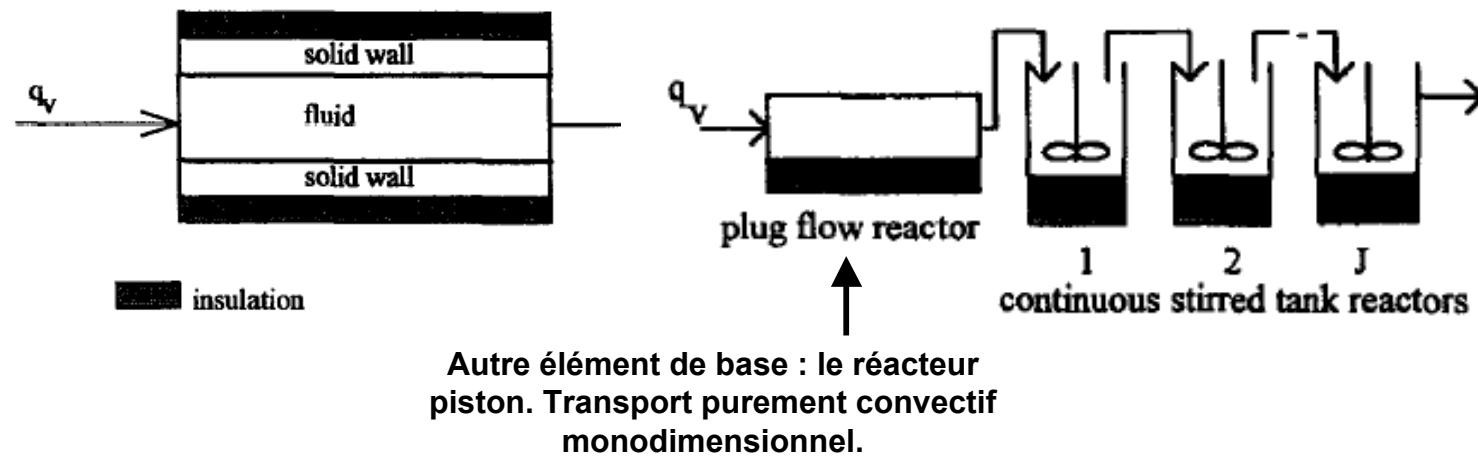
Agitation parfaite :
Etat uniforme

Les flux de sortie sont dans l'état interne

Un réseau de RPAC constitue un modèle d'écoulement.

Deux exemples de travaux antérieurs

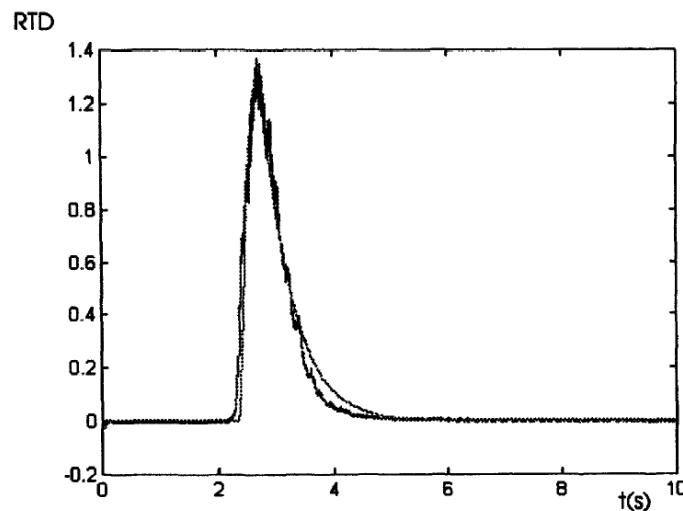
Exemple 1 : caractérisation dynamique du transfert thermique dans un liquide s'écoulant entre deux plaques corrugées



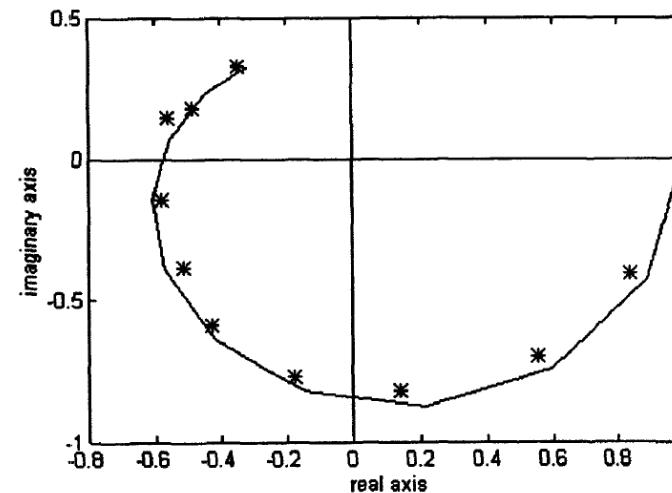
Travaux réalisés au GRETh - CEA Grenoble

S. Ros, C. Jallut, J. M. Grillot, M. Amblard (1995), A transient state technique for the heat transfer coefficient measurement in a corrugated plate heat exchanger channel based on frequency response and residence time distribution, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 38(7), 1317-1325

Caractérisation dynamique du transfert thermique dans un liquide s'écoulant entre deux plaques corrugées



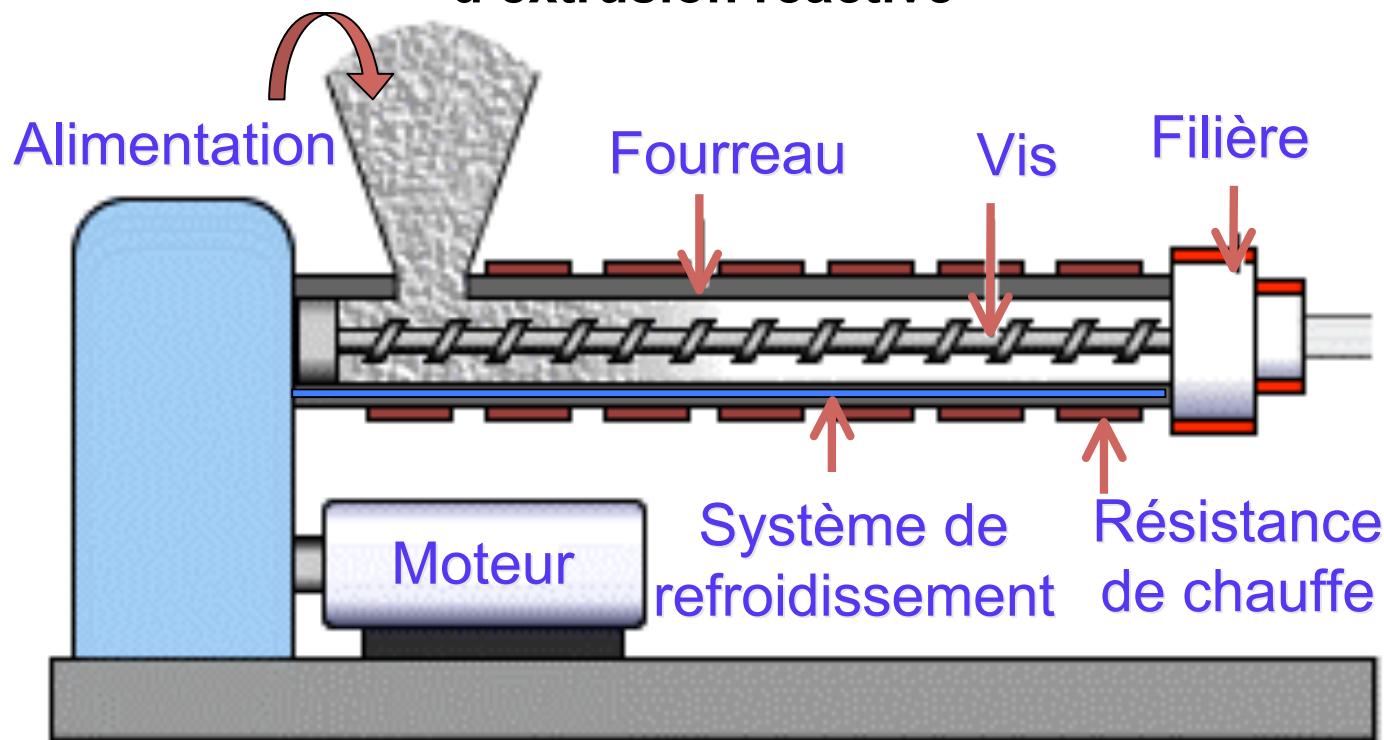
Réponse impulsionnelle à l'injection d'un traceur. Ajustement du modèle d'écoulement.



Analyse fréquentielle : température d'entrée sinusoïdale à fréquence variable

Détermination du coefficient d'échange de chaleur par ajustement du modèle

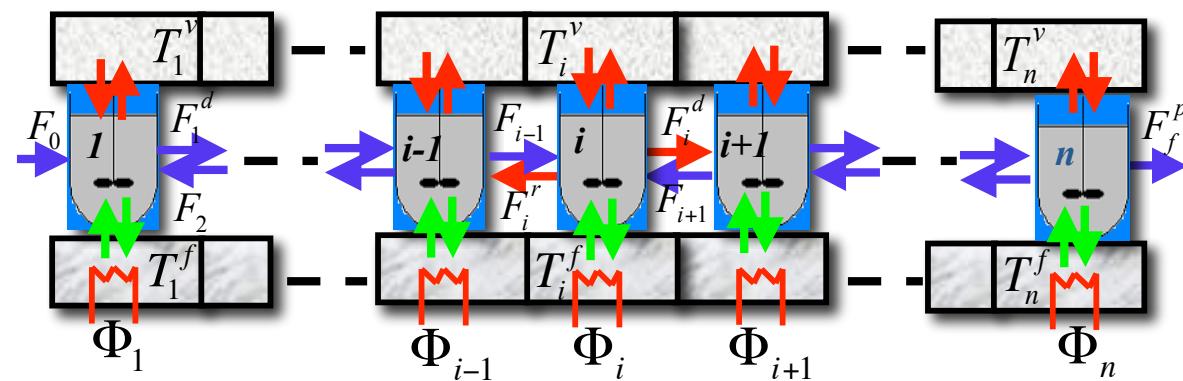
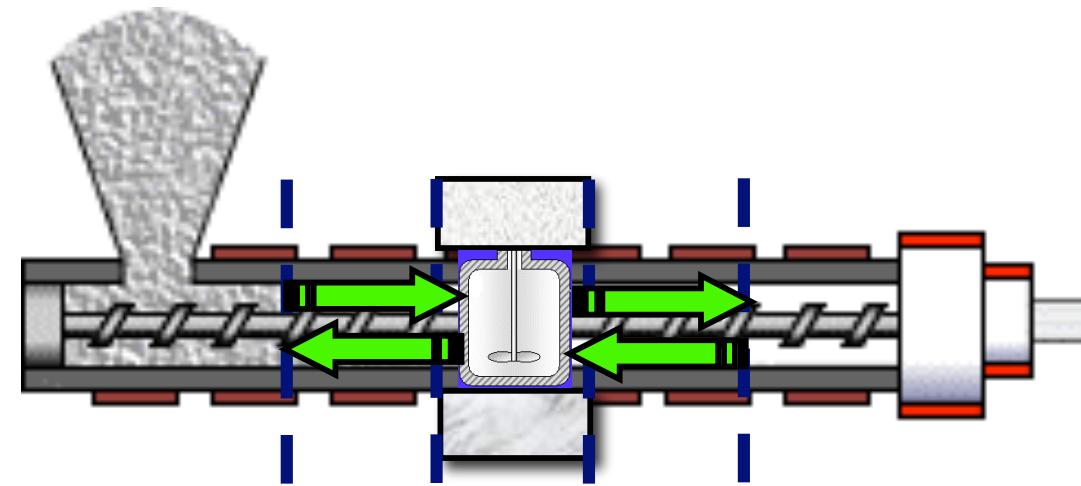
Exemple 2 : Modélisation dynamique d'une opération d'extrusion réactive



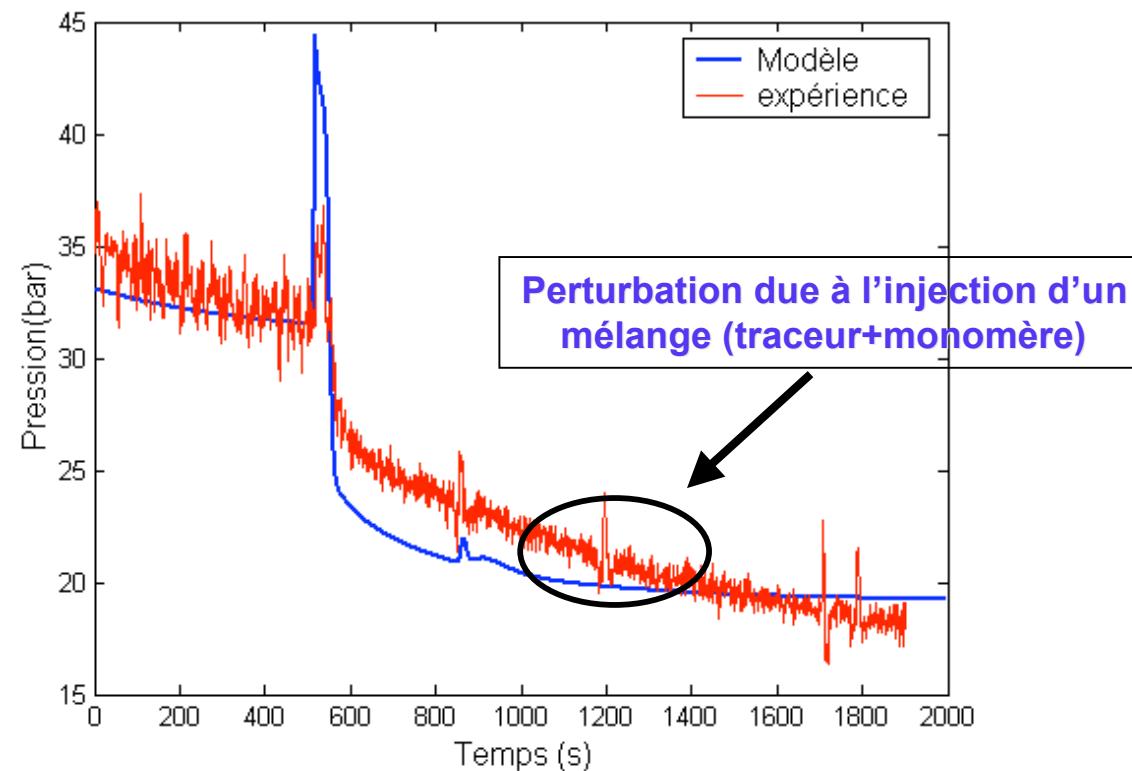
S. Choulak, F. Couenne, Y. Le Gorrec, C. Jallut, P. Cassagnau, A. Michel (2004), A generic dynamic model for simulation and control of reactive extrusion, *IEC Res.*, 43(23), 7373-7382

T. Goma Bilongo, F. Couenne, C. Jallut, Y. Le Gorrec, A. Di Martino (2012) Dynamic modeling of the reactive twin-screw co-rotating extrusion process: experimental validation by using inlet glass fibers injection response and application to polymers degassing, *IEC Res.*, 51(35), 11381-11388

Exemple 2 : Modélisation dynamique d'une opération d'extrusion réactive



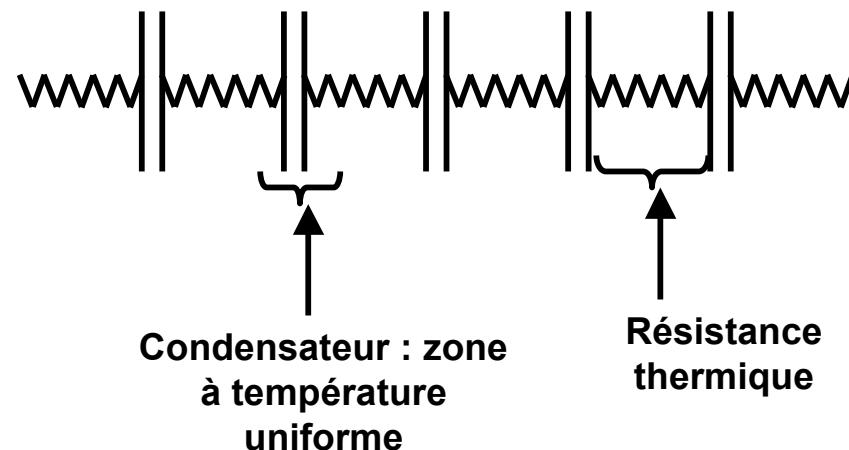
Exemple 2 : Modélisation dynamique d'une opération d'extrusion réactive



Validation expérimentale : influence de la variation de la vitesse des vis sur la pression en amont de filière

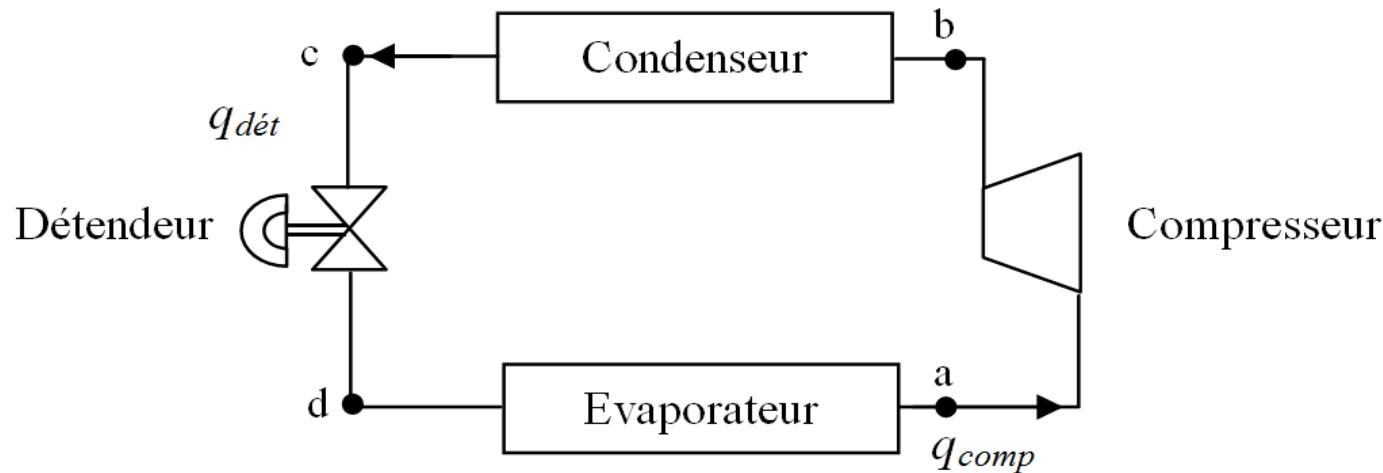
Approche similaire en Thermique ? Analogie électrique en conduction

Problème du mur monodimensionnel en dynamique



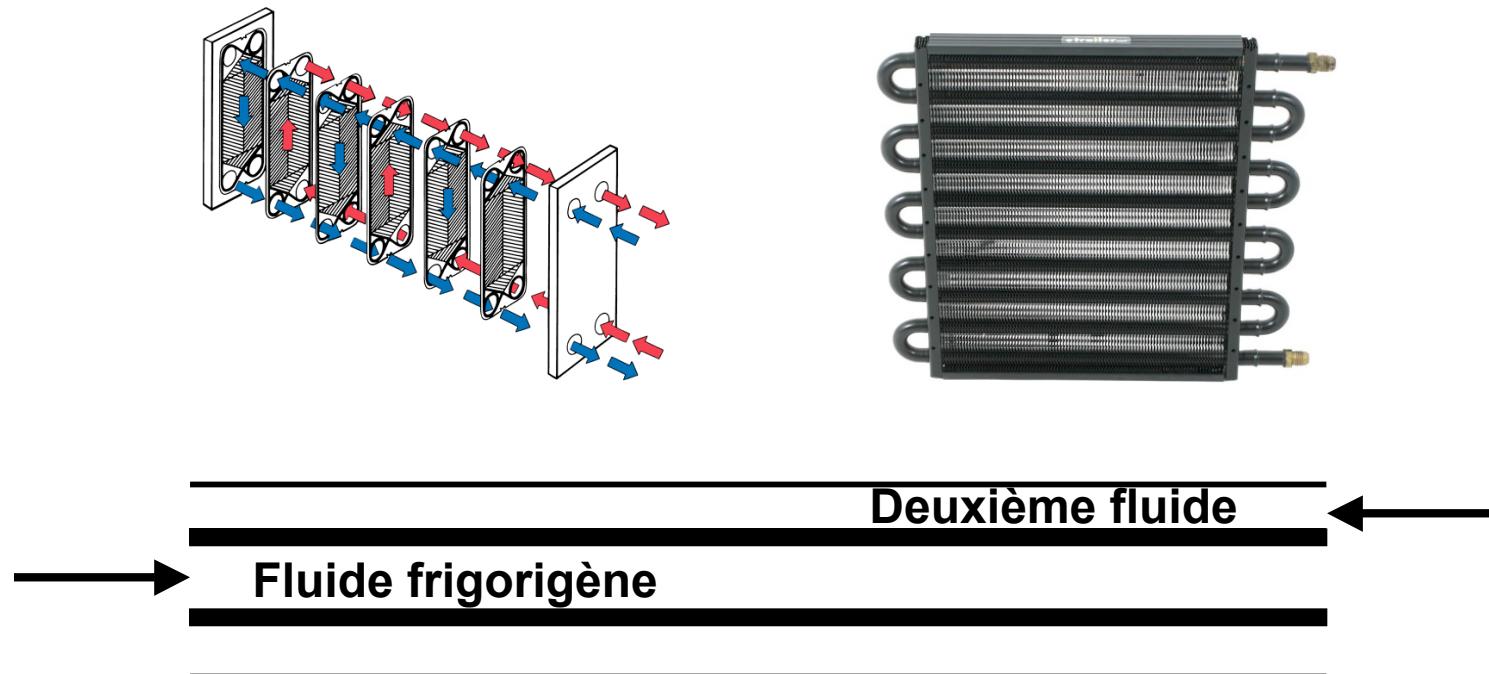
Séparation entre les deux phénomènes qui en réalité ont lieu
au même endroit dans le matériau

Application à la modélisation dynamique d'une PAC. Situation de base.

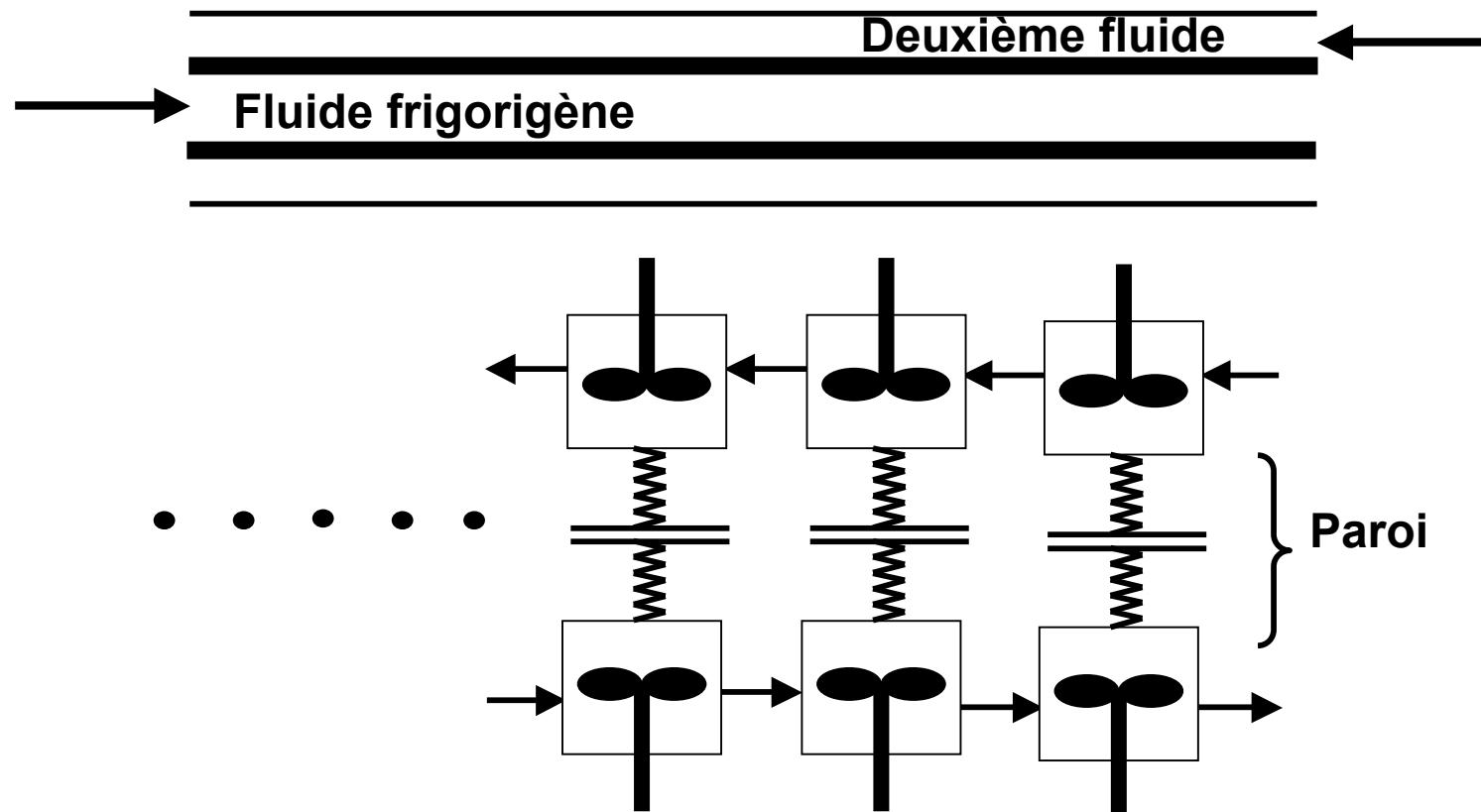


**Détendeur et compresseur : éléments représentés statiquement
 (pas d'accumulation de matière ni d'énergie).**

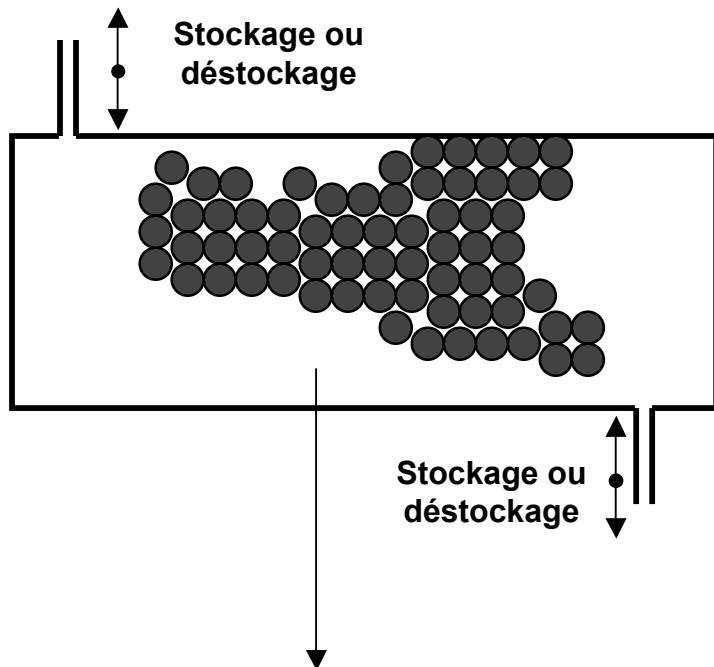
Échangeurs à chaleur: éléments dynamiques représentés par un bi-tube équivalent.



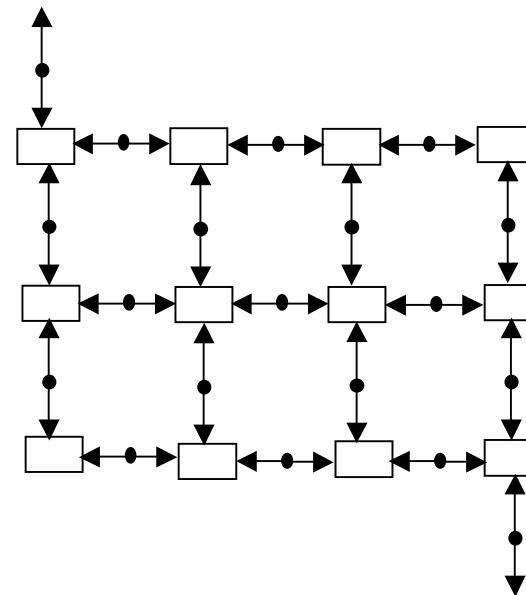
Le bi-tube équivalent et sa structure de modèle. Réseau de type série.



Structure du modèle dynamique du stock MCP CRISTOPIA.

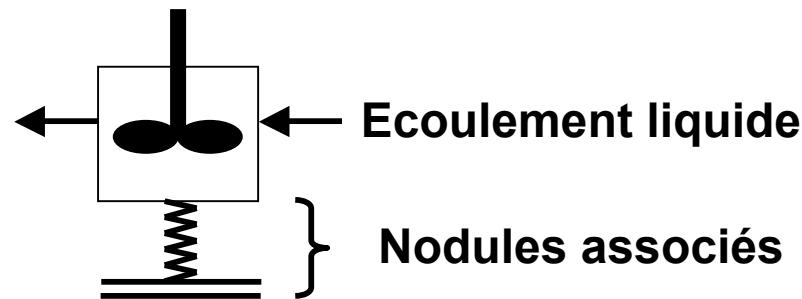


Nodules contenant de l'eau : stockage par solidification, déstockage par fusion.



**Réseau série/parallèle
 d'éléments de base de
 modélisation.**

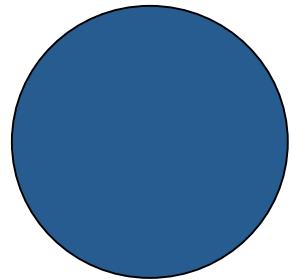
Structure du modèle dynamique du stock MCP. Un élément du réseau.



**La quantité de nодules associée au volume de liquide est dans le
même rapport qu'au niveau du stock complet.**

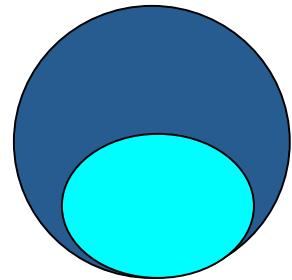
La grande difficulté de ce modèle : la configuration au sein des nодules et des éléments de représentation du fluide frigorigène dans les ´changeurs n'est pas fixe.

Trois états possibles pour un nodule



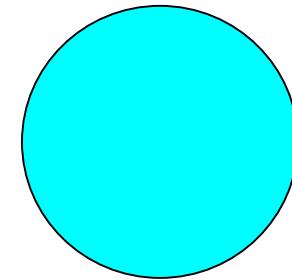
Solide

$T_k(t)$



Mélange solide-liquide

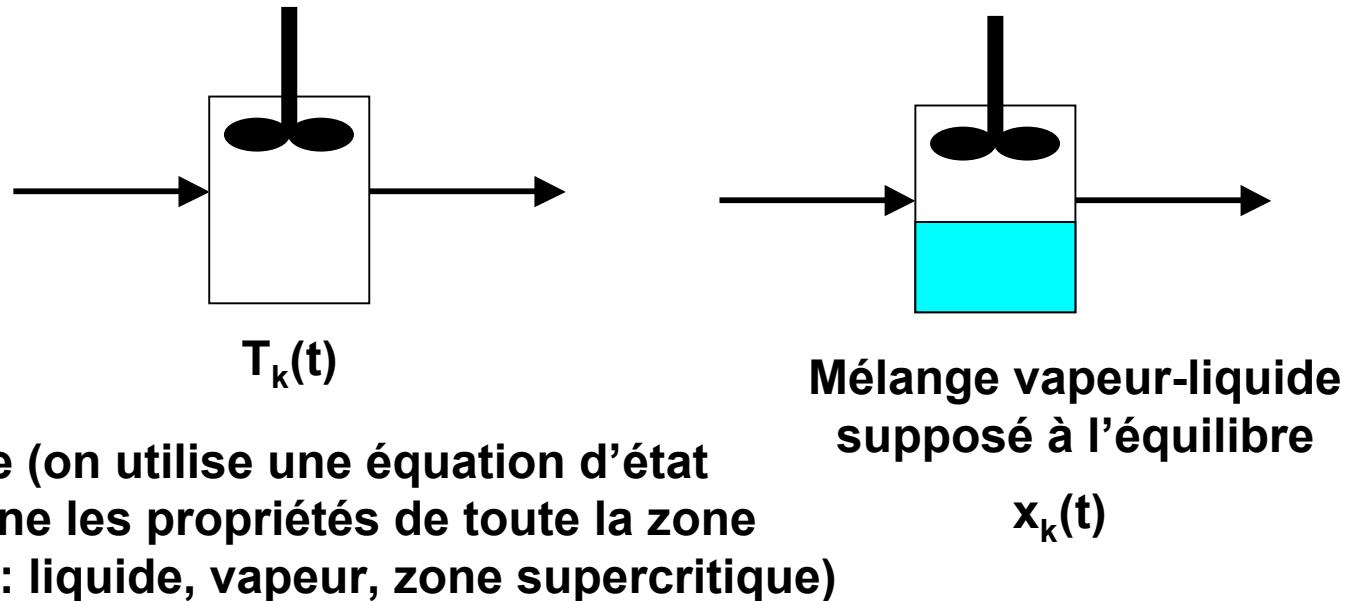
$x_k(t)$



Liquide

$T_k(t)$

Deux états possibles pour un RPAC contenant du fluide frigorigène

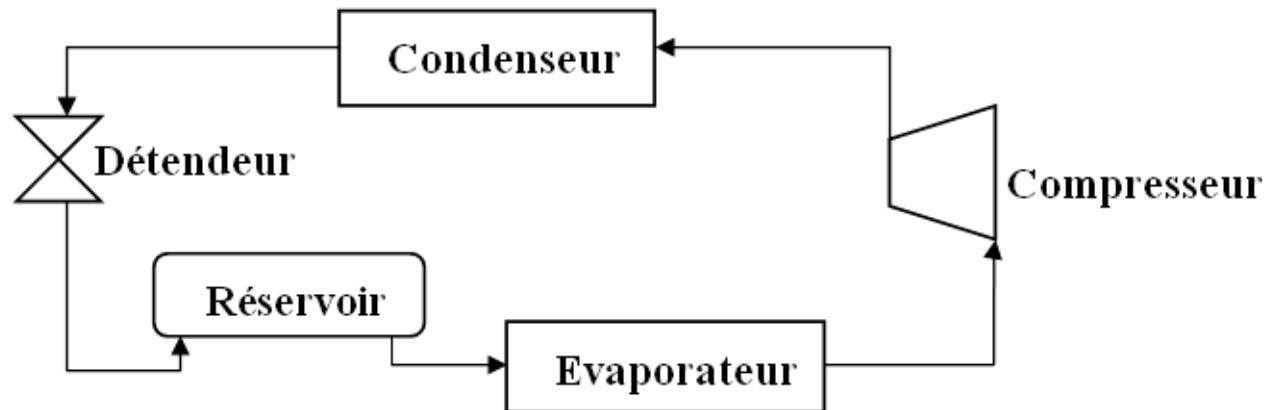


Système hybride dont l'évolution est à la fois continue et dépendante d'évènements discrets

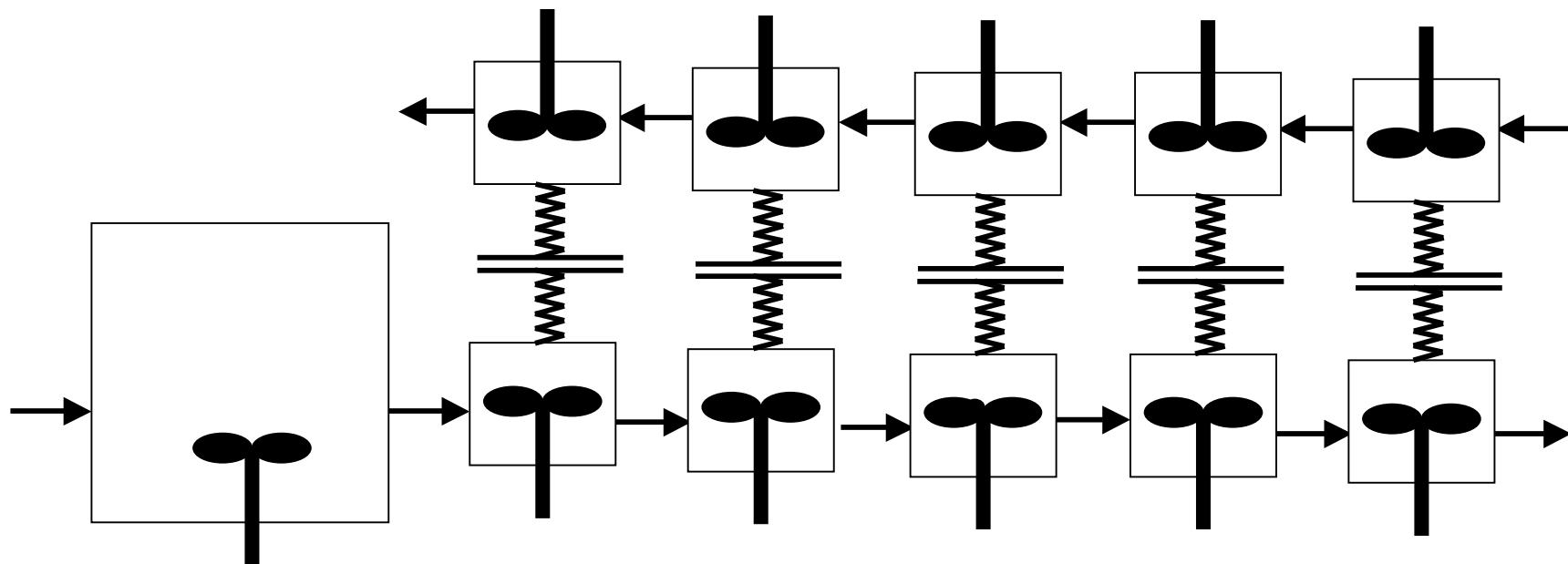
A chaque instant de la simulation il faut :

- repérer la configuration dans chaque élément du réseau ;
- repérer un changement éventuel de configuration et réactualiser l'expression du modèle pour continuer le calcul dans la nouvelle configuration.

**Avancement des travaux pour la PAC.
Prise en compte d'une bouteille d'accumulation
en amont de l'évaporateur (conditions d'essais CIAT).**



Le bi-tube équivalent et le réservoir.



Quelques détails sur le modèle d'échangeurs

Bilans dans chaque RPAC et zones uniformes

Bilan de matière du fluide frigorigène :

(Eq 1)
$$q_{k-1} = q_k + V \dot{\rho}_k$$

Bilan d'énergie du fluide frigorigène :

(Eq 2)
$$h_{k-1}q_{k-1} + \alpha_{ip}S_{ip}(T_{p_k} - T_k) = h_kq_k + V(\dot{\rho}_k u_k + \rho_k \dot{u}_k)$$

Bilan d'énergie du tube :

(Eq 3)
$$\rho_{p_k}S_p l c_{P_p} \dot{T}_{p_k} = \alpha_{ip}S_{ip}(T_k - T_{p_k}) + \alpha_{ep}S_{ep}(T_{a_k} - T_{p_k})$$

Bilan d'énergie du fluide extérieur (contre-courant) :

(Eq 4)
$$\rho_{a_k}S_a l c_{P_a} \dot{T}_{a_k} = q_a c_{P_a}(T_{a_{k+1}} - T_{a_k}) - \alpha_{ep}S_{ep}(T_{p_k} - T_{a_k})$$

α : coefficient de transfert thermique c_p : capacité thermique h : enthalpie massique
 q : débit massique u : énergie interne massique l, V : longueur et volume de 'sous-volume'

Zone monophasique : équation d'état de Lemmon (2003)

2 variables d'état nécessaires

$$P(\rho_k, T_k), \ u(\rho_k, T_k), \ h(\rho_k, T_k)$$

Avec $\dot{u} = a_k \dot{\rho} + b_k \dot{T}$, l'équation (2) peut être exprimée:

(Eq 5)
$$V(u_k + a_k \rho_k) \dot{\rho}_k + V b_k \rho_k \dot{T}_k = h_{k-1} q_{k-1} - h_k q_k + \alpha_{ip} S_{ip} (T_{p_k} - T_k)$$

Les Eqs (1), (3), (4) ,(5) + $\dot{x}_k = 0$ peuvent former un système

$$A_m * \dot{X} = B_m$$

$$X^T = [\rho_1 \ T_1 \ x_1 \ T_{p_1} \ T_{a_1} \ \cdots \ \rho_N \ T_N \ x_N \ T_{p_N} \ T_{a_N}]$$

Zone diphasique (liquide +vapeur): une seule variable d'état nécessaire

$P(T_k)$, $u_l(T_k)$, $u_v(T_k)$, $h_l(T_k)$, $h_v(T_k)$, $\rho_l(T_k)$, $\rho_v(T_k)$ (**ASHRAE, 2001**)

$\rho(x, \rho_l, \rho_v)$, $u(x, u_l, u_v) \Rightarrow \rho(x, T_k)$, $u(x, T_k)$

(Eq 6) $\dot{\rho}_k = R_{x_k} \dot{x}_k + R_{T_k} \dot{T}_k$ et $V(\dot{\rho}_k u_k + \rho_k \dot{u}_k) = VW_{x_k} \dot{x}_k + VW_{T_k} \dot{T}_k$

L'équation (2) devient :

(Eq 7) $VW_{x_k} \dot{x}_k + VW_{T_k} \dot{T}_k = h_{k-1} q_{k-1} - h_k q_k + \alpha_{ip} S_{ip} (T_{p_k} - T_k)$

Les Eqs (1), (3), (4), (6) et (7) peuvent former un système

$$A_d * \dot{X} = B_d$$

$$X^T = [\rho_1 \ T_1 \ x_1 \ T_{p_1} \ T_{a_1} \ \cdots \ \rho_N \ T_N \ x_N \ T_{p_N} \ T_{a_N}]$$

Calcul des débits

Zone monophasique $\dot{P}_m = c_k \dot{\rho}_k + d_k \dot{T}_k$, combiné avec (1) et (5)

$$\dot{P}_m = C_{1k} q_{k-1} + C_{2k} q_k + C_{3k}$$

Zone diphasique $\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial T_k} \dot{T}_k$, combiné avec (6) et (7)

$$\dot{P}_d = D_{1k} q_{k-1} + D_{2k} q_k + D_{3k}$$

Forme unifiée

(Eq 8)
$$\dot{P} = [v_k C_{1k} + (1 - v_k) D_{1k}] q_{k-1} + [v_k C_{2k} + (1 - v_k) D_{2k}] q_k + v_k C_{3k} + (1 - v_k) D_{3k}$$

où $v_k = 1$ si $k^{\text{ième}}$ est mono, $v_k = 0$ si diphasique

$\dot{P}_k = \dot{P}_{k+1}$ (uniformité de la pression) =>

$$[v_k C_{1k} + (1 - v_k) D_{1k}] q_{k-1} + [v_k C_{2k} + (1 - v_k) D_{2k}] q_k + v_k C_{3k} + (1 - v_k) D_{3k} = \\ [v_{k+1} C_{1_{k+1}} + (1 - v_{k+1}) D_{1_{k+1}}] q_k + [v_{k+1} C_{2_{k+1}} + (1 - v_{k+1}) D_{2_{k+1}}] q_{k+1} + v_{k+1} C_{3_{k+1}} + (1 - v_{k+1}) D_{3_{k+1}}$$

Cette équation peut être écrit :

$$[v_k C_{1k} + (1 - v_k) D_{1k}] q_{k-1} + [v_k C_{2k} + (1 - v_k) D_{2k} - v_{k+1} C_{1_{k+1}} - (1 - v_{k+1}) D_{1_{k+1}}] q_k \\ - [v_{k+1} C_{2_{k+1}} + (1 - v_{k+1}) D_{2_{k+1}}] q_{k+1} = v_{k+1} C_{3_{k+1}} + (1 - v_{k+1}) D_{3_{k+1}} - v_k C_{3k} - (1 - v_k) D_{3k}$$

Expression sous forme matricielle:

$$C_q * Q = D_q$$

avec

$$Q^T = [\begin{array}{cccc} q_1 & q_2 & \cdots & q_{N-1} \end{array}]$$

q_0 et q_N sont connus

Forme unifiée pour les 2 zones

$$A * \dot{X} = B$$

où $A = E \cdot A_m + (I - E) \cdot A_d$, $B = E \cdot B_m + (I - E) \cdot B_d$, avec E une matrice diagonale $5N \times 5N$ dont les valeurs diagonales sont binaires 0 ou 1 (1 si l'état du fluide frigorigène correspondant est monophasique, 0 s'il est diphasique), I est la matrice d'identité $5N \times 5N$.

N=3 (m, di, m)

Détection des transition de phase

1. diphasique-> monophasique

$x(t) \rightarrow 0$ (condensation) $x(t) \rightarrow 1$ (évaporation)

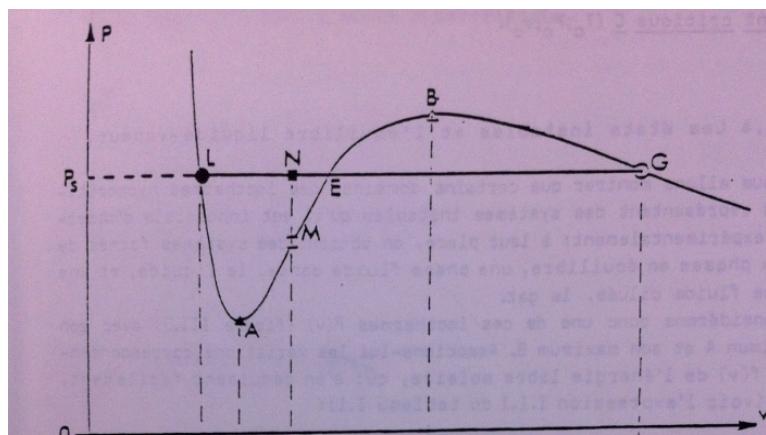
x : fraction massique de vapeur

2. monophasique -> diphasique

$\rho(t) > \rho_{vs}(T(t))$ (condensation)

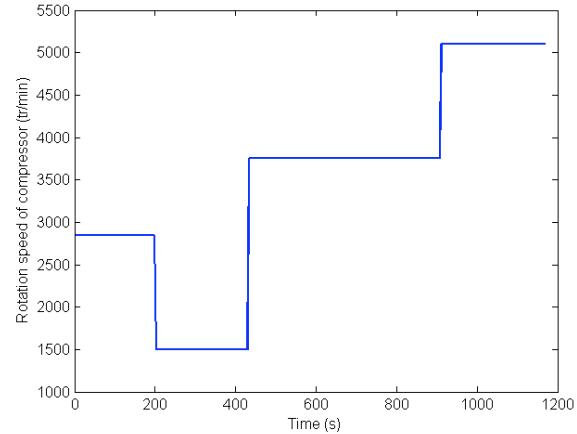
$\rho(t) < \rho_{ls}(T(t))$ (évaporation)

« Les systèmes à 2 phases L-G sont plus stables que les systèmes à une phase de même T et même v »

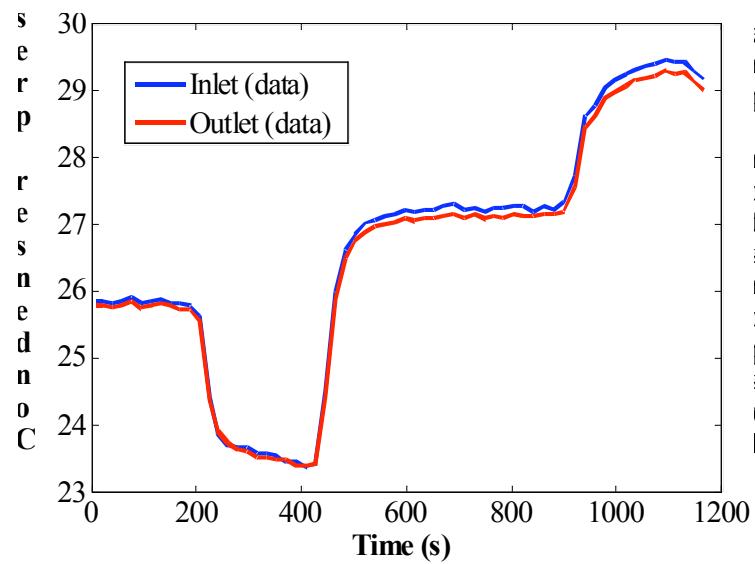


(A. PENELOUX, 1982)

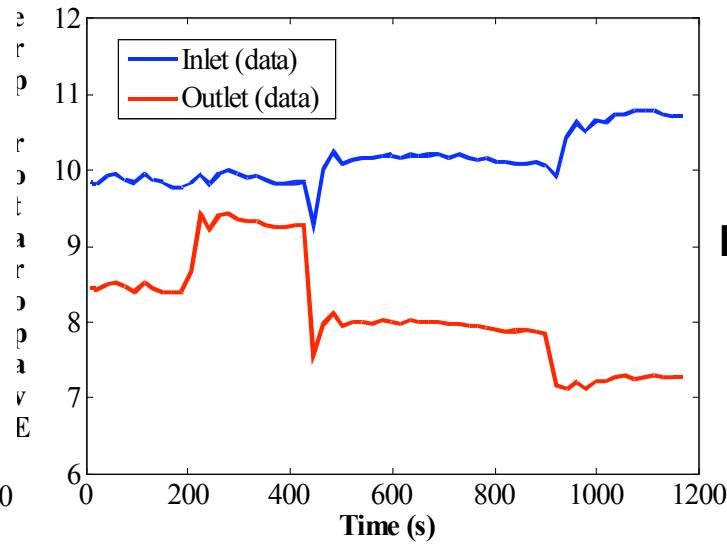
Données expérimentales recueillies par CIAT.



Vitesse de
rotation du
compresseur

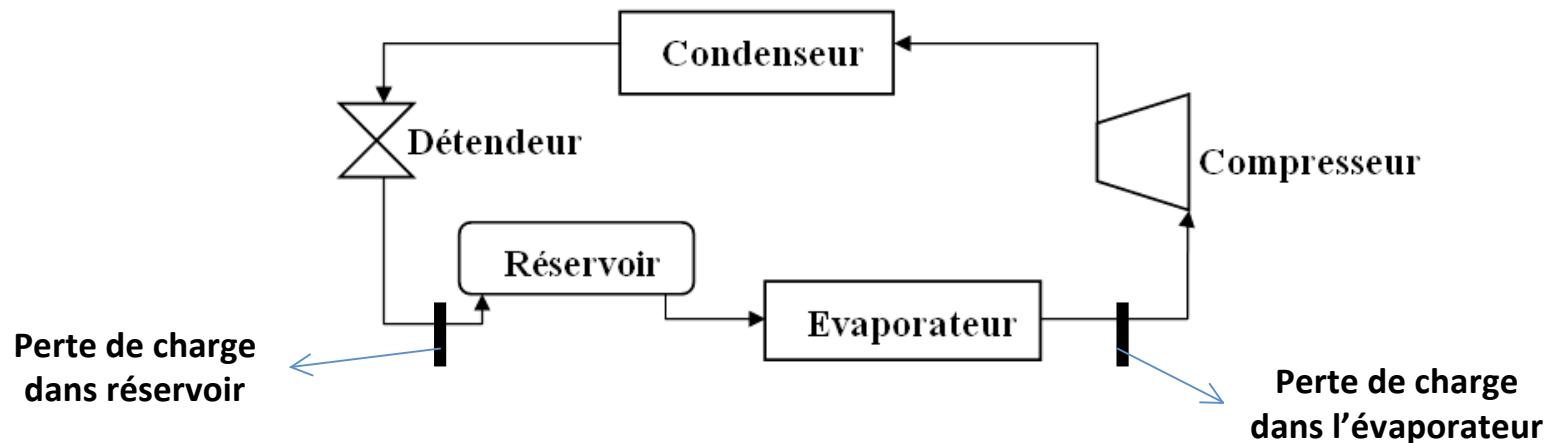


Pressions condenseur



Pertes de charge
significatives à
l'évaporateur

Version actuelle du modèle



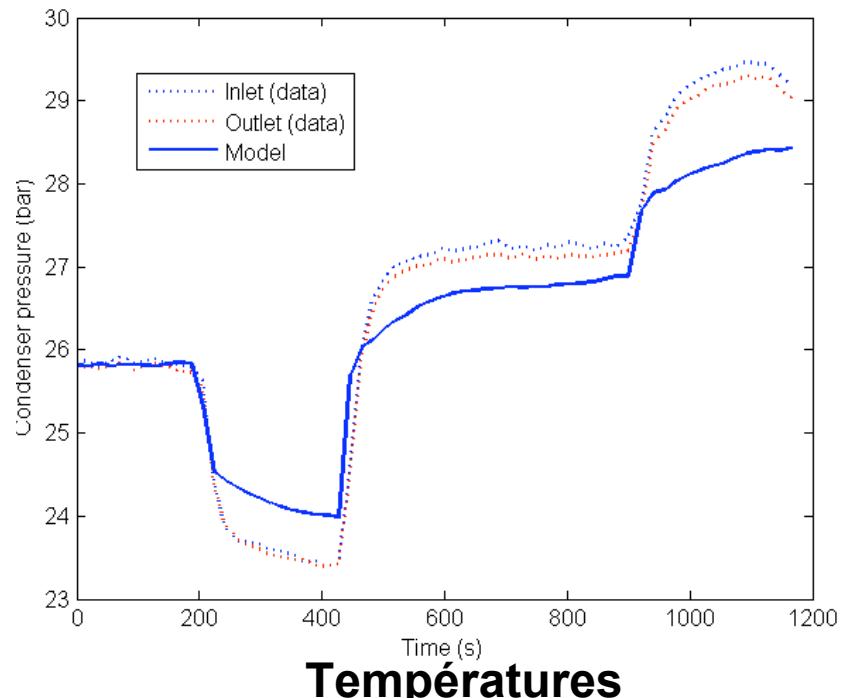
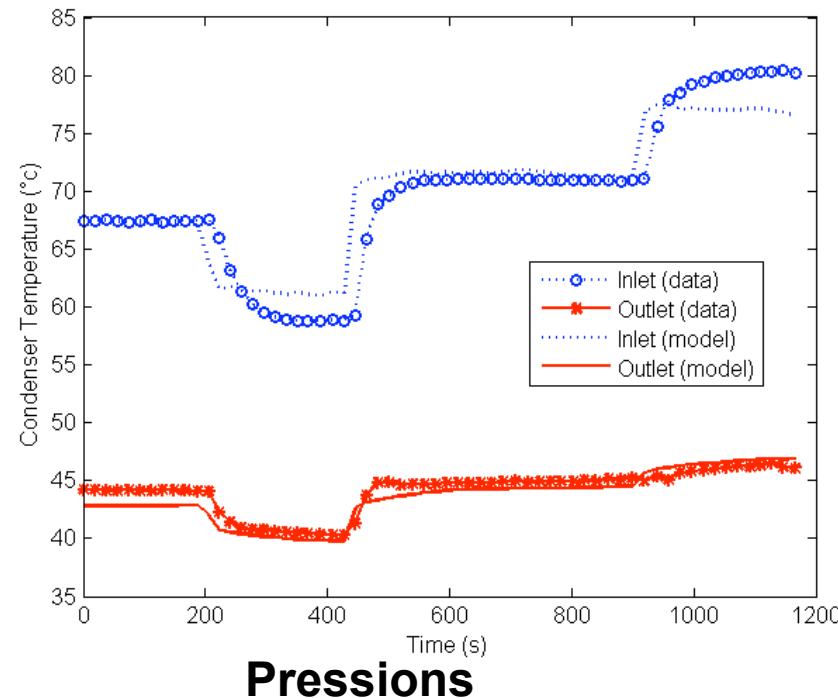
Pression uniforme dans le condenseur.

Pression uniforme dans l'ensemble réservoir-évaporateur.

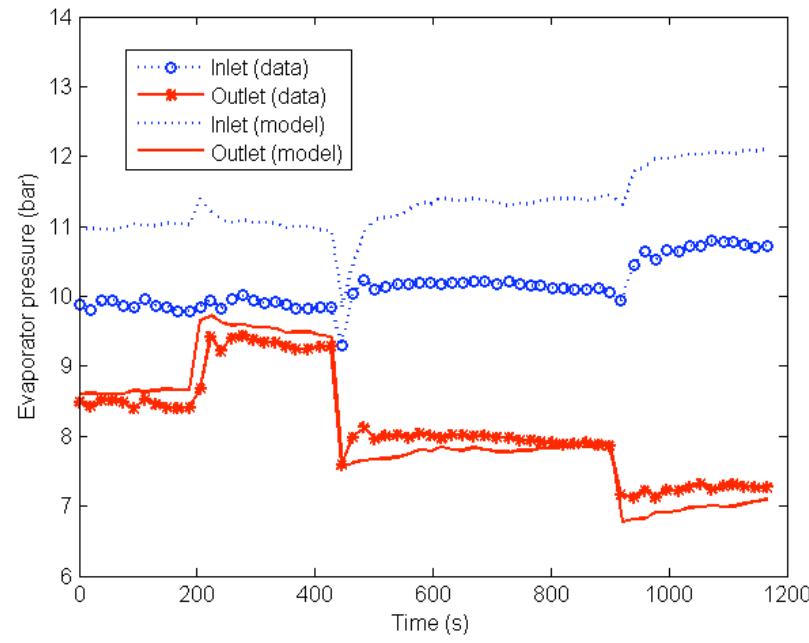
Pertes de charges représentées dans les flux d'interconnexion.

**Quelques résultats après ajustement de relations empiriques
 pour les pertes de charge et la caractéristique du détendeur.
 Caractéristiques du compresseur fournies par DANFOSS.**

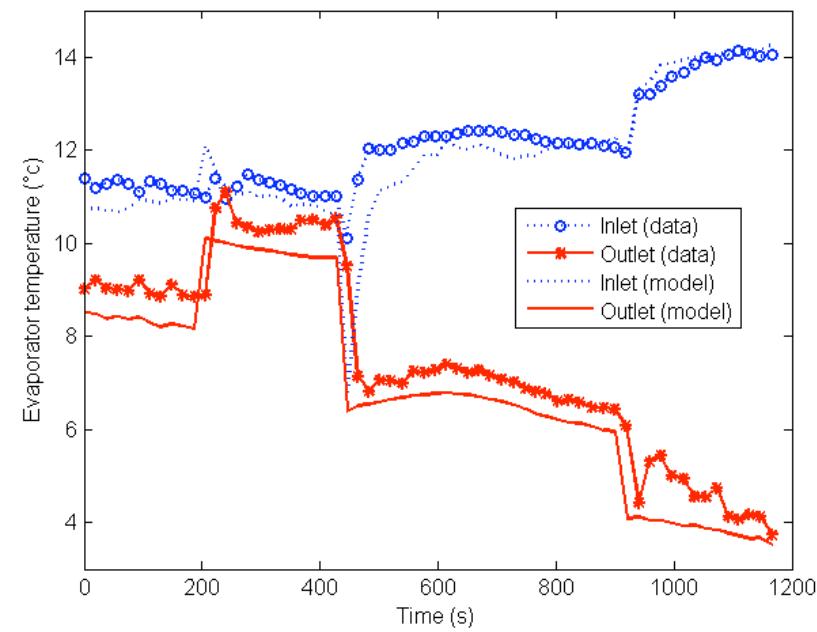
Condenseur



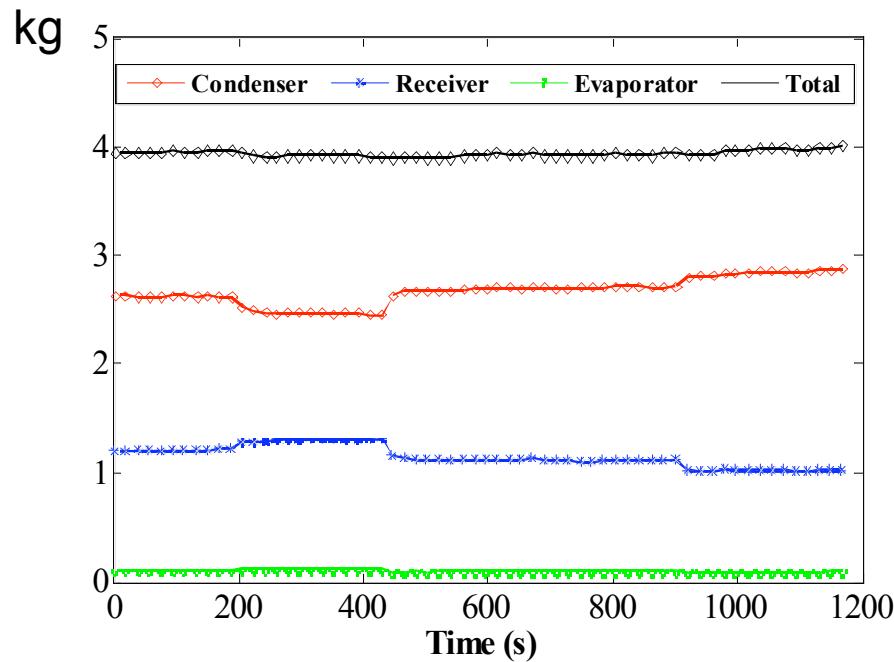
Évaporateur



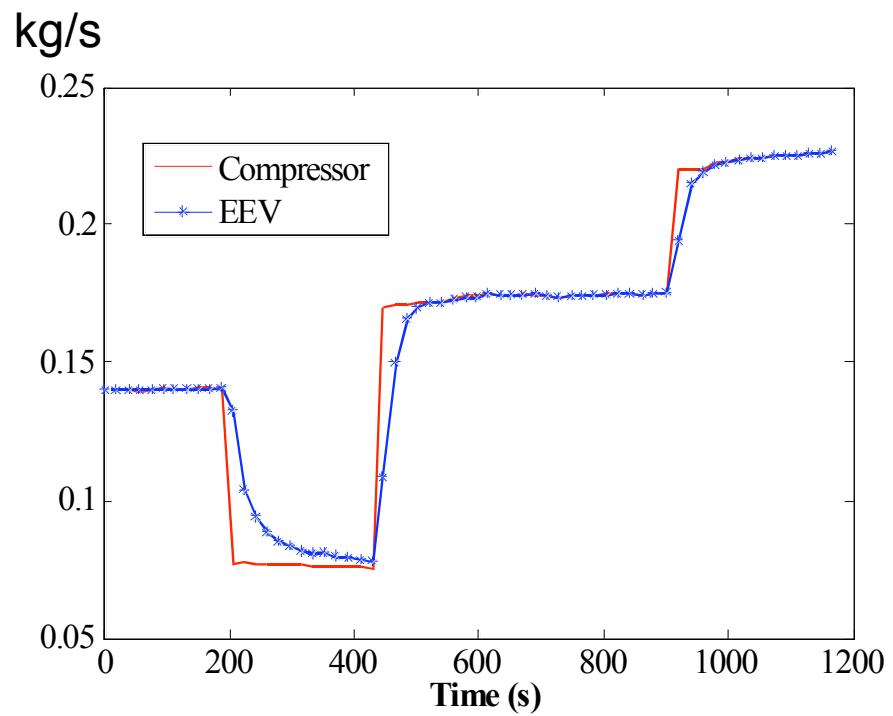
Pressions



Températures



**Conservation de la
masse**



**Débits de compresseur
et de détendeur**

Conclusion

**Approche très flexible programmée en MATLAB
(routine permettant de traiter les systèmes hybrides).**

Calculs thermodynamiques analytiques.