

La modélisation Bond Graph des phénomènes de commutation dans les procédés pétrochimiques

Boumedyen BOUSSAID, Charfeddine TAHRI, M. Koni BEN GAYED, M. Naceur ABDELKRIM

Unité de Recherche : Modélisation, Analyse et Commande des Systèmes
Rue Ibn Elkhatab, Zrig, 6033 – Gabès (Tunisie)

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

Résumé - Dans ce papier nous allons étudier deux phénomènes très souvent rencontrés dans les procédés industriels à savoir le phénomène du trop plein et celui de deux réservoirs en série.

Après un travail d'analogie avec les phénomènes électriques, nous avons proposé quelques solutions de modèles à base de l'outil bond graph, pour ces deux phénomènes. Les solutions proposées sont testées et validées par simulation sur le logiciel 20-sim.

Mots clés - bond graph, commutation, systèmes hybrides, trop plein, modèle, GPL.

I. INTRODUCTION

Très souvent seuls les commutations des actionneurs des procédés sont étudiés alors que les systèmes physiques eux mêmes peuvent être sujets à des commutations. Nous sommes donc intéressés dans le cadre de cet article de traiter la commutation dans certains équipements de l'installation d'une usine pétrochimique de production du Gaz et de Pétrole Liquéfié (GPL).

Plusieurs travaux récents traitent la modélisation des systèmes hybrides par les réseaux de pétri, le couplage réseaux de pétri-bond graph [1], modèles bond graph continu et discret séparés, qui constituent les principales approches de la littérature. Partant de l'objectif d'utiliser un seul outil de modélisation, le bond graph nous a permis de construire des composants bond graph modélisant les commutations dans le cas de notre système d'étude. Ces composants génériques peuvent être appliqués dans d'autres domaines.

II. PROBLEMATIQUES

Les processus industriels et surtout les procédés pétrochimiques sont caractérisés par leurs complexités. Dans notre cas de figure, on est chargé de rechercher des solutions à deux problèmes rencontrés dans le système qui sont le phénomène de trop plein ou encore nommé le sur plein et le phénomène de deux réservoirs en série.

A. Le phénomène de trop plein

C'est le débordement du liquide de la tête d'un réservoir lorsqu'il dépasse sa capacité maximale comme le représente la Fig. 1.

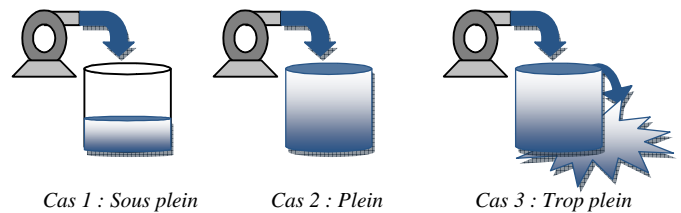


Fig. 1. Phénomène de trop plein

Ce phénomène est rencontré dans le rebouilleur sous forme de cloison et au niveau des plateaux de la colonne comme représenté sur la figure 2.

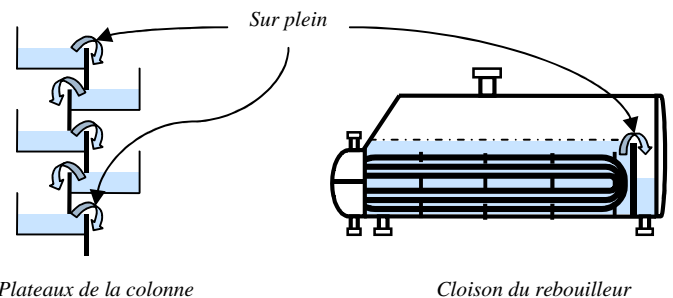


Fig. 2. Trop plein rencontré dans l'installation

Le processus présente trois états de fonctionnement :

- Remplissage du réservoir si le niveau du fluide est inférieur au niveau maximal,
- Passage vers le réservoir suivant si le niveau du fluide est supérieur au niveau maximal,
- Etat plein avec ni remplissage ni passage du fluide.

Le tableau 1 récapitule ces trois états de fonctionnement.

	$Niv < N_{max}$	$Niv > N_{max}$	$Niv = N_{max}$
Remplissage	oui	non	non
Passage	non	oui	non
Etat plein	non	non	oui

Tab. 1. Les trois états de fonctionnement

Pour étudier ce phénomène de trop plein, nous considérons le système de la figure 3 qui représente la partie supérieure des plateaux avec le fond de la colonne de fractionnement de l'usine GPL. Il s'agit d'un procédé composé d'une source de liquide constante transmise par une pompe et d'un ensemble d'étages de plateaux C_i . Le liquide passe vers le fond de la colonne C avant d'être déchargé par la vanne Rv.

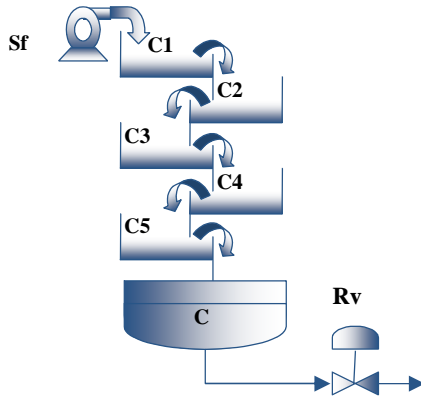


Fig. 3. Système d'étude (colonne à plateaux)

B. Le phénomène de deux réservoirs en série

Dans ce cas (figure 4), le flux du trop plein ne va pas chuter, mais il alimente un autre réservoir. La commutation réside dans la discontinuité des débits traversant la surface séparant les deux réservoirs.

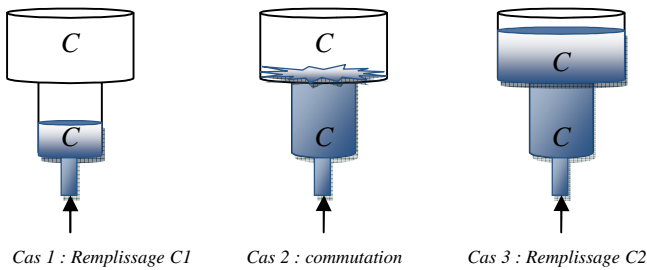


Fig. 4. Commutation de deux réservoirs en série

Le processus présente deux états de fonctionnement :

- Remplissage du réservoir C1 si son niveau est inférieur à son niveau maximal,
- Remplissage du réservoir C2 si le niveau dans C1 dépasse le niveau maximal,

Ce phénomène est rencontré dans notre installation d'étude au niveau de la canalisation can1 qui relie le fond de la colonne du dépropaniseur et le rebouilleur comme le montre la figure 5.

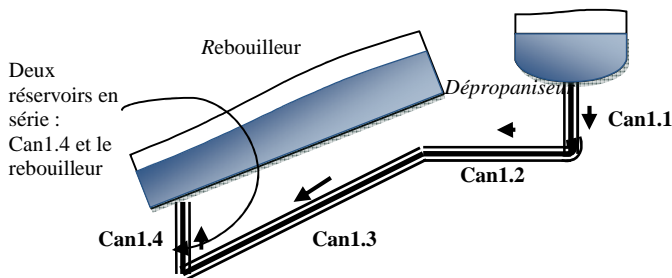


Fig. 5. Représentation de la canalisation Can1

III. RECHERCHE DE SOLUTION

Dans la littérature, il existe plusieurs approches pour la modélisation des commutations bien connues par les systèmes hybrides. Dans notre cas, la commutation présente dans le système lui-même (commutation physique).

A. Approches de modélisation des systèmes hybrides

Il existe trois classes d'approches de modélisation pour les systèmes hybrides [1]:

- Les approches par extension des méthodes continues, qui se reposent sur l'utilisation des équations différentielles en incluant le temps discret et des variables de saut pour étendre les résultats aux systèmes de commutation. Ces approches concernent les systèmes où la dynamique est complexe [2].
- Les approches par extension des méthodes discrètes, qui concernent les systèmes ayant une dynamique discrète complexe, décrite par des automates finis ou des réseaux de pétri [3].
- Les approches mixtes, qui combinent les deux concepts : systèmes continus décrits par des équations différentielles (linéaires ou non linéaires) et les systèmes à évènement discret par des automates finis et des réseaux de pétri [4].

Dans notre cas, nous nous intéressons à la famille des systèmes à commutation « switching systems » où la commutation est causée par des effets internes avec un modèle unique en utilisant un seul outil de modélisation, le bond graph.

B. La modélisation Bond Graph des systèmes à commutation « switching system »

Il existe plusieurs techniques permettant la modélisation des « switching systems » par l'outil bond graph [1].

B.1 Lien de commutation

Un lien de commutation est composé de deux éléments : le flux des données et le contrôle de flux représentés respectivement par bond graph et par un « control box » qui contient l'ensemble des conditions logiques de commutation en forme d'un automate d'état fini [5]. Ce lien permet la représentation globale du système (continu et discontinu), mais il peut causer la suspension des jonctions, ainsi que des problèmes de causalité.

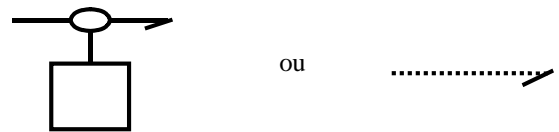


Fig. 6. Représentation d'un lien de commutation

L'application de cette représentation dans notre cas (trop plein) n'est plus possible à cause de l'isolation complète des plateaux en terme de potentiel. En autre terme, la chute du liquide d'un plateau à un autre ne figure pas dans le modèle.

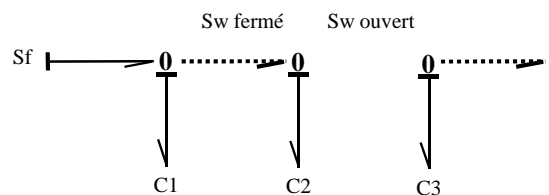


Fig. 7. Non validité de l'utilisation du lien de commutation

Dans cette solution, lorsque le réservoir C_1 devient plein, le switch passe à l'état fermé et on continue à charger C_1 et C_2 en parallèle à travers la jonction « 0 », qui n'est pas le cas dans notre application. En effet, dans notre cas, la commutation est conditionnée par le niveau du liquide dans le réservoir C_1 , et lorsqu'elle aura lieu, tout le liquide passe vers C_2 .

B.2 Le Switch

Le switch, introduit par *Strömberg, Top et Söderman* [7] [6] pour remédier aux limites des liens de commutation, se base sur le forçage à « 0 effort » ou « 0 flux » sur une jonction pour la mettre à ON ou à OFF. De ce fait, la puissance effort*flux est toujours nulle, ce qui est contradictoire avec les principes du bond graph puisque les composants bond graph sont des éléments énergétiques. Comme celui du lien de commutation, un switch n'assure pas la modélisation de notre système. En réalité, l'élément de transition entre C_1 et C_2 ne peut pas être une simple jonction.

B.3 Jonction contrôlée

C'est une association des deux premiers composants. Elle était proposée par *Mosterman et Biswas* [8]. Elle combine le temps continu et le temps discret. Cette approche se base sur le contrôle des jonctions qui captent la discontinuité des changements des variables [1]. Elle présente plusieurs inconvénients qui résident au niveau causalité en mode OFF, implémentation et cohérence avec la représentation bond graph.

B.4 Transformateur modulé avec un élément résistif

Cette approche consiste à l'association d'un élément résistif de faible valeur (l'état passant) et un élément de commutation (logique) sous forme d'une variable m booléenne modulant un transformateur [9].

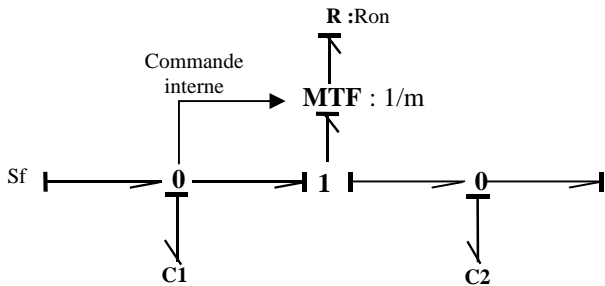


Fig. 8. Transformateur modulé avec un élément résistif

L'application de cette approche dans notre cas n'a pas donné de résultat vu que le lien entre les deux réservoirs C_1 et C_2 n'est pas une conduite, mais c'est une chute libre. De ce fait, il n'y a plus de différence de pression entre eux. Malgré ses avantages du point de vue causalité, représentation du système physique et prise en compte des pertes de puissance, cette approche ne permet pas de modéliser notre système.

B.5 Modélisation par réseaux de pétri et bond graph

Cette représentation graphique combine deux outils différents : le bond graph pour la modélisation du temps continu et les réseaux de pétri pour la manipulation des états de transition afin de décrire le comportement dynamique du processus. C'est la modélisation avec commande externe.

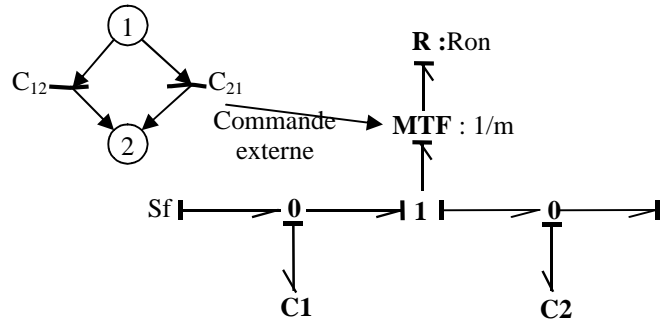


Fig. 9. Modélisation mixte

Le fonctionnement de ce système comporte deux états :

- Etat 1 où le réservoir C_1 est sous plein (physiquement déconnecté de C_2)
- Etat 2 où C_1 est sur plein (transmission du liquide vers C_2 connecté).

C_{12} : transition t_{12} ($P_1 \leq P$ seuil)

C_{21} : transition t_{21} ($P_1 > P$ seuil)

Notre objectif d'utiliser un seul outil, le bond graph, nous amène à rejeter cette solution.

IV. SOLUTIONS PROPOSEES

Notre démarche de modélisation se repose essentiellement sur la recherche d'une analogie avec l'électrique.

A. Analogie électrique/hydraulique

Dans la suite, nous donnons une série de représentations proposées.

A.1 Première représentation (approche par diode de commutation)

Par analogie avec l'électrique, un réservoir C_i ayant un niveau maximal est équivalent à un condensateur C_i chargé d'une tension entre ses armatures. Cette tension est limitée par la tension d'amorçage autonome de la diode D_{i2} . La diode D_{i1} bloque le passage du courant vers l'autre étage. Lors du passage de la diode D_{i2} , tout le courant passe vers l'étage $i+1$ et la tension aux bornes du condensateur C_i reste fixe.

La représentation de la figure 10 a pour avantage la modélisation de la commutation, mais le lien entre les deux réservoirs est équivalent à une source de flux qui n'est pas le cas dans notre application.

De ce fait, il est judicieux d'ajouter un élément qui transforme le courant sans intervention de la tension dans la représentation.

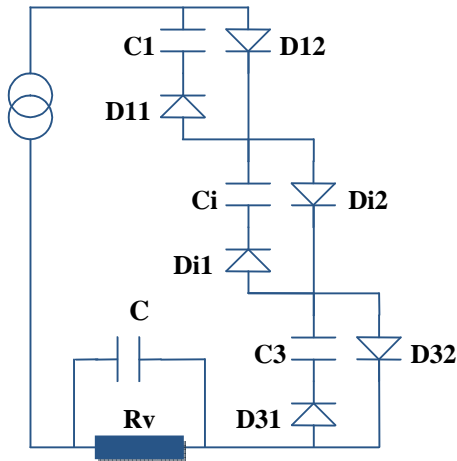


Fig. 10. Première analogie hydraulique/électrique du trop plein

A.2 Deuxième représentation (approche par diode et transformateur)

Dans ce cas, nous avons introduit des transformateur de courant afin d'isoler les étages en terme de potentiel. On arrive donc à modéliser la chute libre du liquide d'un étage à un autre où seul le flux intervient.

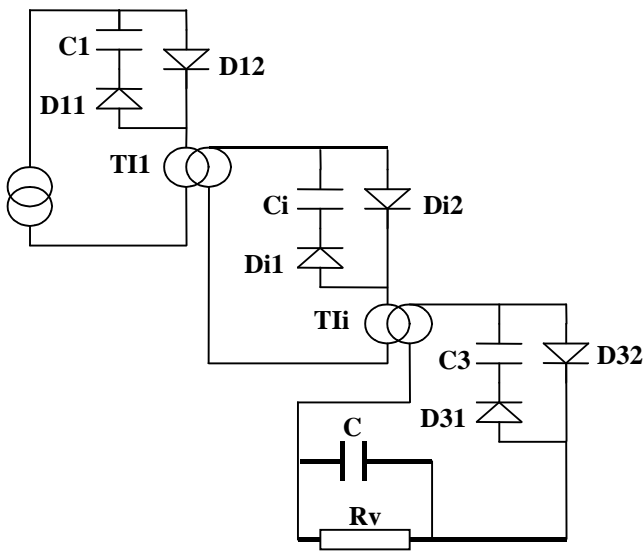


Fig. 11. Deuxième analogie hydraulique/électrique

Cette deuxième représentation montre bien que le condensateur C_i est limité par le potentiel d'amorçage de la diode D_{i2} (réservoir sur plein). Le courant traversant la diode D_{i2} passe à travers le transformateur du courant TI_i en construisant un générateur de courant qui alimente le condensateur C_{i+1} .

B. Modèle bond graph proposé du système (sur plein)

Notre démarche passe par plusieurs représentations bond graph pour aboutir à construire le modèle qui satisfait l'objectif recherché.

B.1 Première proposition (approche par diode de commutation)

Pour modéliser la diode D_{12} , nous avons proposé un élément D . Il se base sur un élément résistif modulé selon deux états de fonctionnement synthétisé par des instructions de test d'état du signal d'effort provenant de la jonction « 0 » comme celle d'une diode réelle.

Si l'effort au niveau condensateur C_1 est inférieur au seuil d'amorçage de la diode, la résistance est très grande pour annuler le flux qui la traverse. Dans l'autre état, la résistance assurera le transfert de tout le flux de la source.

Pour des raisons de simulation, nous avons introduit l'élément D_{13} comme commutateur du passage du flux vers le condensateur C_1 . Il a le même principe que celui de C_{11} , mais il fonctionne en inverse.

En premier lieu, nous montrons les résultats de test de l'approche sur un seul plateau. Dans ce cas, nous remarquons que les temps de ON/OFF des commutations sont conformes avec les performances souhaitées.

En second lieu, nous donnons le modèle complet du processus d'étude (plateaux de la colonne) sur trois plateaux.

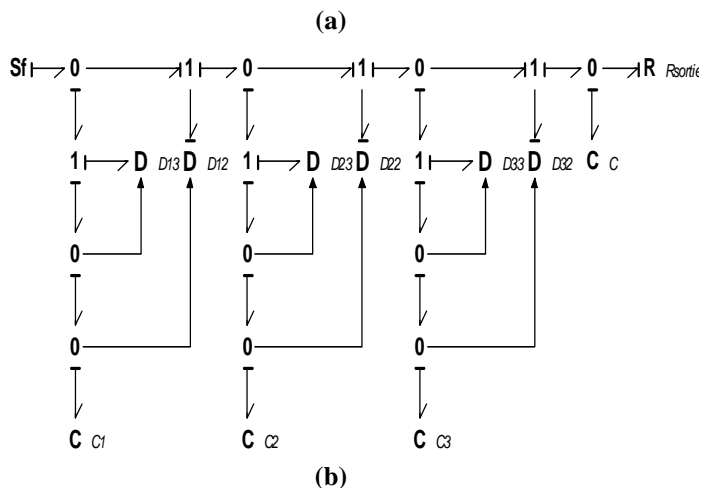
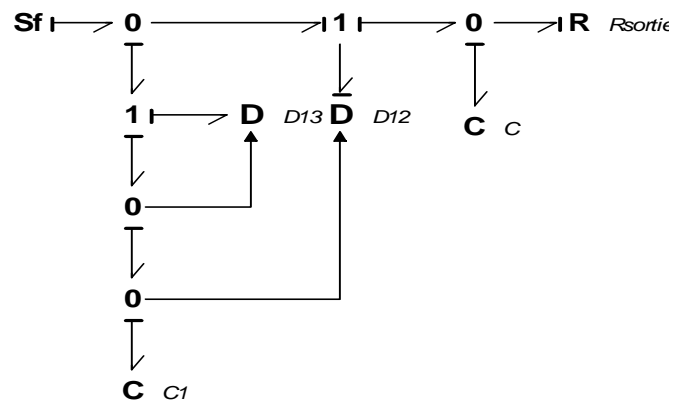


Fig. 12. Modèle BG (première approche)
(a) un seul plateau, (b) trois plateaux

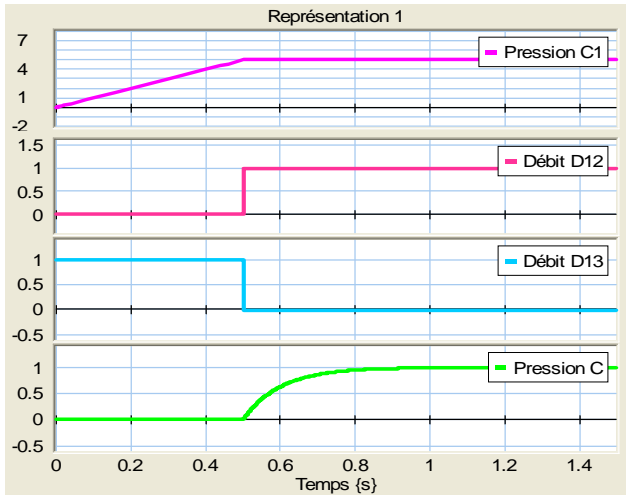


Fig. 13. Courbes de simulation d'un seul plateau

Les courbes de simulations sur la figure -- montrent bien les commutations en temps de chargement des réservoirs et de passage du liquide. De même pour les commutations des flux qui s'aperçoivent au points temporels (0,5s – 1s – 1,5s) sur la figure -- valide bien notre modèle. L'approche par diode de commutation modélise bien les réservoirs à seuil (la base supérieur est fermé), les soupapes (état d'ouverture pour une différence de pression assurant l'amorçage).

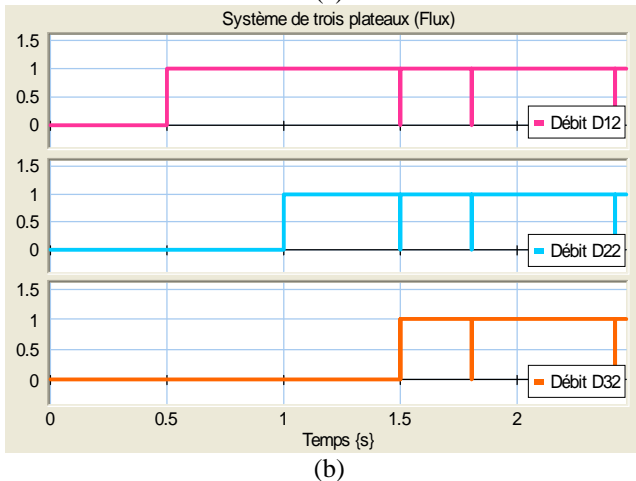
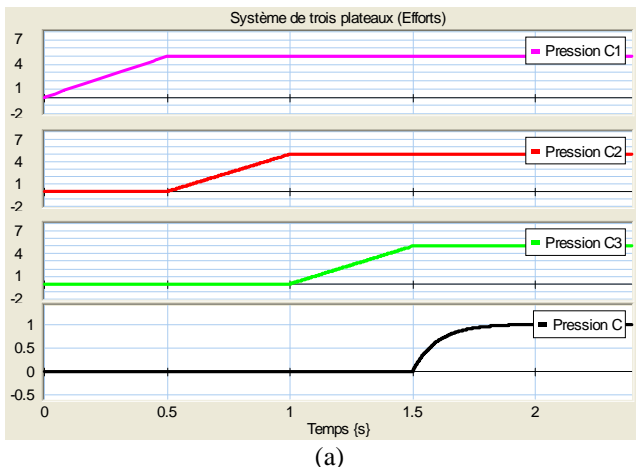


Fig. 14. Courbes de simulation de trois plateaux
(a) efforts ou pressions (b) flux ou débits

Nous remarquons sur les courbes de la figure 14, des chutes des flux vers zéro ensuite un retour vers la valeur initiale pendant un temps très faible. Ce phénomène n'existe pas dans le fonctionnement réel du système. Mais c'est l'égalité des pressions entre deux réservoirs successifs où le flux transmis de l'un vers l'autre s'annule pendant le temps de commutation du système. De plus, les pertes de charges dans les éléments D ne figurent pas dans le comportement réel du processus. Ces inconvénients nous a permis de juger l'intérêt d'une isolation complète des réservoirs, de façon à ce que les pressions des réservoirs n'aient aucune influence sur le comportement du système. D'où le passage vers une deuxième proposition.

B.2 Deuxième proposition (approche par diode et transformateur)

Dans cette partie, nous nous sommes inspiré de l'approche de modélisation par un transformateur modulé avec résistance faible, pour construire notre propre approche de modélisation du phénomène de trop plein. Le transformateur modulé MTF utilisé dans notre approche est un transformateur de flux (transformateur de courant en électrique) où l'effort (la tension) est négligeable. Il nous permet de construire le générateur de flux (courant) au niveau du lien de sortie du MTF . Sa modulation est assurée par le signal provenant de la jonction « 0 » du condensateur (réservoir). Pour un dépassement du seuil, le MTF bascule vers un état de transmission du flux. La pression dans le réservoir se fixe à sa valeur de seuil.

Étape 1 : Dans cette étape nous avons justifié la position du condensateur C_i dans le modèle. Le condensateur est monté en série vu que le flux provenant de la source traverse le réservoir avant de sortir vers l'autre réservoir. D'où le condensateur est monté sur une jonction « 1 » comme le montre la figure 15.

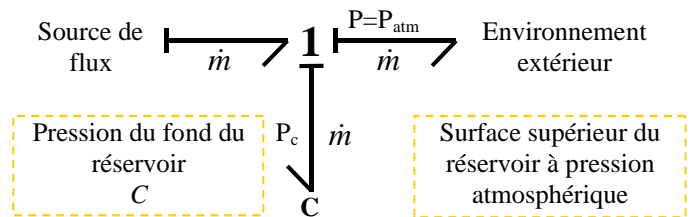


Fig. 15. Représentation du montage du réservoir C

La source de flux impose un flux constant qui traverse le condensateur. Dans le départ, le condensateur se charge jusqu'à avoir une pression au fond P_c supérieur à un seuil où elle reste fixe et le flux entrant sort en totalité vers l'environnement extérieur.

Étape 2 : Après le placement du condensateur, nous avons étudié la commutation. Nous avons introduit le transformateur modulé MTF en fonctionnement d'un transformateur de flux.

Il permet le passage du flux en imposant un effet nul au lien d'entrée. Il a deux états de marche/arrêt selon le signal mesurant la pression dans le fond du condensateur comparée à un seuil. Le modèle présenté dans la figure 16 constitue

notre nouvelle approche pour la modélisation du phénomène de sur plein. Dans ce qui suit, nous présentons les simulations de test du composant construit

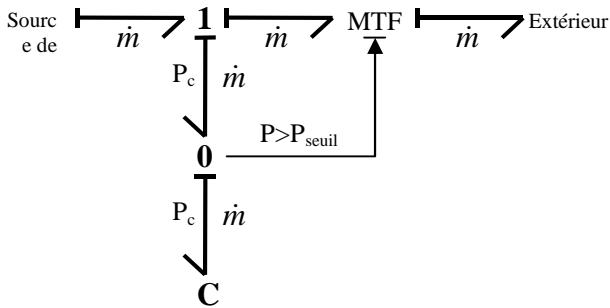


Fig. 16. Représentation du modèle de commutation

Etape 3 : Dans cette étape nous avons créé un seul composant qu'on l'a nommé RH (Relais Hydraulique) qui représente le modèle éclaté obtenu dans l'étape 2.

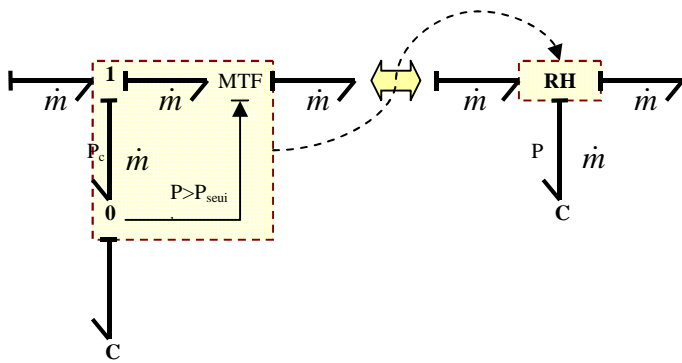


Fig. 17. Représentation du Relais hydraulique RH

Le composant RH à trois ports : une entrée et deux sorties vers le condensateur et l'extérieur.

Test d'un seul plateau : pour valider le modèle établi, nous procédons aux tests sur un seul réservoir de commutation (figure 18) et sa simulation (figure 19).

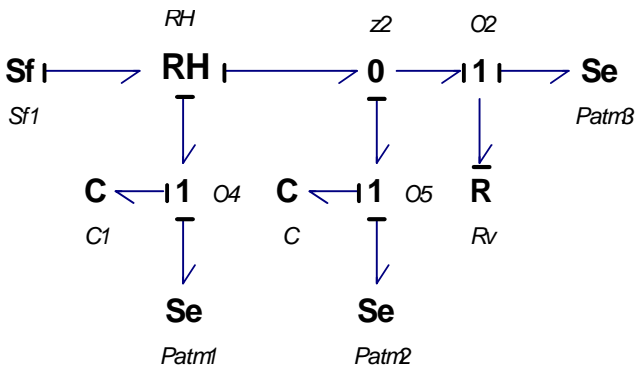


Fig. 18. Modèle d'un seul plateau avec fond et vanne par RH

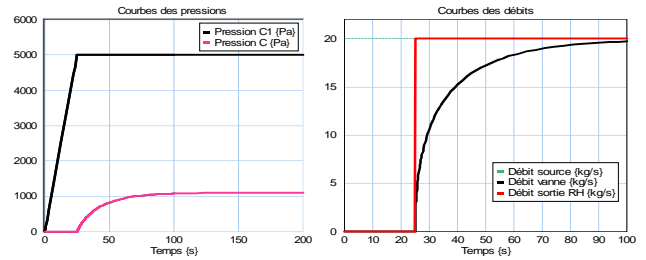


Fig. 19. Courbes de simulation du modèle d'un plateau par RH

Nous constatons sur les courbes de simulation la commutation du flux à travers le relais hydraulique RH. Pour une validation complète du modèle, nous sommes sensés appliquer l'approche sur un nombre important de plateaux afin de viser l'élimination des problèmes rencontrés au paravent.

Test de trois plateaux : Le modèle des trois plateaux de la figure suivante est caractérisé par la réduction du nombre de composants ainsi que sa causalité.

L'observation des courbes de simulation du modèle de trois plateaux montre que notre modèle représente bien le comportement réel de notre système. Nous remarquons que le problème rencontré dans la première approche n'apparaît pas.

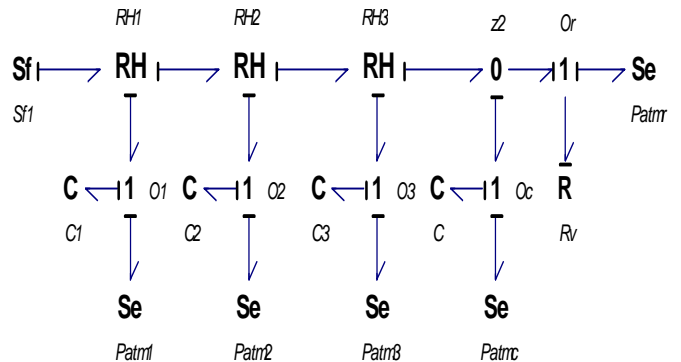


Fig. 20. Modèle de trois plateaux avec fond et vanne par RH

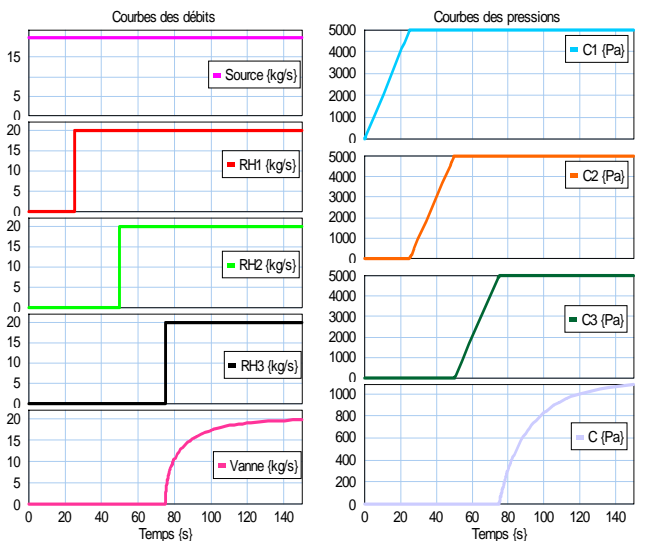


Fig. 21. Courbes de simulation du modèle de trois plateaux par RH

De ce fait, nous sommes abouti à construire un composant qui assure la modélisation des commutations dans un phénomène de trop plein. Notre approche, est validée en simulation, mais elle cause quelques problèmes de causalité. D'où nous avons proposé une troisième approche qui sera représenté dans la partie suivante.

B.3 Troisième proposition (approche par MTCP)

Dans cette partie, nous allons introduire un élément résistif et une source de flux modulée *MSf* pour permettre une isolation complète des deux réservoirs consécutifs. Sur ce principe, nous avons construit notre troisième approche que nous avons nommé *MCTP* (Modèle de Commutation du Trop Plein).

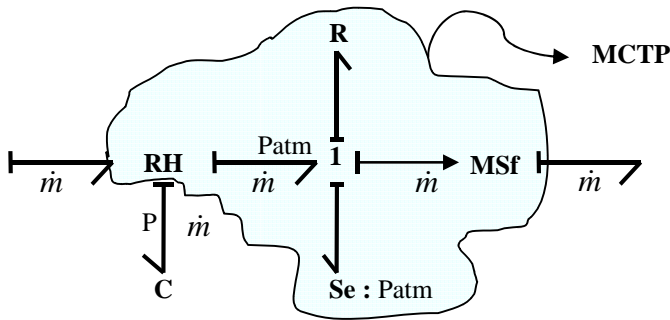


Fig. 22. Représentation du modèle trop plein MCTP

la figure 23 présente le composant final construit *MCTP*. Ce dernier doit être paramétré en fonction de la pression seuil *Pseuil* et des caractéristiques du réservoir *C*.

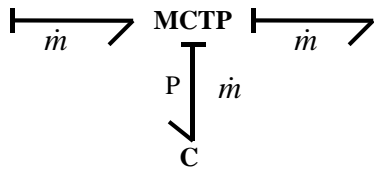


Fig. 23. Représentation du composant MCTP

Nous avons effectué le même test du composant *RH* pour le *MCTP* sur le processus d'étude (plateaux avec fond de la colonne). Les résultats du test sont présentés sur la Fig. 24: celles de gauche représentent l'évolution des débits, et celles de droite l'évolution des pressions en différents points de mesures.

Cas d'un seul plateau : appliquons le composant *MCTP* pour la modélisation du système plateau et fond de la colonne avec vanne de décharge.

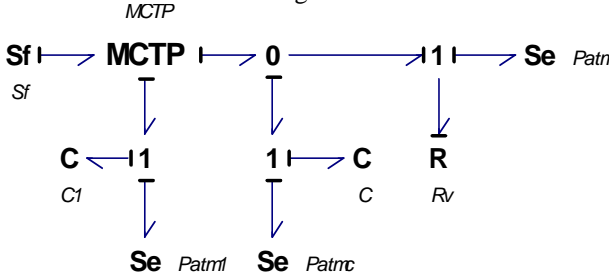


Fig. 24. Modèle d'un seul plateau et fond de colonne

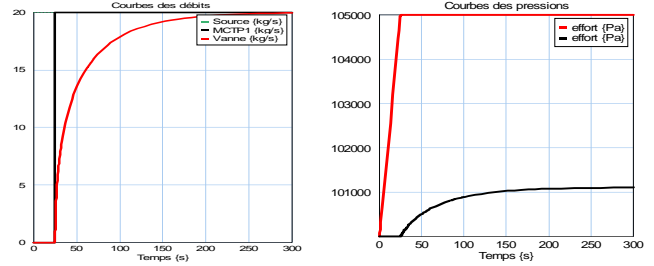


Fig. 25. Courbes de simulation du modèle d'un plateau et fond de colonne

Cas de trois plateaux : Nous appliquons notre approche sur le système de trois plateaux avec fond de la colonne.

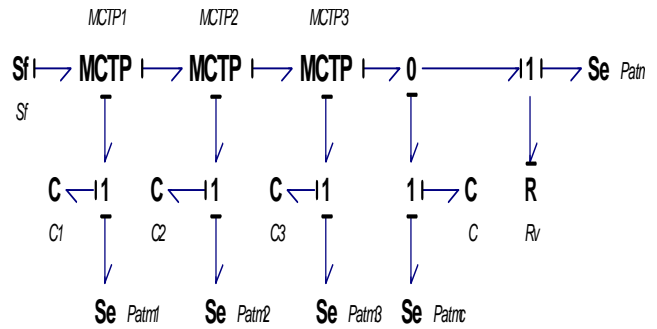


Fig. 26. Modèle de trois plateaux et fond de colonne

Les courbes de simulation de la figure 27 montrent bien le phénomène de commutation entre les plateaux. Les courbes d'évolution reproduisent remarquablement bien la dynamique du processus de point de vue physique. Les différentes commutations s'aperçoivent nettement sur les courbes de simulations. Comme on l'aperçoit sur les courbes de simulation de la figure 27, nous constatons la conformité des résultats avec ce que nous avons proposés comme modèle du phénomène de trop plein.

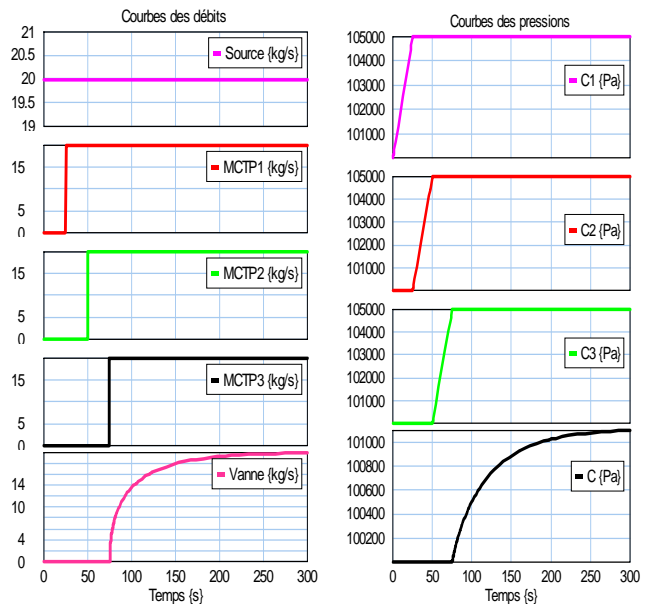


Fig. 27. Courbes de simulation du modèle de trois plateaux et fond de colonne

V. COMMUTATION DE DEUX RESERVOIRS

A. Système d'étude

Le système d'étude comprend une pompe de pression Se alimentant un premier réservoir C_1 à travers une conduite résistive R .

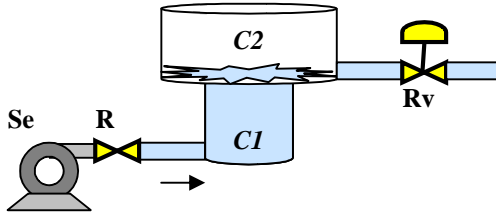


Fig. 28. Système d'étude

Le réservoir C_1 est lié avec un deuxième réservoir C_2 situé au dessus. Une vanne de décharge R_v est liée à C_2 .

B. Analogie hydraulique/électrique

L'étude de la commutation de deux réservoirs en série, nous a mené à trouver une analogie hydraulique/électrique afin de construire le composant bond graph qui modélise ce phénomène. Cette analogie n'est vraie que dans le cas où la pression P_{atm} est nulle.

Cette partie constitue une étendue du démarche et des approches (Diode, Relais Hydraulique, *MCTP*) construites dans le cas du trop plein. L'utilisation des résultats précédents pour construire notre approche pour ce phénomène est tout à fait indiquée.

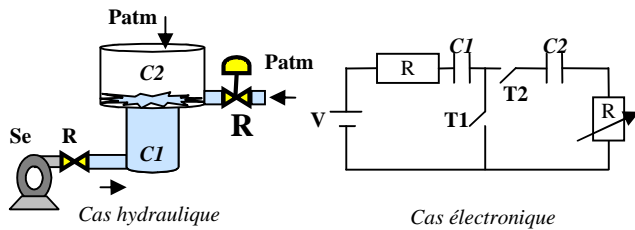


Fig. 29. Analogie hydraulique/électrique

Ce type de commutation à été étudié par *Busson* [12] dans ces travaux concernant les systèmes convertisseurs dont nous nous sommes inspiré pour construire nos composants bond graph.

Le modèle de la figure 30 est construit en modélisant les deux interrupteurs par deux transformateurs modulés.

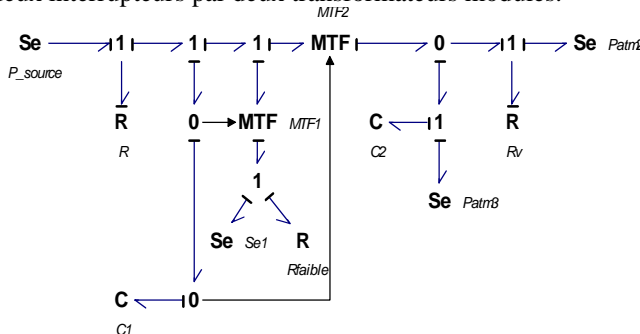


Fig. 30. Modèle bond graph du processus d'étude

Les courbes de simulation de la figure 29 illustrent bien le phénomène de commutation de deux réservoirs.

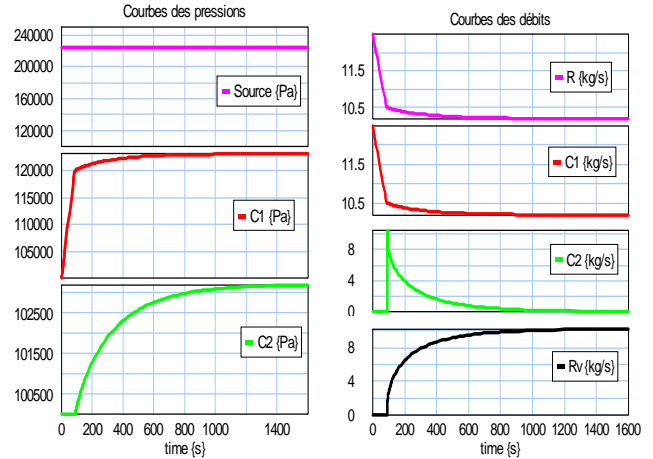


Fig. 31. Simulation du modèle bond graph

VI. CONCLUSION

L'étude effectuée dans ce papier nous a conduit à proposer des composants bond graph pour la modélisation des systèmes hybrides industriels reposant sur le phénomène de trop plein.

L'originalité de ce travail réside dans la traduction directe des phénomènes physiques réels en des modèles bond graph.. Les composants bond graph générés ont été testés sur l'ensemble « plateaux et fond de la colonne avec vanne de décharge » afin de les valider.

REFERENCES

- [1] Nadia ZANZOURI. *Surveillance des systèmes hybrides par approche bond graph couplée à des modèles discrets*. Thèse de l'ENIT, Février 2003.
- [1] K. M. PASSINO AND U. ÖZGUNER. Modeling and analysis of hybrid systems : Exemples. In *Proc. IEEE Int. Symp. Intelligent Control*, Arlington, VA, 1991, pp.251-256.
- [2] I. Demogodin et N. T. Koussoulas. Differential Petri Nets : Representing Continuous Systems in a discrete-Event World. *IEEE Trans. Automat. Contr.* Vol. 43, pp.573-579, Avril 1998.
- [3] B. Lennartson, M. Tittus, B. Egardt, S. Pettersson, Hybrid Systems. In *Process Control, IEEE Control Systems*, pp. 45-56, October 1996.
- [4] J. F. Broenink and K. G. T. Wijbrans, Describing discontinuities in bond graph. In *Proceeding of the international Conference on bond graph Modeling*, pp. 120-125, San Diego, California, 1993.
- [5] J. L. Top. *Conceptual Modeling of Physical Systems*. PhD dissertation, University of Twente, CIP-DATA Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands, 1993.
- [6] J. E. Strömberg, U. Soderman, and J. L. Top, Bond graph supported estimation of discretely changing parameters. In *Proceeding of the international Conference on bond graph Modeling*, pp. 47-52, San Diego, California, 1993.
- [7] P. J. Mosterman. *Hybrid Dynamic Systems : A Hybrid Bond Graph Modeling Paradigm and application in diagnosis*. Dissertation Faculty of the graduate school of Vander bilt University, Nashville, Tennessee, Mai 1997.
- [8] J. D. Garcia. *Approche Bond Graph pour la modélisation des effets thermiques dans les composants commutation en électronique de puissance*. Thèse de l'université des sciences et technologies de Lille, Avril 1997.
- [9] P. Rouchon. *Simulation dynamique et commande non linéaire des colonnes à distiller*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Mars 1990.
- [11] Wassim El Osta. *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles bond graph couplées*. Thèse de l'école centrale de Lille, Décembre 2005.
- [12] Frédéric BUSSON. *Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés*. Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Décembre 2002.