

MODELISATION BOND GRAPH D'UN ECHANGEUR THERMIQUE A PLAQUES

M.K. BEN GAYED, R. BEN HASSINE, B. BOUSSAID, M.N. ABDELKRIM

Unité de Recherche : Modélisation, Analyse et Commande des Systèmes
Rue Amor Ibn EL KATTAB, ZRIG 6029-Gabès (Tunisie)

mbengayed@yahoo.fr, rhabir@yahoo.fr,
boussaidboumedyen@yahoo.fr,
naceur.abdelkrim@enig.rnu.tn

Résumé - Dans ce papier, nous proposons la modélisation d'un échangeur thermique à plaques en utilisant l'outil Bond Graph. Après une présentation sur le concept du Bond Graph, nous détaillons l'étude de l'échangeur thermique eau/eau et nous présentons les modèles établis. Le modèle global a été simulé puis il a été comparé aux résultats expérimentaux. Il y a bien eu conformité entre la simulation et les résultats pratiques.

Mots-clés – bond graph, thermofluide, modélisation, couplage, échangeur thermique

I. INTRODUCTION

La complexité des processus industriels automatisés, influe sur leurs performances et par conséquent elle les rend de plus en plus sensibles aux défaillances. En effet, les procédés industriels sont caractérisés par l'interconnexion de plusieurs composants mettant en oeuvre des phénomènes de natures diverses.

L'exemple typique de ce type de processus, est celui de l'échangeur thermique eau/eau objet de notre étude. Ce processus de transfert de chaleur est un phénomène très intéressant à étudier.

Le système étant multi énergies, sa représentation nécessite un outil adéquat. C'est pourquoi, nous avons traité ce problème par l'utilisation de l'approche bond graph pour représenter les modèles reflétant fidèlement le comportement du processus physique multi énergie. Cette solution s'avère bien adaptée, grâce aux propriétés causales et comportementales de l'outil. On définit ainsi, d'une façon systématique les modèles structurels directement par analyse des phénomènes physiques sans écrire les équations. Le bond graph (graph à liens) est un langage graphique de modélisation, pour les systèmes pluridisciplinaires, basé sur la représentation des échanges d'énergie entre les phénomènes présents dans les systèmes. Cet outil peut être considéré comme un support de communication transversale grâce à son caractère graphique et à son langage unifié pour tous les domaines de la physique.

La modélisation des systèmes thermo fluides est une tâche difficile à cause du couplage des phénomènes hydraulique et thermique. L'outil bond graph [1, 2, 3] en tant qu'outil flexible et fédérateur est alors utilisé. Dans une démarche intégrée pour la modélisation, les propriétés causales et structurelles du bond graph permettent de vérifier la validité et la consistance des modèles dynamiques générés.

II. LES BOND GRAPHS

A. Les variables des bonds graphs [4]

Par convention, on représente toujours le lien ou « bond » dans le sens conventionnel de la propagation de la puissance.

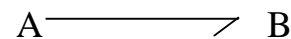


Fig. 1. Représentation de la puissance de A vers B.

Les variables généralisées de la modélisation par bond graph sont : L'effort « e » et le flux « f ». Leur produit exprime la puissance transmise par le lien :

$$p(t) = e(t) * f(t) \quad (1)$$

Les deux variables d'énergie se déduisent directement des variables de puissance par des intégrations temporelles simples :

- Moment généralisé : $p(t) = p(0) + \int_0^t (u) dt \quad (2)$

- Déplacement généralisé : $q(t) = q(0) + \int_0^t f(u) dt \quad (3)$

Le tableau 1 indique la signification de ces variables pour quelques domaines de la physique.

Domaine	Variables de puissance		Variables d'énergie	
	Effort « e »	Flux « f »	Moment « p »	Déplacement « q »
Mécanique translation.	Force, F	Vitesse, v	Impulsion, p	Elongation, x
Mécanique rotation.	Couple, τ	Vit. Angular, ω	Impulsion ang., η	Angle, θ
Electrique	Tension, u	Courant, i	Flux magnétique, Φ	Charge, q
Hydraulique	Pression, P	Débit vol. \dot{V}	Impulsion pression.	Volume, V
Thermique	Température, T	Flux d'entropie, \dot{S}	--	Entropie, S
Chimique	Potentiel chimique, μ	Flux Molaire	--	Masse molaire

Tab. 1. Significations des différentes variables

B. Eléments des bonds graphs

On peut classer les éléments du bond graph selon trois types :

- les éléments passifs : R, C, I.
- Les éléments actifs : les sources Se, Sf.
- les éléments de jonction : 0, 1, TF, GY.

C. Les classes thermofluides

Les procédés thermofluides font intervenir les deux phénomènes de convection et de conduction de la chaleur. Nous désignons par conduction tout transfert thermique entre le fluide et la paroi et par convection l'énergie thermique véhiculée par le transport du fluide. Ce dernier phénomène est caractérisé par le couplage de deux énergies (hydraulique et thermique); il sera donc modélisé par des bonds graphs couplés multi-énergies. Par contre les phénomènes de conduction seront représentés par des bonds graphs mono-énergie. Dans cette catégorie de systèmes physiques, pour modéliser par les bonds graphs le phénomène de convection thermique, il est plus pratique d'utiliser le flux d'enthalpie à la place du flux d'entropie [5], [6]. Les variables de puissance dans ce cas sont celles données par l'équation 4.

$$e = [e_h, e_t] = [P, T] \tag{4}$$

$$f = [f_h, f_t] = [\dot{m}, \dot{H}]$$

Avec: P (pression), T (température), \dot{m} (débit massique) et \dot{H} (flux d'enthalpie).

Dans un procédé thermo fluide, les énergies thermique et hydraulique sont couplées. Ce couplage est représenté, dans un modèle bond graph, par un lien multiple comportant un cercle comme le montre la figure 2(a) ou bien par deux liens

parallèles [7] comme l'illustre la figure 2(c). L'utilisation de lignes continues parallèles pour les liens hydrauliques et thermiques (généralement en pointillés), figure 2(b), a été aussi proposée pour distinguer le type d'énergie mise en jeu [8].

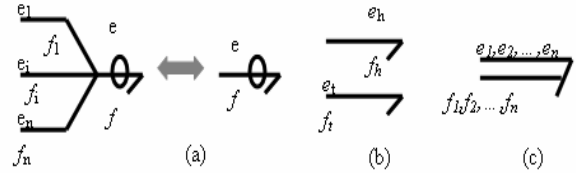


Fig. 2. Différentes représentations des liens bond graph multi énergies.

D. Les sources thermofluides

Les sources thermofluides sont des flux thermiques et hydrauliques véhiculés par la convection du fluide. Elles sont caractérisées par le couplage de l'énergie thermique et hydraulique représenté par l'équation 5 dans le cas d'un fluide saturé et par l'équation 6 si le fluide est sous-saturé. Ces sources peuvent être représentées par le modèle bond graph de la figure 3.

$$\dot{H} = \dot{m}.h \tag{5}$$

$$\dot{H} = \dot{m}.C_p.T \tag{6}$$

Avec: C_p (capacité thermique massique).

Cette représentation est intéressante du point de vue physique, mais elle est aussi intéressante pour l'analyse du système. En effet, l'actionneur physique est un flux massique $Sf_h : \dot{m}$, la source du flux d'enthalpie \dot{H} est considérée comme un actionneur fictif puisqu'elle est la conséquence du flux massique, équation 6. La source de température $Se_t : T$ peut être considérée comme un paramètre ou une variable externe (si elle est donnée par une source externe).

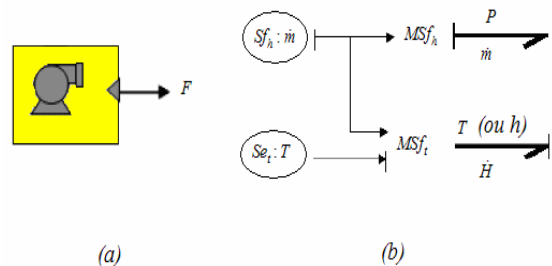


Fig. 3. (a) Modèle iconique (b) Modèle bond graph d'une source thermo-fluide.

Les sources d'énergie thermofluides et leurs modèles bonds graphs, sont ajoutées aux classes des procédés thermofluides. A noter que ces sources peuvent être modulées par un signal de commande externe F . Le modèle bond graph de la figure 3(b) peut être par exemple, associé à

une source de pression ou de débit massique fournie par une simple pompe qui n'est pas connectée à une conduite, ce qui permet de négliger la réaction du système en aval de la pompe.

Le modèle bond graph de la figure 4 représente la modélisation bond graph d'une source thermofluide. Sur cette figure, le couplage des deux phénomènes hydraulique et thermique (équation 5 et équation 6), est modélisé par l'élément de couplage thermofluide CETF (Coupling Élément for ThermoFluid [9]).

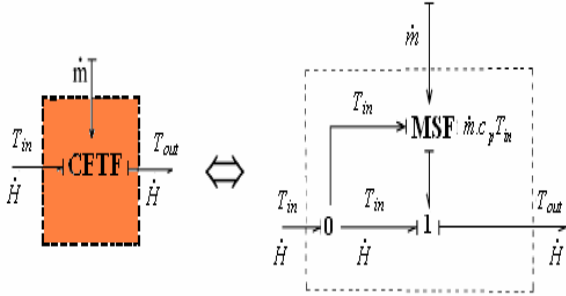


Fig. 4. L'élément CETF.

Dans ce modèle, le couplage de l'énergie thermique et hydraulique d'un fluide sous-saturé devient représenté par l'équation 7.

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot C_p \cdot T_{in} \quad (7)$$

Le flux d'enthalpie \dot{H} est modélisé par l'élément bond graph *MSF* (source de flux variable).

III. L'ÉCHANGEUR A PLAQUES EAU/EAU

A. Etude de l'échangeur

L'échangeur à plaque utilisé dans ce système thermo fluide est donné par la représentation iconique suivante (figure 5).

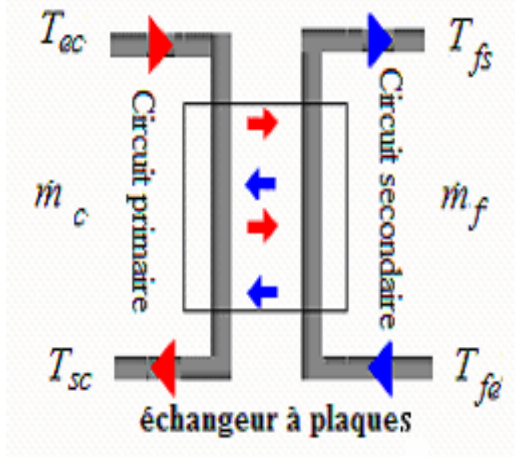


Fig. 5. Représentation iconique de l'échangeur.

La quantité de chaleur \dot{Q} mise en jeu dans l'échangeur est calculée à partir des expressions 8 et 9 suivantes :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot \Delta T_c = \dot{m}_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T_f \quad (8)$$

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (9)$$

Ou $\Delta T_c = (T_{ec} - T_{sc}); \Delta T_f = (T_{fs} - T_{fe})$ (10)

Et $\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{Ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}}$ (11)

Avec :

- A : surface d'échange.

- $T_{ec}, T_{cs}, T_{fe}, T_{fs}$: température chaude (entrée - sortie) et froide (entrée - sortie).

- \dot{m}_c, \dot{m}_f : débit massique de circuit primaire (chaude) et secondaire (froid).

- C_{p_c}, C_{p_f} : capacité thermique massique de circuit primaire et secondaire.

- ΔT_{ml} : est appelé moyenne logarithmique des différences de température.

- U : coefficient global d'échange.

- $\Delta T_e = T_{ec} - T_{fs}$: différence de température à l'entrée.

- $\Delta T_s = T_{sc} - T_{fe}$: différence de température à la sortie.

Le passage de la chaleur du fluide chaud au fluide froid met en jeu :

- un transfert par convection du fluide chaud à la paroi de la plaque métallique.
- Un écoulement de la chaleur par conduction à travers les plaques métalliques.
- Un transfert par convection de la plaque vers le fluide froid.

La plaque utilisée dans l'échangeur eau/eau [10] est représentée dans la figure 6.

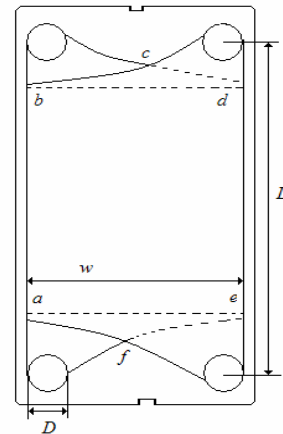


Fig. 6. Représentation d'une plaque de l'échangeur eau/eau.

Le coefficient global d'échange U [10], qui dépend généralement de la nature du milieu est exprimé par la relation 12 suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hc} + \frac{1}{hf} + R_c + R_f + \frac{e}{\lambda.S}} \quad (12)$$

Avec :

- h_c et h_f : coefficient de transfert de chaleur coté chaud et froid.
- e : épaisseur de plaque.
- R_c et R_f : résistance thermique coté chaud et froid.
- S : surfaces des plaques.
- λ : Conductivité thermique de la plaque.

Pour une plaque mince et de grande conductivité thermique, $R_c = R_f = 0$, par suite le coefficient global d'échange devient :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hc} + \frac{1}{hf} + \frac{e}{\lambda.S_m}} \quad (13)$$

Le coefficient de transfert de chaleur coté froid et chaud (h_c, h_f) est calculé en utilisant l'équation d'EAGLE-FERGUSON, l'équation 14, dans un environnement turbulent (R_e (nombre de Reynolds) > 10000).

$$h_{c,f} = 4200.[1.35 + 0.02t_{mf}] \cdot \frac{v_t^{0.8}}{d_i^{0.2}} \quad (14)$$

Avec :

- t_{mf} : température moyenne du fluide.
- v_t : vitesse du fluide.
- d_i : diamètre intérieur.

B. Modélisation bond graph de l'échangeur

Dans le circuit primaire de l'échangeur le transfert de chaleur par convection de l'eau est modélisée par la source de flux thermique modulée CETF en fonction de débit massique \dot{m} . De même dans le circuit secondaire, le transfert de chaleur par convection de l'eau est modélisé par la source du flux thermique modulée CETF en fonction du débit massique \dot{m} . Le modèle bond graph des deux circuits est donné par la figure 7.

Le passage de la chaleur du fluide chaud (circuit primaire) au fluide froid (circuit secondaire) met en jeu :

- Un transfert par convection du fluide chaud est représenté par l'élément R_{fm} (lien21) et du fluide froid est représenté par l'élément R_{fm} (lien20) à la paroi du tube.
- Un écoulement de la chaleur par conduction à travers le plaque métallique du l'échangeur est représentée par l'élément de stockage C_m (lien18, 19, 22 et 23).
- Un transfert par convection de la plaque métallique du l'échangeur vers le fluide froid est représenté

par l'élément R_{fm} (lien17) et vers le fluide chaud est représenté par l'élément R_{fm} (lien24).

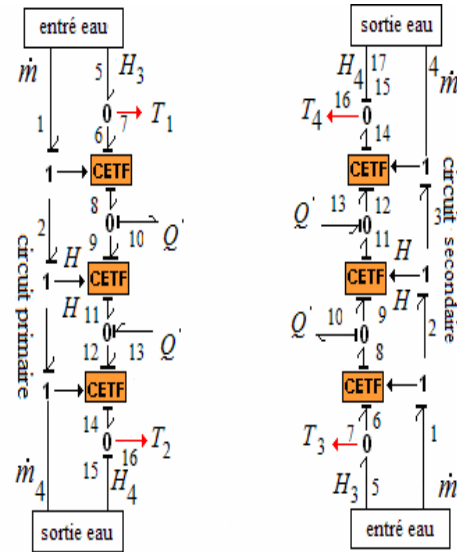


Fig. 7. Modèle bond graph de circuit primaire et secondaire de l'échangeur eau/eau.

La variation de température moyenne logarithmique de l'échangeur eau/eau est ajoutée au coefficient global d'échange.

Enfin, le modèle bond graph couplé (hydraulique et thermique) associé à l'échangeur à plaque eau/eau est donné par la figure 8.

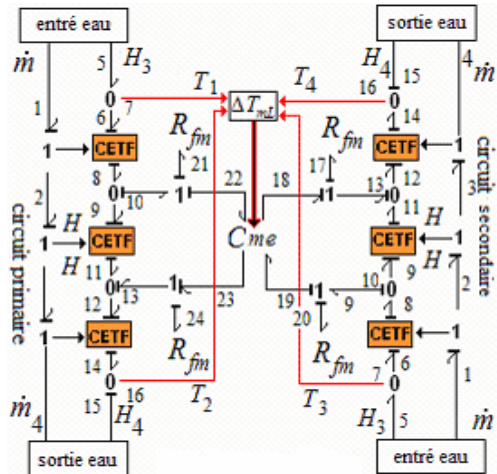


Fig. 8. : Modèle bond graph de l'échangeur à plaques eau/eau.

C. Résultats de simulation

La simulation de l'échangeur à plaques eau/eau a été réalisée en utilisant le logiciel 20-Sim. Ce dernier permet de résoudre des équations algèbro-différentielles, causalité de système et de gérer les différents modes de fonctionnement des systèmes.

La réponse de la température de l'échangeur du modèle (bond graph) en fonction du temps est donnée par la figure 9. Cette figure montre que la réponse de la température de la sortie de l'échangeur (T_2 (T_{sc}), T_4 (T_{fs})) en fonction de la température d'entrée (T_1 (T_{sc}), T_3 (T_{fs})) en gardant le débit constant. ($\dot{m}_c = Cte = 22(L/min)$ et $\dot{m}_f = Cte = 31(L/min)$). On constate que les simulations sont conformes aux résultats pratiques.

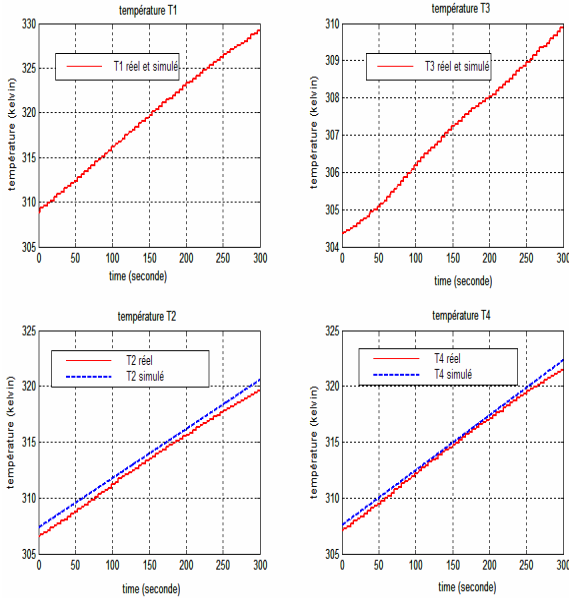


Fig.9. La réponse de la température de l'échangeur. La variation de la température moyenne logarithmique de l'échangeur en fonction du temps est donnée par la figure 10.

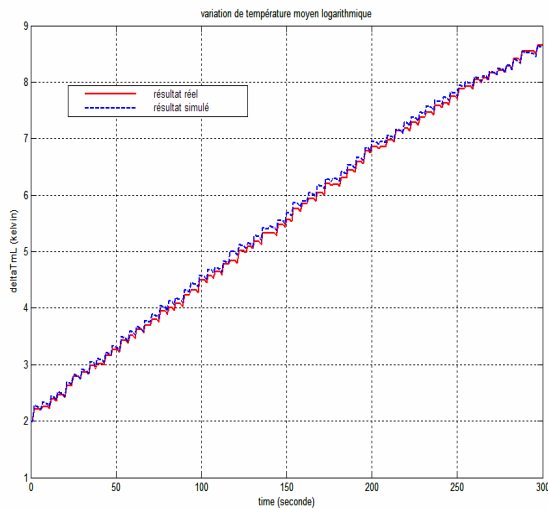


Fig.10. Réponse de la variation de la moyenne logarithmique de l'échangeur.

Les valeurs des paramètres utilisées dans la simulation sont données au tableau 2.

La figure 10 représente la variation du moyenne logarithme de la température (ΔT_{ml}) en fonction du temps. On remarque bien que ΔT_{ml} croît en fonction du temps ce qui est logique car lorsque la température d'entrée augmente

alors la puissance d'échange croît ainsi que ΔT_{ml} . Constatons que les résultats obtenus en pratique sont conformes aux résultats obtenus par simulation. Les valeurs des paramètres physiques et de simulation de l'échangeur sont données dans le Tableau 2

Echangeur thermique eau/eau			
C_p	Capacité thermique massique de l'eau	4178 à 40 °C	$Jkg^{-1}.K^{-1}$
λ	Conductivité thermique d'inox	16 à 20 °C	$Wm^{-1}.K^{-1}$
λ	Conductivité thermique d'eau	0.628 à 40 °C	$Wm^{-1}.K^{-1}$
A	Surface d'échange	1.836	m^2
U	Coefficient global d'échange	1796.144	$Wm^{-2}.°C$
h_c	Coefficient d'échange coté conduite (Circuit primaire)	3483.17	$W/m^2.°C$
h_f	Coefficient d'échange coté conduite (circuit secondaire)	4322.592	$W/m^2.°C$
$R_{fm} = \frac{1}{h_c.A}$	Résistance thermique cotée conduite (Circuit primaire)	$156.37 \cdot 10^{-6}$	$°C / W$
$R_{fm} = \frac{1}{h_f.A}$	Résistance thermique cotée conduite (Circuit secondaire)	$126 \cdot 10^{-6}$	$°C / W$
$C_{ne} = \frac{e}{\lambda.A}$	Capacité thermique	$274.38 \cdot 10^{-6}$	$°C / W$
\dot{m}_{cp}	Débit d'eau circuit primaire	22	L / min
\dot{m}_{cs}	Débit d'eau circuit secondaire	31	L / min

Tab 2. Valeurs des paramètres physiques et de simulation de l'échangeur eau/eau

IV. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article concernent la modélisation de l'échangeur eau/eau. Le procédé est caractérisé par le couplage de plusieurs énergies. Ainsi pour représenter les modèles de cet échangeur, nous avons fait appel à l'outil Bond Graph qui présente les avantages de la simplicité de la représentation du model et la systématisation des résultats.

Nous avons commencé notre travail par les composants standard constituant un système thermofluide. Cette approche nous a tout naturellement conduit à définir la structure du l'échangeur eau/eau comme étant un ensemble de sous systèmes composées par des éléments facilement représentable par Bond Graph.

Après une présentation descriptive de l'échangeur eau/eau, nous avons défini le modèle Bond Graph des éléments (résistifs, capacitifs, sources,..) constituant les systèmes hydrauliques et thermiques du procédé.

Enfin, nous avons procédé aux simulations de modèle qui comparé aux résultats expérimentaux ont été conformes.

REFERENCES

- [1] J.F. BROENINK. *Bond graph modelling in modelica*. European Simulation Symposium 1997, Passau Germany, Oct. 19-22
- [2] W. Borutzky, *The bond graph methodology and environments for continuous systems modelling and simulation*. Proc. European Simulation Multiconference, York, UK, June 1-3, 1992, pp. 15-21
- [3] B.O. Bouhamama. *Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés - approche bond graph*. Thèse à l'Université des sciences et technologies de Lille, 2002.
- [4] P.Borne, G.Dauphin-tanguy, J-P.Richard, F.Rotella, I.Zambettakis. *Modélisation et identification du processus tome 2*. Edition Technip, 1992.
- [5] D.C. Karnopp. *State variables and pseudo-bond graphs for compressible thermo-fluid systems*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 101(3):201—204, 1979.
- [6] D.C. Karnopp and S. Azerbaijani. *Pseudo bond graphs for generalised compartmental models in engineering and physiology*. Journal of the Franklin Institute, 312(2):95—108, 1981.
- [7] L.S. Bonderson. *Vector bond graphs applied to one-dimensional distributed systems*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pages 75—82, 1975.
- [8] D.C. Karnopp, D. Margolis, and R. Rosenberg. *Systems Dynamics: A Unified Approach*. John Wiley, New York, second edition, 1990.
- [9] B. Ould Bouamama, K. Medjaher, A.K. Samantaray, and M. Staroswiecki. *Supervision of an industrial steam generator. part i: Bond graph modelling*. Control Engineering Practice, 2005.
- [10] Kumar,H. *The Plate Heat Exchanger, Construction and Design*, Inst.Chem.Eng. Symp.Ser, 86 (1984), 1275–1282.