République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ferhat Abbas de Sétif (UFAS)
Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département D'Electrotechnique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

Option : **AUTOMATIQUE**

Par

ISMAIL DIF

SURVEILLANCE D'UN PROCESSUS COMPLEXE PAR L'APPROCHE BOND GRAPHS. APPLICATION AU REBOUILLEUR DE LA COLONNE DE DISTILLATION DISCONTINUE UOP3BM.

Président :	Khier Benmahammed	Prof. Université de Sétif
Examinateur :	Saâd Belkhiat	M.C. Université de Sétif
Rapporteur :	Mohammed Mostefai	M.C. Université de Sétif
Co-Rapporteur :	Mabrouk Khemliche	C.C. Université de Sétif

Abstract: Processes in process engineering are present in several industries at risks require for their monitoring a precise and exploitable models.
The Bond graph tool by its structural and causal properties on one hand and by the multi disciplinary character for the realization of models in a generic way on the other hand, is introduced for the contribution to the design of the monitoring systems for this type of process.
In this work, we present at first the bond graph methodology with its structural and causal aspects. A presentation of the monitoring methods is made to illustrate simplicity and efficiency of the method of generation of the residues by means of the bond graph model.
For the modeling of systems in process engineering, bond graph multi energies is introduced with a sensible choice for the variable of power in truth and in pseudo bond graph according to met phenomena. The application of this modeling with the extension of the monitoring method developed in simple energy on a pilot-plant of distillation shows the efficiency of the tool for the supervision of processes to risks.

Key-words: *Modeling, Bond Graphs, Process Engineering, Monitoring, Analytical Redundancy Relations, Batch Distillation.*

الملخص: إن أنظمة هندسة الطرائق المتواجدة في عدة صناعات خطرة تحتاج لمراقبتها نماذج دقيقة وعملية. أداة الروابط البيانية، بخصائصها الهيكلية والسببية من جهة، وبأسلوبها المتعدد المجالات لإنجاز النماذج بطريقة عملية من جهة أخرى، مقدمة في هذه المذكرة للمساهمة في تصميم أنظمة المراقبة لهذا النوع من الصناعات.
في هذا العمل، نقدم أولا طريقة الروابط البيانية بسماتها الهيكلية والسببية، ثم نعرج على طرق مراقبة الأنظمة لإظهار بساطة وكفاءة طريقة الروابط البيانية في توليد البقايا (مظهرات العيوب).
من أجل إنشاء نماذج لأنظمة هندسة الطرائق، نقدم الروابط البيانية متعددة الطاقات مع اختيار حكيم لمتغيرات القدرة بروابط حقيقية أو مزيفة طبقا للظواهر المصادفة. كتطبيق على هذا النموذج مع التمديد إلى مراقبة النظام من الروابط أحادية الطاقة إلى متعددة الطاقات، اخترنا وحدة تجريبية للتقطير من أجل إظهار كفاءة الأداة في الإشراف على الأنظمة الخطيرة.

الكلمات المفاتيح: *نموذج، الروابط البينية، هندسة الطرائق، العلاقات التحليلية الزائدة، البقايا، التقطير بالدفعات.*

REMERCIEMENTS

L'achèvement de ce mémoire n'a été possible sans l'aide et le soutien de plusieurs personnes qui ont contribuée de près ou de loin à ma formation le long de mes études.

En premier lieu, je tient a remercié profondément mes encadreurs messieurs *Mohammed Mostefai* et *Mabrouk Khemliche* pour leur confiance et d'avoir accepter de m'encadrer et de m'accorder ce travail, je les remercies pour leur conseils, suivie le long de se travail et leur esprit scientifique. Je tient à exprimer ma gratitude aux membres de jury d'avoir accepter de consacrer leur temps précieux pour lire et évaluer ce travail.

Tous mes remerciements à ceux qui ont contribués de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire, surtout mon frère *Attia* et M. *Rabeh Ben yahia et M. Taleb Abd El Kader*.

Mes remerciements profonds à tous mes amies et collègues, surtout ceux qui m'ont apportés un soutien moral et une amitié inoubliable et précieuse. Enfin, je remercie tous les membres de ma famille pour leur aide et encouragement.

Table des matières

Introduction générale 1

1. La modélisation bond graphs 3

1.1. Introduction 3

1.2. Représentation de la méthodologie bond graphs 3

1.3. Représentation du transfert de puissance 5

1.4. Variables mises en jeu 5

1.4.1. Variables de puissance 5

1.4.2. Variables d'énergie 5

1.5. Eléments du langage bond graph 6

1.5.1. Eléments passifs 1-port 6

1.5.2. Eléments actifs 7

1.5.3. Eléments de jonction 7

1.5.4. Les détecteurs 8

1.6. Construction du modèle bond graph 9

1.7. Notions de la causalité 9

1.7.1. Règles d'affectation de la causalité 9

1.7.2. Chemin causal, boucle causale 11

1.8. Modèle mathématique déduit d'un bond graph 13

1.8.1. Schéma bloc 13

1.8.2. La matrice de transfert 14

1.8.3. Représentation d'état 16

1.8.4. Représentation vectorielle 18

1.9. L'analyse structurelle par bond graph 20

1.9.1. Rang de la matrice d'état associée au bond graph 20

1.9.2. Commandabilité structurelle 21

1.9.3. Observabilité structurelle 21

1.10. Les bond graphs et la modélisation orienté objet 23

1.10.1. La modélisation orienté objet 23

1.10.2. Les bond graphs en vue d'une approche orienté objet 24

1.11. Conclusion 24

2. Etat de l'art sur la surveillance 26

2.1. Introduction 26

2.2. Définitions et terminologies 26
2.2.1. Définitions 26
2.2.2. Classification des défauts 27
2.2.3. Modes de fonctionnement des systèmes 28
2.2.4. But, fonctions et conception des systèmes de surveillance 28
2.2.5. Classification des méthodes de surveillance 30
2.3. Méthodes de surveillance à base de modèle 31
2.3.1. Modélisation des systèmes 31
2.3.2. Génération des résidus 32
2.3.3. Approches de génération des résidus 33
2.3.4. Evaluation et optimisation des résidus 36
2.3.5. Conclusion 39
2.4. Méthodes de surveillance sans modèle 39
2.4.1. Introduction 39
2.4.2. Surveillance par reconnaissance de formes 39
2.4.3. Surveillance par l'approche statistique 41
2.4.4. Extension vers l'intelligence artificielle 43
2.4.5. Conclusion 48
2.5. Etat de l'art de la surveillance par bond graph 48
2.6. Conclusion 53
3. Les bond graphs multi-énergies en génie des procédés 54
3.1. Introduction 54
3.2. Variables de puissance en génie des procédés 54
3.2.1. Représentation multi-liens 54
3.2.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond graph 54
3.2.3. Phénomènes en génie des procédés 55
3.3. Eléments muti-ports en génie des procédés 61
3.3.1. Source thermofluide 61
3.3.2. Elément R 62
3.3.3. Elément C 64
3.3.4. Elément Hexa 67
3.4. Linéarisation des éléments bond graph multi-énergies non linéaires 68
3.4.1. Introduction 68
3.4.2. Source thermofluide linéarisée 69
3.4.3. Elément R linéarisé 70

3.4.4. Elément C linéarisé 71
3.5. Conclusion 72
4. La colonne de distillation discontinue 73
4.1. Introduction 73
4.2. Principe de fonctionnement d'une colonne de distillation 73
4.3. Les différentes types de colonnes de distillation 75
4.3.1. Le séparateur Flash 75
4.3.2. La colonne de distillation continue 76
4.3.3. La colonne de distillation discontinue 78
4.4. Modélisation de colonne de la distillation discontinue 79
4.4.1. Le modèle analytique 79
4.4.2. Le modèle bond graph à mots 82
4.5. Conclusion 84
5. Procédures de la surveillance par bond graph multi énergies et application 85
5.1. Introduction 85
5.2. Cahier des charges de la surveillance 85
5.3. Représentation bond graph d'un système de surveillance 86
5.3.1. Introduction 86
5.3.2. Les contraintes 87
5.3.3. Les variables 88
5.3.4. Les paramètres 89
5.4. Procédures graphiques pour la surveillance par bond graph 89
5.4.1. Définitions 89
5.4.2. Conditions de surveillance 89
5.4.3. Génération des relations de redondance analytique 90
5.5. Application 91
5.5.1 Description du processus 91
5.5.2. Modèle bond graph 92
5.5.3. Génération des relations de redondance analytique 95
5.5.4. Approche graphique de la surveillance 99
5.6. Conclusion 99
Conclusion générale 100
Bibliographie 101
A1. Apport du bond graph dans l'automatisation des systèmes A1
A2. Fonctions thermodynamiques A3

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les processus industriels sont composés de plusieurs systèmes physiques de natures diverses. Ils sont très complexes à cause de l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes. Donc, nous avons besoin de les superviser pour maîtriser tout type de fonctionnement des ces systèmes, décider de son état, prévenir les défauts si possibles qui peuvent arrêter le fonctionnement ou faire des dégâts catastrophiques.

Pour cela, la recherche en conduite et supervision des systèmes complexes n'a pas cesser d'augmenter la disponibilité des systèmes et éviter les arrêts accidentels, pour plusieurs raisons: économiques (augmenter et assurer la production), voir environnemental (éviter les pertes en capital et en vie) avec plus de précision dans les systèmes appelés à risque (centrales nucléaires, usines de pétrochimie, …etc.). Cette discipline (sûreté de fonctionnement des systèmes) a connu une large gamme de méthodes en fonction du système étudié, de sa nature, ainsi que de sa dimension. Les méthodes de surveillance sont principalement basées sur deux approches: les méthodes utilisant des modèles de diagnostic et celles utilisant des modèles opératoires. On les classes souvent en méthodes avec ou sans modèle. Dans cette dernière approche, on analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou d'intelligence artificielle. Ces méthodes doivent classifier toutes les données relevées en cours de fonctionnement dans des classes permettant d'identifier toute donnée nouvelle, en décidant sur l'état de fonctionnement du système considéré. Elles sont bien adaptées pour les systèmes à grand échelle où la modélisation est difficile ou très complexe. Ces techniques supposent donc la connaissance *à priori* de tous les états de fonctionnement (normal et en fautes), et ne prennent pas en compte l'évolution du système. Ainsi, la négligence de la modélisation qui peut apporter beaucoup d'information sur le comportement du système, sont les inconvénients majeurs des méthodes sans modèles.

Un grand nombre de travaux a été consacré à la surveillance par modèle **[38]**. La surveillance par modèle s'effectue comme suit : on calcule les résidus en utilisant la connaissance et les données réelles disponibles. Les résidus sont des variables indicatrices de défauts, dans le sens où leur valeur est nulle lorsque le système se comporte exactement comme son modèle idéal en fonctionnement normal (pas de bruit, pas d'erreur de modélisation, pas d'entrée inconnue, pas d'erreur paramétrique, …). Ce cas idéal ne se produit jamais, les résidus diffèrent en général de zéro. Dans ce sens, la procédure consiste à séparer les cas dans lesquels la non nullité résulte des bruits, des erreurs de modélisation, et des entrées inconnues, etc. de ceux dans lesquels elle résulte de défaillances du système. Puis la procédure tente alors de localiser et diagnostiquer la (les) défaillance(s) supputée(s).

Donc, la modélisation est une étape nécessaire pour n'importe quelle étude en automatique. Pour la conduite, l'étude comportementale et structurelle ou pour la conception des systèmes de surveillance. Cependant, la nature diverse des systèmes physiques rencontrés dans l'industrie oblige les spécialistes à travailler avec des groupes multi disciplinaires pour atteindre l'objectif désiré. Ce groupement nécessite un langage de communication commun. Le bond graph, par son caractère graphique répond à ce besoin d'être l'outil commun entre les spécialistes de différents domaines. En plus, il peut se comporter comme un support de plusieurs applications et études: la modélisation, l'analyse structurelle, la conception du système de commande, la conception du système de surveillance, …etc.

Ce travail rentre dans la catégorie de la conception de système de surveillance d'un processus de génie des procédés (colonne de distillation) par l'approche bond graph multi énergies.

Le manuscrit est organisé comme suit:

Le premier chapitre, présente l'outil bond-graph pour la modélisation, l'analyse structurelle et la simulation des processus. Nous donnons toutes les caractéristiques essentielles de cet outil ainsi que le passage aux formes de représentations connues pour l'automatique telle que: l'espace d'état, la fonction (matrice) de transfert, le schéma bloc ainsi que la représentation vectorielle. Une vue orientée objet de la modélisation par bond graph est illustrée dans la dernière partie de ce chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la définition et la présentation de concepts généraux de la surveillance. Puis il portera sur une petite comparaison entre les méthodes trouvées dans la littérature pour la conception de système de surveillance. Les méthodes avec modèle, telles que: l'estimation d'état, paramétrique et l'espace de parité connu sous le nom de redondance, dans ses trois versions, physique, statique et dynamique (ou analytique). Les méthodes sans modèle les plus employées sont : la reconnaissance de formes, l'approche statistique et l'intelligence artificielle. Une méthode choisie de l'approche statistique, appelée Analyse en Composante Principale (ACP) a une correspondance avec l'approche d'espace de parité. Comme extension vers l'intelligence artificielle, on va présenter l'utilisation des systèmes experts, les réseaux de neurones ainsi que la logique floue pour la surveillance. Un état de l'art de l'utilisation de l'outil bond graph est présenté à la fin de ce chapitre avec un exemple d'illustration de la méthode de génération de relations de redondance analytique (RRAs) directement du modèle.

Le chapitre 3 porte sur la définition et la présentation du bond-graph multi énergie pour la modélisation des processus rencontrés dans le génie des procédés. On propose des modèles bond graphs pour les phénomènes les plus connus dans ce secteur, comme l'évaporation, la condensation, les mélanges liquide - vapeur ainsi que les systèmes chimiques. Les bond graphs multi-énergies sont connectés par des éléments multi-ports, à caractère non linéaire, on trouve dans la dernière section de ce chapitre une proposition de linéarisation de ces éléments pour objectif de simulation, de mise en équation linéaire et de surveillance.

Comme exemple du processus en génie des procédés, on a choisit la colonne de distillation discontinue pour la modélisation et la surveillance par l'approche bond graph. Ce processus présente l'interaction de plusieurs systèmes voir phénomènes physiques tels que : l'électricité dans la commande et l'alimentation de thermoplongeur et des électrovannes, l'hydraulique dans l'écoulement du fluide au sein de la colonne, la thermodynamique dans l'énergie et la puissance calorifique ajoutée et supprimée respectivement dans le rebouilleur et dans le condenseur, et chimique dans le transfert de la matière et la séparation entre les composants du mélange dans les plateaux de la colonne. Une petite comparaison entre la modélisation analytique mathématique et la modélisation par bond graph montre l'efficacité de ce dernier pour la compréhension et la prédiction du comportement et du fonctionnement des procédés.

Le dernier chapitre va contenir l'utilisation des bond graphs multi énergies pour la surveillance d'une partie de la colonne de distillation discontinue. On se limite dans ce chapitre à la définition des conditions de surveillabilité des sources de contrôle pour ce procédé. On va donner quelques propriétés et théorèmes issues du bond graph simple énergie, qui sont étendus aux bond-graphs multi énergies.

Une conclusion générale met le point sur l'apport de notre travail dans cette discipline avec une discussion sur les contraintes et les perspectives de cette étude.

Chapitre 1

CHAPITRE 1: LA MODÉLISATION BOND GRAPHS

1.1. Introduction:

Pour la conception de nouveaux produits ou pour l'amélioration de produits existants, les entreprises s'organisent de plus en plus en équipes pluridisciplinaires composées de personnes de compétences diverses (mécanique, hydraulique, électrique, automatique, thermique, …) qui suivent les projets depuis la définition du cahier de charges du système à concevoir jusqu'aux tests sur le prototype. Ces équipes sont chargées de toutes les étapes de l'étude, que ce soit la modélisation, la simulation, la conception des lois de commande pour satisfaire des critères de performances, ou la sûreté de fonctionnement avec étude du comportement du système piloté en mode dégradé et la détermination des éléments "sensibles" du système pour définir une maintenance préventive.

De telles structures imposent aux membres des équipes d'avoir une approche commune des problèmes, des outils de représentation de même nature et des logiciels de simulation compatibles.

L'outil ***bond-graph*** répond à ces exigences d'être un langage unifié pour tous les domaines de la physique par son caractère graphique, et peut se comporter comme un support de communication entre les spécialistes de différentes disciplines.

Ce chapitre est dédié à la présentation des concepts généraux de l'outil bond graph pour la modélisation, ainsi que ses caractéristiques essentielles pour l'analyse du système étudié (propriétés structurelles), et en terminant le chapitre par le caractère orienté objet de la modélisation bond graph qui peut mener à une implémentation informatique par un langage graphique dédié objet.

1.2. Représentation de la méthodologie bond-graph:

Définition **:** *le bond graph est un outil de modélisation des systèmes dynamiques, il se base sur le transfert de puissance entre les différentes parties du système considéré, il décrit sa décomposition physique en sous systèmes et en composants.*

Cet outil de modélisation a été créé par Paynter en 1961 et développé ensuite par Karnopp et Rosenberg, Thoma et Breedveld **[1, 3, 4, 6, 7]**.

La méthodologie bond-graph est basée sur la caractérisation des phénomènes d'échange de puissance (par un lien) au sein du système. L'idée de la modélisation par bond graph est la représentation des puissances dissipées comme le produit effort-flux et de les lier par les différentes jonctions pour reproduire le système **[2]**.

Les bond graphs permettent, à partir d'un système physique quelconque, d'obtenir une représentation graphique indépendante du domaine physique étudié.

Le bond graph se situe comme intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques qui lui sont associés (matrice de transfert dans le cas linéaire, équation d'état linéaire ou non linéaire, système d'équations différentielles d'ordre deux (2))**[4]** (***Fig. 1.1***).

L'outil bond graph comporte 4 étapes de modélisation (***Fig. 1.2***) **[2]** :

- **Technologique:** par le bond graph à mots.
- **Physique:** représentation des phénomènes physiques par les éléments qui lui convient (stockage, dissipation, transformation).
- **Mathématique:** déduction du modèle mathématique après l'affectation des causalités.
- **Algorithmique:** simulation et validation du modèle trouvé.

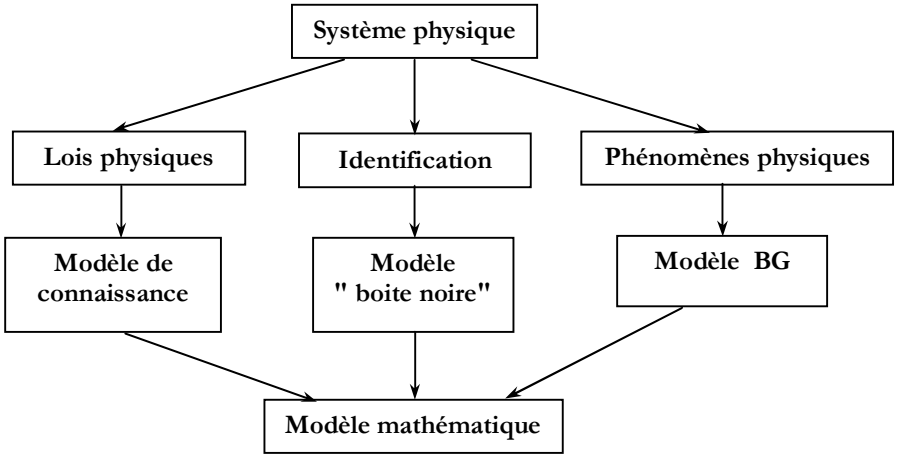


Fig. 1.1 : *Place du BG dans les méthodes de modélisation*

L'approche bond graph permet une modélisation fonctionnelle par leur représentation par bond graph à mots et par la mise en évidence des phénomènes de dissipation, de stockage et de transformation d'énergie grâce aux éléments bond graph (R, C, I, TF, GY, …). Du point de vue de la supervision, le modèle permet à l'opérateur de visualiser clairement le stockage, la dissipation, le transfert ainsi que la dynamique des phénomènes du processus.

Les propriétés structurelles sont assurées par visualisation des propriétés de causalité et comportementale, et par la déduction systématique des modèles mathématiques du modèle bond graph **[2, 7]**.

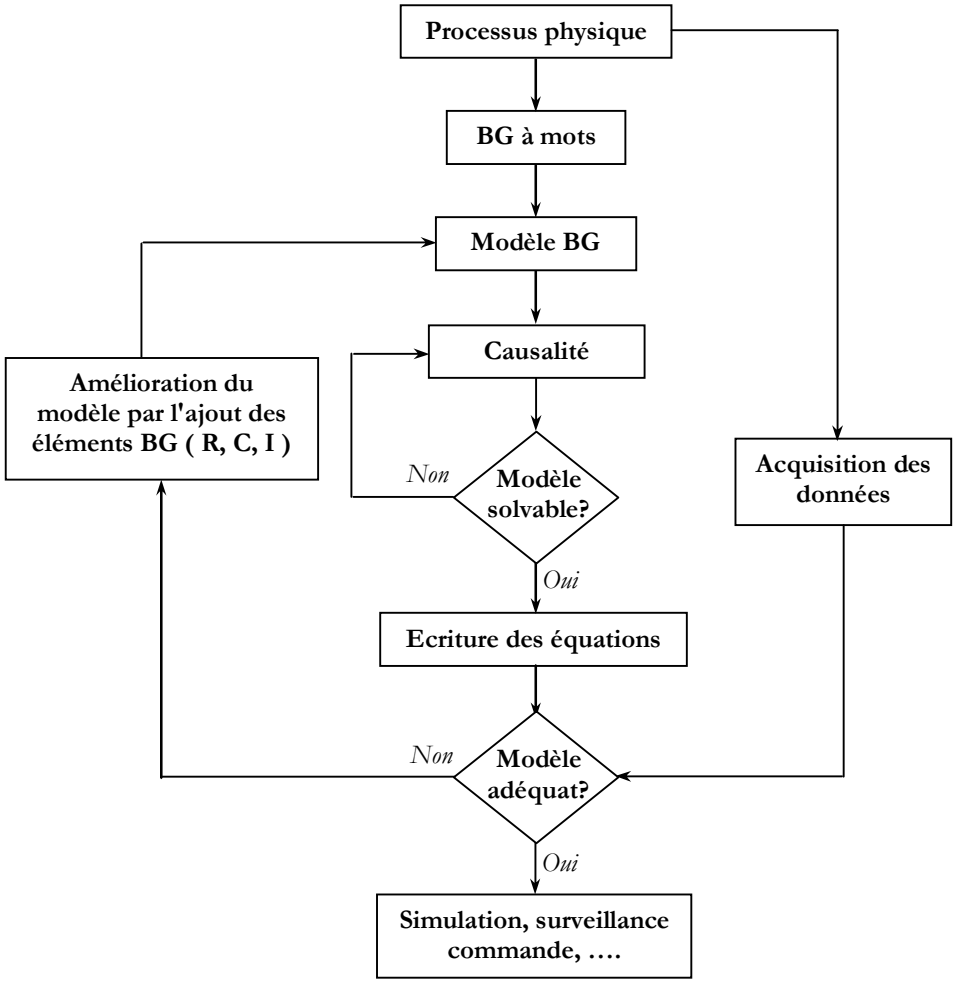


Fig. 1.2 : *Etapes de modélisation par BG*

Une représentation bond graph permet de mettre en évidence quatre informations (***Fig. 1.3***) **[1, 2]**.

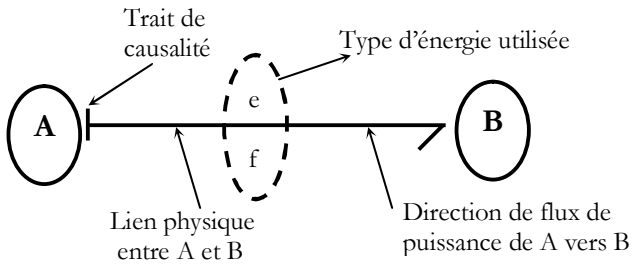


Fig.1.3: *Informations fournies par une représentation Bond graph*

La liaison physique entre deux éléments (ou systèmes) A et B par le lien bond graph, la causalité par le trait causal, le type d'énergie utilisée par la nature des variables de puissance et enfin la direction de la puissance dissipée par la direction de la demi-flèche.

1.3. Représentation de transfert de puissance :

la méthodologie bond graph repose sur une analyse et une caractérisation des transferts de puissance au sein du système étudié, ce qui conduit à une décomposition en sous-systèmes appelée " bond graph à mots "(***Fig1.4***)**[1]**.

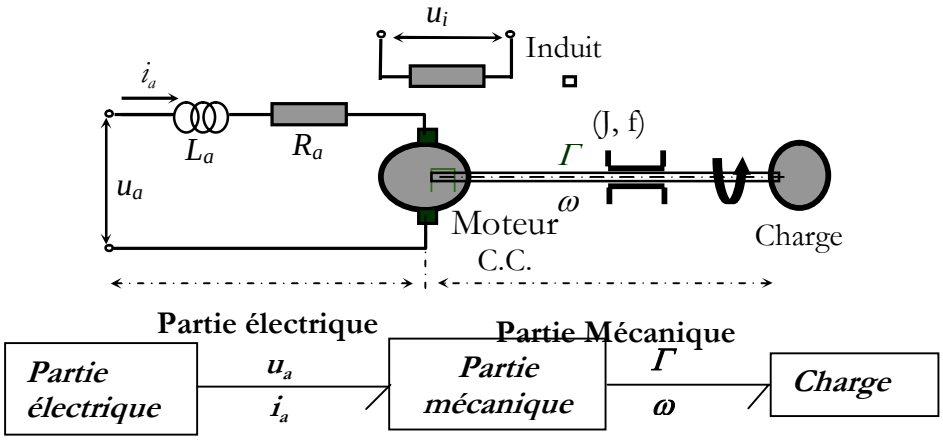


Fig. 1.4 : *Exemple de Bond graph à mots*

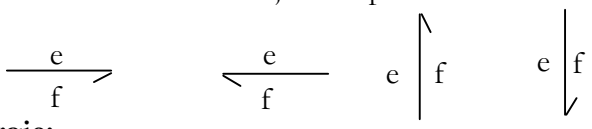
1.4. Variables mises en jeu:

1.4.1. Variable de puissance:

La puissance échangée *P* s'exprime comme le produit de deux variables complémentaires. Indépendamment du domaine considéré, ces variables sont appelées *" variables généralisées"* d'effort et de flux, notées respectivement *e* et *f*. Ce sont les variables de puissance :

$$P=e.f \tag{1.1}$$

Par convention le flux est toujours représenté du côté de la demi-flèche **[7]** :



1.4.2. Variables d'énergie:

L'énergie se calcule par intégration de la puissance :

$$E(t)=\int_0^t e(\tau)\,f(\tau)\,d\tau + E(0) \tag{1.2}$$

On définit les variables d'énergie par les relations intégrales suivantes :

$$\begin{cases} p(t) = \int_0^t e(\tau)d\tau + p(0) \\ q(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau + q(0) \end{cases} \quad (1.3)$$

où, *p(t)* est le moment généralisé et *q(t)* est le déplacement généralisé.

Le tableau 1.1 indique la signification de ses variables pour les principaux domaines de la physique **[1, 2, 4, 7]**.

Domaines	**Effort *(e)***	**Flux *(f)***	**Moment *(p)***	**Déplacement *(q)***
Mécanique Translation	Force F *[N]*	Vitesse v *[m/s]*	Impulsion P *[N.s]*	Déplacement x *[m]*
Mécanique Rotation	Couple τ *[N.m]*	Vitesse angulaire ω *[rad/s]*	Impulsion angulaire h *[N.s]*	Angle θ *[rad]*
Hydraulique	Pression P *[pa]*	Débit volumique $\dot{V}$ *[m^3/s]*	Impulsion Pression Γ *[Pa.s]*	Volume V [m^3]
Chimique	Potentiel chimique μ *[J/mole]*	Flux molaire $\dot{n}$ [mole/s]	-	Masse molaire m *[mole]*
Thermique	Température *T[°K]*	Flux d'entropie $\dot{S}$ *[W/°K]*	-	Entropie S *[J/°K]*
Electrique	Tension u *[v]*	Courant i *[A]*	Flux magnétique ϕ *[Web]*	Charge q *[coulomb]*

***Tableau1.1 : Signification** des variables généralisées pour différents domaines physiques.*

Pour certains domaines comme la chimie, l'hydraulique, la thermique, la thermodynamique, il peut être plus simple (pour l'écriture des équations) en plus conforme aux habitudes d'utiliser d'autres variables que celles indiquées dans le tableau 1.1 le produit des variables portées par le lien de puissance ne correspond plus alors à une puissance on emploie dans ce cas le terme de " *pseudo-bond graph*" **[4, 7]**.

1.5. Eléments du langage bond graph:

Les éléments bond graph se classifient en éléments passifs, éléments actifs et éléments de jonction en neuf éléments. Ces neuf éléments constituent le langage bond graph.

1.5.1. Eléments passifs 1-port:

les éléments *R, C, I* sont dits éléments passifs car ils transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée sous forme de *1-port* car ils sont caractérisés par une loi scalaire et reçoivent la puissance par un lien unique. La puissance est fournie aux éléments, la demi-flèche est orientée vers l'élément.

a- Elément R (Résistance):

L'élément *R* est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort à la variable de flux dans le domaine physique considéré.

La puissance qui lui est fournie est transformée en énergie calorifique dissipée. La loi linéaire ou non linéaire est sous forme:

$$\phi_R(e, f) = 0 \tag{1.4}$$

et sa représentation générale est : $\xrightarrow[f]{e}$ R

b- Elément C (Capacité):

L'élément *C* est utilisé pour modéliser tout phénomènes physique liant la variable d'effort à la variable de déplacement dans le domaine physique considéré. La puissance qui lui est fournie est transformée en énergie stockée. La loi générique qui le caractérise est :

$$\phi_C(e,q) = 0 \quad où \quad \phi_C(e, \int f(\tau)d\tau) = 0 \tag{1.5}$$

et sa représentation générale est : $\xrightarrow[f = dq/dt]{e}$ *C*

c- élément I (Inertie):

L'élément I permet de modéliser tout phénomène physique liant la variable de flux à la variable de moment dans le domaine physique considéré. La puissance, qui lui est fournie, est transformée en énergie stockée .La loi générique qui le caractérise est :

$$\Phi(p, f) = 0 \quad où \quad \Phi_I(\int e(t)dt, f) = 0 \tag{1.6}$$

La représentation générale est : $\xrightarrow[f]{e = dp/dt}$ *I*

1.5.2. Eléments actifs :

Les éléments actifs sont des sources qui fournissent de la puissance au système. On distingue les sources d'effort *Se* et les sources de flux *Sf* .On les désignes par la figure ***Fig.* 1.5** :

Se ⟶ *Sf* ⟶

Fig. 1.5 : *Représentation des sources d'effort et de flux*

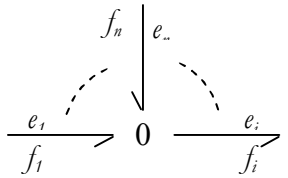
L'orientation de la demi-flèche est fixée et supposée toujours sortante de la source.

1.5.3. Eléments de jonction :

Les Eléments de jonction notés *0,1,TF, GY,* servent à coupler un des éléments *R,C,I* et les source , et composent la structure de jonction correspondant à l'architecture du modèle étudié . Ils sont conservatifs de puissance.

a. Jonction 0 : associe les éléments soumis au même effort (***Fig. 1.6***). Les relations qui la caractérise sont :

- égalité des efforts pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction,
- somme algébrique des puissances = 0.



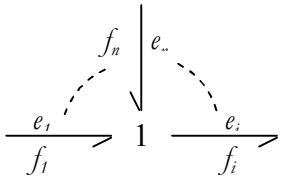
$$e_1 = e_2 = ... = e_n$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i f_i = 0$$

Fig. 1.6 : *Jonction 0 avec a_i=1 pour une puissance entrante et a_i = -1 pour une puissance sortante*

b. Jonction 1 : elle associe les éléments soumis à un même flux (***Fig. 1.7***). Les relations, qui la caractérise sont :

- égalité des flux pour tous les liens ayant une extrémité sur jonction,
- somme algébrique des puissances =0.



$$f_1 = f_2 = ... = f_n \qquad \sum_{i=1}^{n} a_i e_i = 0$$

Fig. 1.7 : *Jonction 1 avec a_i=1 pour une puissance entrante et a_i = -1 pour une puissance sortante.*

c. Transformateur TF : Eléments à deux ports, modélise les éléments transformation d'énergie (***Fig. 1.8***).

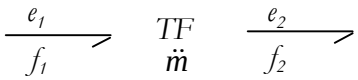


Fig. 1.8 : *Transformateur TF*

Il est conservatif de puissance (e_1f_1=e_2f_2), les relations qui le caractérisent et qui permettent de définir *m* sont :

$$\begin{cases} e_1 = me_2 \\ f_2 = mf_1 \end{cases} \tag{1.7}$$

Il est utilisé pour modéliser les changements de domaines physiques, qui se font sans perte de puissance. Si le module *m* n'est pas constant, le transformateur est dit modulé noté *MTF : m (.)*, la variable m peut alors être continue ou booléenne *(0,1)*.

d. Gyrateur GY: C'est un élément à deux ports, il modélise les éléments transformateurs d'énergie exprimés par des relations de proportionnalité croisée *flux– effort* (***Fig. 1.9***).

Fig. 1.9 : *Gyrateur GY*

Il est conservatif de puissance (e_1f_1=e_2f_2),les relations qui la caractérise et qui permettent de définir sont:

$$\begin{cases} e_1 = rf_2 \\ e_2 = rf_1 \end{cases} \tag{1.8}$$

Si *r* n'est pas constant, le Gyrateur est dit "modulé" noté *MGY : r (.)*.

1.5.4. Les détecteurs :

Les détecteurs *De* et *Df* (***Fig. 1.10.a***) sont des éléments placés dans le modèle bond graph pour indiquer la présence d'un capteur ou d'un instrument de mesure supposé idéal (qui ne consomme pas de puissance) .

Aucune puissance n'intervient, on utilisera donc un lien d'information, on signal, représenté par une flèche entière classique (***Fig. 1.10.b***).

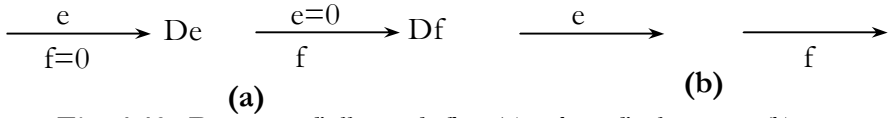


Fig. 1.10 : *Détecteurs d'effort et de flux (a) et liens d'information (b)*

1.6. Construction des modèles bond graph:

L'étape préliminaire de la construction du modèle concerne la définition de ses hypothèses de modélisation, c'est-à-dire les phénomènes physiques qui seront pris en compte dans le modèle.

Pour les systèmes physiques à simple énergie, en suivant les différentes variables de puissance, tout en associant pour les composants subissant à un même effort (flux respectivement) une jonction "0" (jonction "1"), puis en rattachant les phénomènes présents par ce qui correspondent en composants R, C ou I, aux jonctions. Comme pour les systèmes mécaniques, on cherche les différentes vitesses du système en mouvement, pour y rattacher ses composants à des jonction "1", donc les composants en parallèle sont reliés par des jonctions "1", alors pour les systèmes électriques et hydrauliques, sont les composants en série reliés par des "1" (même flux, même courant ou même débit volumique) et les composants en parallèle sont reliés par des jonction "0" (même effort, même tension ou même pression).

1.7. Notion de la causalité :

La propriété de causalité permet de représenter les relations de cause à effet au sein des modèles bond graph entre ses éléments. C'est le niveau algorithmique de la modélisation. Les relations de cause à effet sont mises en évidence par le trait causal placé perpendiculairement au lien, près de l'élément ou l'effort est une entrée pour lui (***Fig.1.11***).

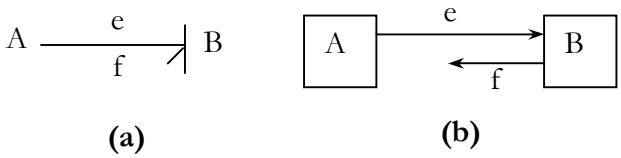


Fig. 1.10 : *Symbole de la causalité* ***(a)*** *A impose l'effort e à B* ***(b)***

Remarque : La position du trait causal est indépendante du sens de la demi-flèche.

1.7.1. Règles d'affectation de la causalité :

L'affectation de la causalité n'est pas arbitraire, mais elle est soumise à des règles regroupées dans les ***Tableaux 1.2*** et ***1.3***.

La procédure d'affectation des causalités est effectuée comme suit :

1- affecter la causalité aux sources.

2- mettre les élément I et C en causalité intégrale (convenable à la résolution numérique) et affecter la causalité obligatoire sur les R non linéaires et répercuter sur l'environnement en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.

3- compléter la causalité sur les éléments R linéaires en fonction des possibilités restantes en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.

4- rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifie la causalité sur l'élément I origine du conflit. Parfois, on est contraint d'ajouter ou d'éliminer des éléments (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale.

5- affecter une causalité aux détecteurs.

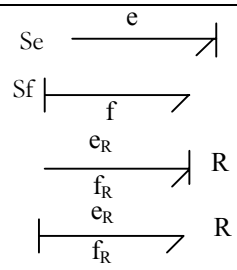
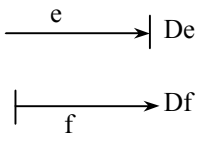
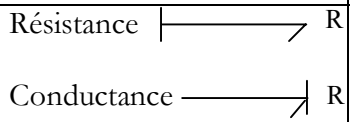
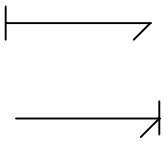
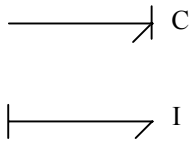
Causalité	Eléments	Lois caractéristiques	Cas linéaire
Obligatoire		***e*** imposé par ***Se*** **f** imposé par **Sf** $f_R = \varphi_R^{-1}(e_R)$ $e_R = \varphi_R(f_R)$	
A titre indicatif		**e** mesuré par **De** **f** mesuré par **Df**	
Arbitraire		$e_R = \varphi_R(f_R)$ $f_R = \varphi_R^{-1}(e_R)$	$e_R = R.f_R$ $f_R = \frac{1}{R}.e_R$
Intégrale		$e_c = \varphi_c(\int f_c dt)$ $f_I = \varphi_I(\int e_I dt)$	$E_c(s) = \frac{1}{cs}F_c(s)$ $F_I(s) = \frac{1}{Is}E_I(s)$
Dérivée		$f_c = \frac{d}{dt}\left[\varphi_c^{-1}(e_c)\right]$ $e_I = \frac{d}{dt}\left[\varphi_I^{-1}(f_I)\right]$	$F_c(s) = cs.E_c(s)$ $E_I(s) = Is.F_I(s)$

Tableau 1.2 : *Règle d'affectation de la causalité sur les éléments actifs et passifs (s et l'opérateur de La place)*

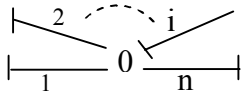
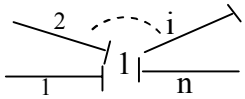
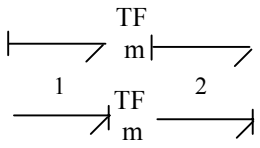
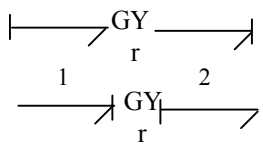
Eléments	Règle	Lois
	1 seul lien avec trait causal près du 0	$e_{1=}e_i$, $e_{2=}e_i$,…...,$e_{n=}e_i$ $a_i f_{i=}-(a_1f_1 + a_2f_{2+}...+ a_nf_n)$
	1 seul lien sans trait causal près du 1	$f_1=f_i$, $f_2=f_i$, ….., $f_n=f_i$ $a_i e_{i=}-(a_1e_1 + a_2e_{2+}...+ a_ne_n)$
	Affectation symétrique de la causalité.	$e_1=me_2$ $f_2=mf_1$ $e_2=(1/m)e_1$ $f_1=(1/m)f_2$
	affectation anti-symétrique de la causalité	$e_1=rf_2$ $e_2 = rf_1$ $f_1=(1/r)e_2$ $f_2=(1/r)e_1$

Tableau 1.3: *Règles d'affectation de la causalité sur les éléments de jonction ($a_i = \pm 1$ suivant la direction de la demi-flèche, entrante ou sortante de la jonction)*

1.7.2. Chemin causal, boucle causale :

Le bond graph est un graphe dans lequel sont définis des boucles et des chemins causaux, parcourus en suivant la propagation de l'information effort ou flux, et quelque soit le sens des demi-flèches.

1.7.2.1. Définitions :

1. un chemin causal dans une structure de jonction bond graph (1, 0, TF ou GY) est une alternance de liens et d'éléments de base(R, C ou I), appelés nœuds tels que tous les nœuds ont une causalité complète et correcte, et deux liens du chemin causal ont en un même nœud des orientations causales opposées. Suivant la causalité, la variable traversée est l'effort ou le flux. Pour changer cette variable, il faut passer par un élément de jonction GY, ou par un élément passif (I, C ou R).
2. un chemin causal est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc pour une même séquence de liens et de nœuds, deux chemins en suivant soit l'effort soit le flux (***Fig. 1.12***).

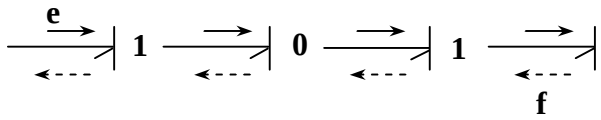


Fig. 1.12 *: chemin causal simple en suivant l'information effort ⟶ ou l'information flux - - - - →*

3. Un chemin est mixte s'il faut changer de variable lors du parcours. C'est le cas en présence d'un GY, ou le chemin est appelé mixte direct (***Fig. 1.13.a***) ou lorsqu'il faut traverser un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect (***Fig. 1.13.b***).

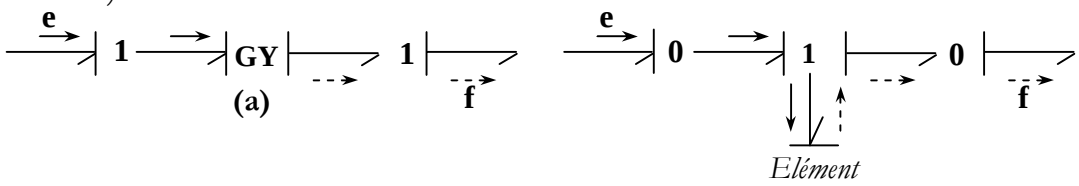


Fig. 1.13 : *Chemin causal mixte direct (a) et indirect (b)*
⟶ information effort - - - - →information flux

4. une chaîne d'action est un chemin causal entre une source et une sortie (qui peut être représentée par un capteur, détecteur) (***Fig. 1.14***).

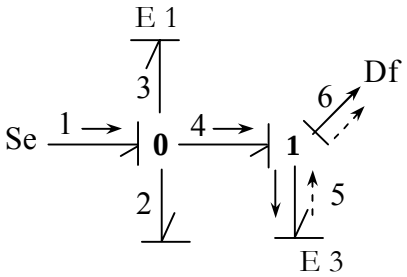


Fig. 1.14 : *Chaîne d'action Se – Df : 1- 4- 5- Elément (3) - 5- 6*

5. une boucle d'action est un chemin causal fermé entre deux éléments de type R, C ou I sans lien parcouru en suivant la même variable plus d'une fois (***Fig. 1.15***).
6. une maille est un chemin causal fermé parcouru en partant d'un élément et en revenant à cet élément, en ayant suivi dans certains liens une seule variable (***Fig. 1.16***).
7. une boucle de causalité est une succession de jonctions et de liens formant un chemin causal fermé (***Fig. 1.17***).

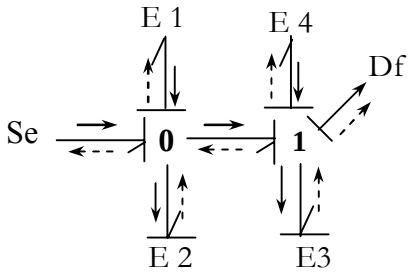


Fig. 1.15 : *Boucles causales entre les éléments E1-E2, E2-E3, E3-E4*

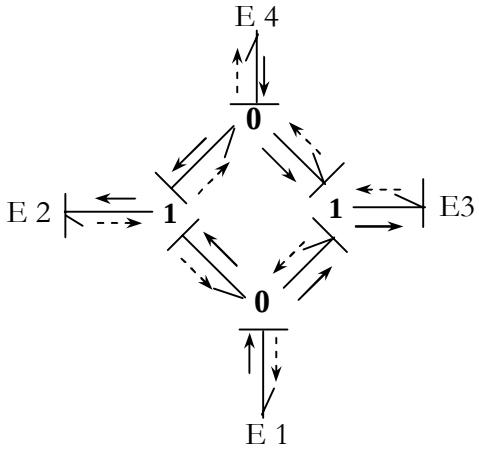


Fig. 1.16 : *Chemin causal fermé : Maille*

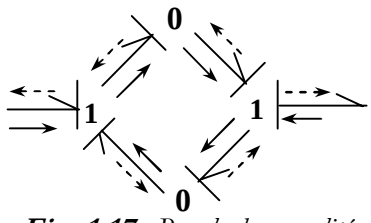


Fig. 1.17 : *Boucle de causalité*

Cette structure causale pose des problèmes lors de la construction des modèles mathématiques, particulièrement quand le gain de la boucle vaut 1. elle doit être évitée, ce qui peut conduire à affecter une causalité dérivée à des éléments I et C **[7]**.

1.7.2.2. Gain d'un chemin causal :

Le gain (dans le cas linéaire) d'un chemin causal se définit comme la fonction liant la variable d'entrée de l'élément formant l'extrémité du chemin à la variable de sortie de l'élément correspondant à l'origine du chemin.

a- Chemin causal simple ou mixte direct : Le gain d'un chemin causal simple ou mixte direct se calcul par la relation suivante :

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \qquad (1.9)$$

où :

- m_i et r_j sont les modules des éléments TF_i et GY_j du chemin causal , k_i et l_j valent *(+1)* ou *(-1)* suivant la causalité du TF_i et GY_j .

- n_0 et n_1 représentent le nombre total de changements d'orientation des liens respectivement aux jonctions *0* quand on suit la variable flux et aux jonction *1* quand on suit la variable effort.

b- Chemin causal indirect : Lorsque le chemin causal est indirect et passe par des éléments *R, C* ou *I*, il faut multiplier l'expression précédente par le gain des éléments traversés, ce qui s'écrit :

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \prod_e g_e \qquad (1.10)$$

où $\prod_e g_e$ désigne le produit de gains des éléments traversés.

Le tableau ***1.4.*** regroupe les gains des éléments *C, I,* et *R* avec les différents cas de causalité possibles.

Elément	Causalité	Gain
C	Intégrale Dérivée	$1/Cs$ Cs
I	Intégrale Dérivée	$1/Is$ Is
R	Résistance Conductance	R $1/R$

Tableau 1.4 : *Gain des élément passifs 1-ports*

1.7.2.3. Gain d'une boucle causale :

Le gain d'une boucle causale liant deux éléments de l'ensemble (*R, C, I*), s'exprime par la relation suivante :

$$B = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i^2)^{k_i} \prod_j (r_j^2)^{l_j} \prod_e g_e \qquad (1.11)$$

1.8. Modèle mathématique déduit d'un bond graph :

La modélisation bond graph permet le passage à d'autres formes de modélisation telles que : le schéma bloc, la matrice ou la fonction de transfert, l'espace d'état et la représentation vectorielle.

1.8.1. Schéma bloc :

Il est obtenu en constituant des blocs exprimant une proportionnalité correspondant aux éléments *R, TF* et *GY* et des blocs de dérivation et d'intégration correspondants aux éléments *I* et *C*. La structure de jonction détermine la manière de relier ces différents blocs (chaque jonction est représentée par un sommateur et un point de connexion).

La procédure du passage au schéma bloc est la suivante **[3]**:

- Ecrire successivement les lois structurelles associées à a structure de jonction et les lois régissant les composants.
- Faire apparaître (graphiquement) deux lignes distinctes, la première est associée aux efforts et la deuxième au flux.
- Faire apparaître un sommateur et un point de connexion pour chaque jonction du modèle bond graph, pour représenter la somme pondérée pour un type de variable et l'égalité pour l'autre.

A partir de la structure obtenue, on construit le schéma bloc , en ne parcourant qu'une seule variable à partir du signal d'entrée jusqu'au signal de sortie.

Exemple : considérons le schéma électrique et le modèle bond graph associée suivant (***Fig. 1.18***):

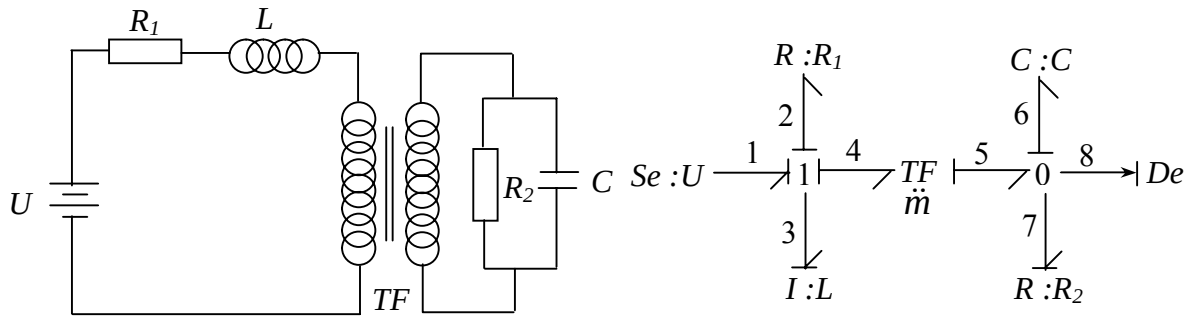


Fig. 1.18 : *Schéma électrique et son modèle bond graph associé*

- Les équations caractéristiques des jonctions:

- *Jonction 1 :* $f_1 = f_3, f_2 = f_3, f_4 = f_3$
  $e_3 = e_1 - e_2 - e_4$
- *Jonction TF :* $e_4 = me_5$
  $f_5 = mf_4$
- *Jonction 0 :* $e_5 = e_6, e_7 = e_6$
  $f_6 = f_5 - f_7$

- Les lois constitutives des éléments :

$$e_2 = \Psi_{R_1}(f_2),\ f_3 = \Psi_L\left(\int e_3 dt\right), e_6 = \Psi_C\left(\int e_6 dt\right),\ f_7 = \Psi_{R_2}^{-1}(e_7)$$

d'où le schéma bloc suivant (***Fig. 1.19***) :

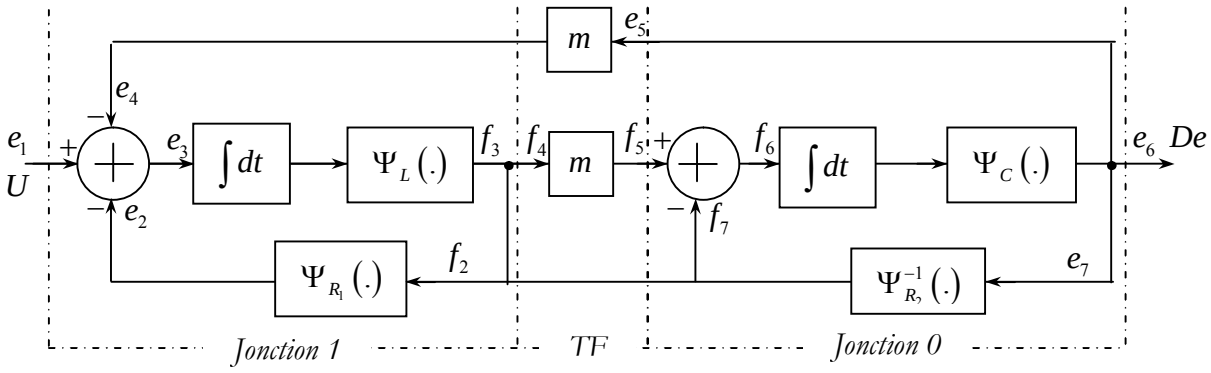


Fig. 1.19 : *Schéma bloc associé au bond graph de la* ***Fig. 1.18***

1.8.2. La matrice de transfert :

Les termes de la matrice de transfert sont les transmittances reliant les différentes entrées (sources) aux sorties (détecteurs). Chaque transmittance est calculée directement à partir du modèle bond graph (dans le cas linéaire) grâce à la généralisation de la règle de Mason **[3, 7]**. Si le système possède *m* entrées et *p* sorties, le modèle est de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ . \\ . \\ . \\ y_p(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} N_{11}(s) & . & . & . & N_{1m}(s) \\ . & & . & & . \\ . & & . & & . \\ . & & . & & . \\ N_{p1}(s) & . & . & . & N_{pm}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ . \\ . \\ . \\ U_m(s) \end{bmatrix} \tag{1.12}$$

avec un dénominateur commun à toutes les fonctions de transfert.

*Règle de Mason **[7, 8]**: Soient u et y l'entrée et la sortie du système respectivement (système SISO), alors la transmittance entrée-sortie est définie comme suit :*

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{\sum_k T_k(s) D_k(s)}{D(s)} \tag{1.13}$$

avec :

- $T_k(s)$ *est le gain du k-ième chemin direct liant la sortie à l'entrée,*
- $D(s)$ *est le déterminant du bond graph, qui se calcule par :*

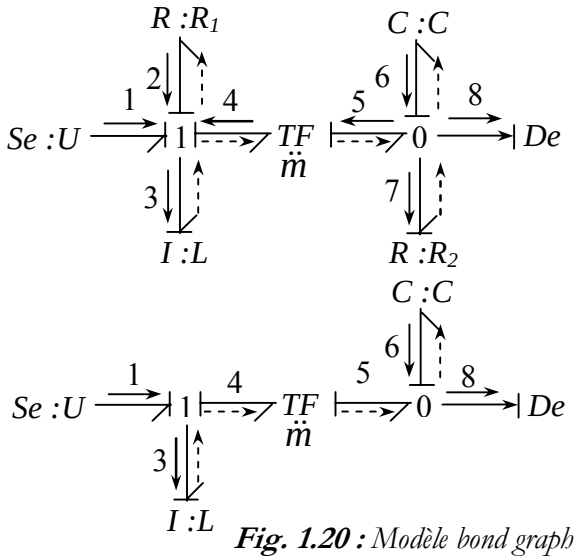
$$D(s) = 1 - \sum_j B_j(s) + \sum_{j,k} B_j(s) B_k(s) - \sum_{j,k,l} B_j(s) B_k(s) B_l(s) + \ldots \tag{1.14}$$

où les $B_j(s)$ représentent les gains des boucles causales du système, intervenant lorsqu'elles sont disjointes en produit 2à2 puis 3à3, …etc.

- le calcul de $D_k(s)$ est similaire au $D(s)$ en enlevant la k-ième chaîne d'action.

Définition : *Deux boucles causales sont disjointes si elles n'ont aucun lien ni jonction en commun parcourus en suivant la même variable.*

Exemple : Considérons le système précédent de la figure (***Fig. 1.18***) :Trois boucles causales sont possibles (***Fig. 1.20***).



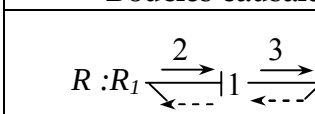
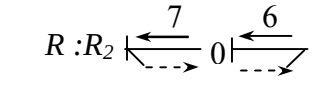
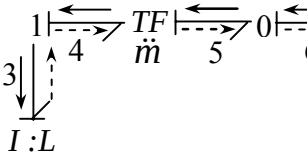
Boucles causales	Gains
	$B_1 = -\frac{R_1}{Ls}$ $n_1 = 1$
	$B_2 = -\frac{1}{R_2 Cs}$ $n_0 = 1$
	$B_3 = -\frac{m^2}{LCs^2}$ $n_1 = 1$

Fig. 1.20 : *Modèle bond graph avec sa chaîne d'action et ses boucles causales*

Les boucles B_1 et B_2 sont disjointes, ce qui permet de calculer le déterminant du bond graph comme suit :

$$D(s) = 1 - \left[-\frac{R_1}{Ls} - \frac{1}{R_2 Cs} - \frac{m^2}{LCs^2} \right] + \left(-\frac{R_1}{Ls} \right) \left(-\frac{1}{R_2 Cs} \right) \tag{1.15}$$

Ainsi, la chaîne d'action liant l'entrée (*Se :U*) à la sortie (*De*) est comme suit :

$$T(s)=\frac{m}{LCs^2} \tag{1.16}$$

c'est un chemin causal indirect, il ne reste plus de boucles causales si on enlève du bond graph tous les liens, éléments et jonctions parcourus par cette chaîne d'action, donc $D_1(s)=1$.

La fonction de transfert associée au bond graph (***Fig. 1.20***) est donc :

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{\dfrac{m}{LCs^2}}{1+\dfrac{R_1}{Ls}+\dfrac{1}{R_2Cs}+\dfrac{m^2}{LCs^2}+\dfrac{R_1}{R_2LCs^2}} \tag{1.17}$$

ou, sous la forme habituelle en fonction de *s* :

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{\dfrac{m}{LC}}{s^2+\left(\dfrac{R_1}{Ls}+\dfrac{1}{R_2C}\right)s+\left(\dfrac{m^2}{LC}+\dfrac{R_1}{R_2LC}\right)} \tag{1.18}$$

1.8.3. Représentation d'état :

Le modèle d'état issu d'un bond graph a une forme parfaitement définie, puisque les variables d'état sont fixées de manière systématique. Le vecteur d'état, noté *x*, est composé des variables d'énergie *p* et *q* associées aux éléments *I* et *C* **[3, 7, 8]**. Les matrices (*A, B, C, D*) de l'équation d'état sont déterminées en regardant les différents chemins dans le bond graph, qui relient les éléments dynamiques (*I* et *C*) entre eux et aux éléments *R*, ainsi que les chemins qui relient ces éléments aux sources et aux capteurs.

Propriétés [7, 8] :

- Le vecteur d'état n'apparaît pas sur le bond graph, mais seulement sa dérivée : $\dot{x}=\begin{bmatrix} e_I \\ f_C \end{bmatrix}$,
- Si tous les éléments *I* et *C* sont en causalité intégrale, alors la dimension de *x* donne l'ordre du modèle,
- Si, parmi les *n* élément *I* et *C*, n_d sont en causalité dérivée, alors le vecteur *x* se décompose en x_i de dimension $n_i=n-n_d$, qui est l'ordre du modèle et x_d de dimension n_d.

Méthode systématique : Pour écrire le modèle d'état d'un bond graph (linéaire et non linéaire), il faut procéder de la manière suivante **[7, 8]**:

- écrire les lois de structure associées aux jonctions ;
- écrire les lois caractéristiques des éléments (*R, C* et *I*) en tenant compte de la causalité ;
- combiner ces différentes lois pour obtenir l'équation d'état.

Si tous les éléments *I* et *C* sont en causalité intégrale, alors l'équation d'état est sous forme d'équations différentielles ordinaires :

$$\begin{cases} \dot{x}=f(x,u,d) \\ y=g_y(x,u,d) \\ z=g_z(x,u,d) \end{cases} \tag{1.20}$$

où :

- u et d regroupent respectivement les entrées de commande (représentées sur le bond graph par MSe et MSf) et les entrées de perturbations (représentées par Se et Sf).
- y et z regroupent les variables de sortie à commander, sous forme d'efforts et de flux, composées de variables mesurées (De et Df) et non mesurées ($De*$ et $Df*$), et les mesures disponibles à partir des détecteurs d'effort et de flux (De et Df).

Exemple : Reprenons le système précédent de la figure (***Fig. 1.18***). On a deux (02) éléments dynamiques *I* et *C* en causalité intégrale, alors l'ordre du modèle d'état est 2. Le vecteur d'état est :

$$x = \begin{bmatrix} p_L \\ q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_3 \\ q_6 \end{bmatrix} \tag{1.21}$$

- écriture des lois structurelles :
  - jonction 1 : flux commun,

$$\begin{cases} f_1 = f_3, f_2 = f_3, f_4 = f_3 \\ e_3 = e_1 - e_2 - e_4 \end{cases} \tag{1.22}$$

  - jonction TF :

$$\begin{cases} e_4 = m e_5 \\ f_5 = m f_4 \end{cases} \tag{1.23}$$

  - jonction 0 : effort commun,

$$\begin{cases} e_5 = e_6, e_7 = e_6 \\ f_6 = f_5 - f_7 \end{cases} \tag{1.24}$$

- écriture des lois caractéristiques :
  - Elément R_1 : $\overset{2}{\dashv\!\!\rightarrow} R : R_1$

$$\begin{cases} e_2 = \Psi_{R_1}(f_2) \\ e_2 = R_1 f_2 = R_1 f_3 \end{cases} \tag{1.25}$$

  - Elément L : $\overset{3}{\rightarrow\!\!\dashv} I : L$

$$\begin{cases} f_3 = \dfrac{1}{L}\int e_3 dt \\ f_3 = \dfrac{1}{L} p_3 \end{cases} \tag{1.26}$$

  - Elément C: $\overset{6}{\dashv\!\!\rightarrow} C : C$

$$\begin{cases} e_6 = \dfrac{1}{C}\int f_6 dt \\ e_6 = \dfrac{1}{C} q_6 \end{cases} \tag{1.27}$$

  - Elément R_2 : $\overset{7}{\rightarrow\!\!\dashv} R : R_2$

$$\begin{cases} f_7 = \dfrac{1}{R_2} e_7 \\ f_7 = \dfrac{1}{R_2} e_7 \end{cases} \tag{1.28}$$

- combinaison des différentes lois : on trouve le modèle d'état du système comme suit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_3 \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_3 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{R_1}{L} & -\dfrac{m}{C} \\ \dfrac{m}{L} & -\dfrac{1}{R_2 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U \tag{1.29}$$

avec $U = Se$ est l'entrée du système, alors que l'équation de sortie est :

$y = De = e_6 = \dfrac{1}{C} q_6$ alors

$$y = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_6 \end{bmatrix} \tag{1.30}$$

d'où :

$$A = \begin{bmatrix} -\dfrac{R_1}{L} & -\dfrac{m}{C} \\ \dfrac{m}{L} & -\dfrac{1}{R_2 C} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{1}{C} \end{bmatrix}, D = 0$$

1.8.4. Représentation vectorielle [2, 3, 8] :

Le bond graph est un outil très efficace pour l'analyse structurelle et comportementale des systèmes. Le modèle issu du bond graph peut être considéré comme une structure de jonction reliée aux différents champs (***Fig. 1.21***) :

- Les sources,
- Les détecteurs,
- Le module de stockage d'énergie,
- Le module de dissipation d'énergie.

Les vecteurs associés à cette représentation sont :

- x : le vecteur d'état (composé de variables p et q), divisé en x_i et x_d associés respectivement aux composants en causalité intégrale et dérivée,
- $\dot{x}$: la dérivée du x par rapport au temps (variables e et f), divisé en $\dot{x}_i$ et $\dot{x}_d$,
- z : le vecteur complémentaire de $\dot{x}$ (variables f et e), divisé en $\dot{z}_i$ et $\dot{z}_d$,
- U : vecteur d'entrée (source *Se*, *Sf*),
- Y : vecteur de sortie (détecteurs *De, Df*),
- D_{in}, D_{out} : vecteurs d'entrée et de sortie des composants R .

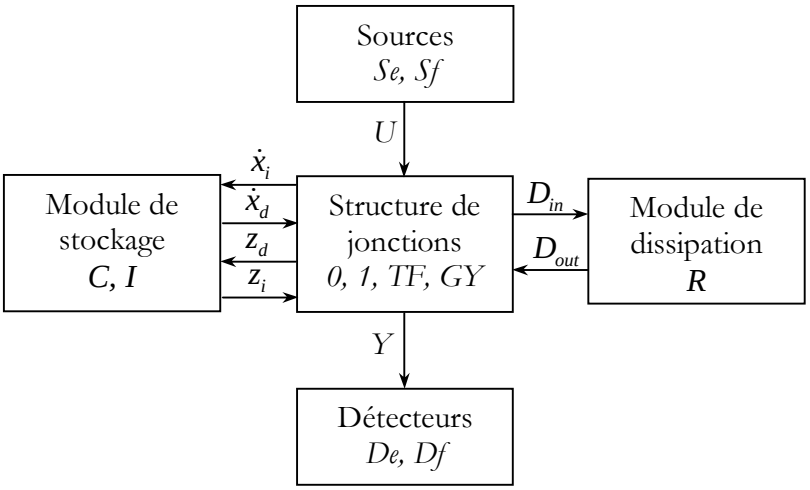


Fig. 1.21 : *Représentation vectorielle d'un modèle bond graph*

Cette représentation permet de construire la matrice de structure de jonction S suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \tag{1.31}$$

La matrice S possède $(n_c + n_s)$ lignes, avec n_c et n_s respectivement le nombre de composants (*I, R,* et *C*), et le nombre de capteurs du système (*De* et *Df*). Cette matrice est composée des éléments $0, -1, +1, m, r, 1/m$ et $1/r$, tel que *m* et *r* étant les modules de transfert des éléments *TF* et *GY*.

Les variables associées aux éléments *R, C,* et *I* sont liées entre elles par des relations linéaires ou non linéaires :

$$\begin{cases} z_i = F_i(x_i) \, ou \, z_i = F_i x_i \\ z_d = F_d(x_d) \, ou \, z_d = F_d x_d \\ D_{out} = L(D_{in}) \, ou \, D_{out} = L.D_{in} \end{cases} \tag{1.32}$$

Si le système est linéaire, certaines relations peuvent être exprimées sous forme de fonction de transfert :

$$\begin{cases} Z_d(s) = H'(s).\dot{X}_d(s) \\ Z_i(s) = H(1/s).\dot{X}_i(s) \end{cases} \tag{1.33}$$

avec L, $H'(s)$ et $H(1/s)$ sont des matrices carrées.

Remarque [3]: *Dans le cas d'éléments 1-ports, les matrices* L, $H'(s)$ *et* $H(1/s)$ *sont diagonales et inversibles. Quand le système comporte des éléments multiports, il est toujours possible de construire ces matrices qui ne sont plus diagonales et généralement non inversibles.*

Exemple : Considérons l'exemple précédent (***Fig. 1.18***), on a :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \begin{bmatrix} e_3 & f_6 \end{bmatrix}^T, \dot{x}_d = 0, z_i = \begin{bmatrix} f_3 & e_6 \end{bmatrix}^T, z_d = 0 \\ D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 & e_7 \end{bmatrix}^T, D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 & f_7 \end{bmatrix}^T \\ Y = \begin{bmatrix} e_8 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} e_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1.34)$$

La matrice de structure en jonction *S,* soit :

$$\begin{bmatrix} e_3 \\ f_6 \\ f_2 \\ e_7 \\ e_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -m & -1 & 0 & 1 \\ m & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ e_6 \\ e_2 \\ f_7 \\ e_1 \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Ce système est linéaire, alors :

$$\begin{cases} Z_i(s) = H\left(1/s\right)\dot{X}_i(s) \\ \begin{bmatrix} f_3 \\ e_6 \end{bmatrix}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{Ls} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_3 \\ f_6 \end{bmatrix}(s) \end{cases} \quad (1.36)$$

$$\begin{cases} D_{out} = L.D_{in} \\ \begin{bmatrix} e_2 \\ f_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ e_7 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1.37)$$

1.9. L'analyse structurelle par Bond graph :

L'analyse structurelle est nécessaire à plusieurs niveaux, dans la phase de conception comme dans celle de synthèse des lois de commande.

Une propriété structurelle est une propriété qui ne dépend pas des valeurs numérique des paramètres, mais dépend du type des éléments du système et la façon dont ils sont interconnectés.

L'analyse structurelle est caractérisée essentiellement par la notion du *rang structurel*, qui est lié à des propriétés de type commandabilité et observabilité **[4, 7, 8, 10]**.

1.9.1. Rang de la matrice d'état associée au bond graph :

Pour les modèles bond graph, l'étude de la matrice d'état *A* correspond à la détermination du nombre de valeurs propres structurellement nulles.

L'ordre *n* d'un modèle est égal au nombre d'éléments I et C en causalité intégrale lorsqu'on met le bond graph en causalité intégrale préférentielle, qui est aussi la dimension de la matrice d'état.

Théorème [4, 7, 8] : *Le rang structurel de la matrice d'état A, noté q , associé à un modèle bond graph est donné par la différence entre le nombre d'éléments dynamiques I et C en causalité intégrale préférentielle, noté n, et le nombre d'éléments dynamiques I et C en causalité intégrale quand on met le bond graph en causalité dérivée préférentielle, noté k.*

$$q = n - k \quad (1.38)$$

Exemple : Soit le système précédent (***Fig. 1.18***), le rang structurel de la matrice d'état associée à son modèle bond graph est $q = 2 - 0 = 2$, (***Fig. 1.22***).

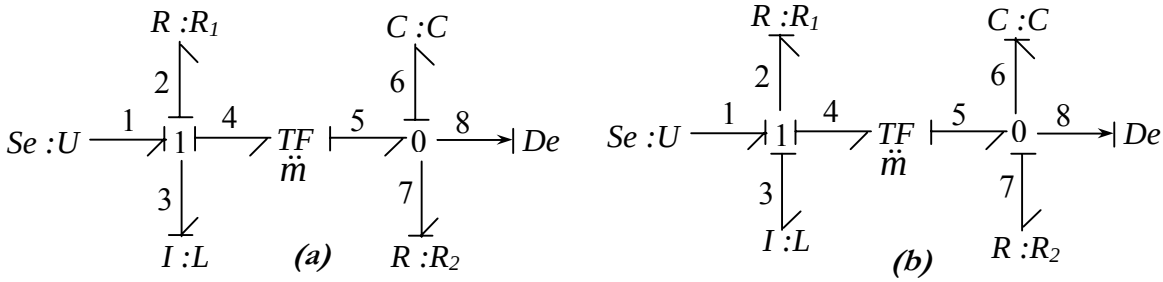


Fig. 1.22 : *Bond graph d'un système de rang 2* ***(a)*** *en causalité intégrale* ***(b)*** *en causalité dérivée*

On remarque que tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée quand on met le bond graph en causalité dérivée préférentielle.

1.9.2. Commandabilité structurelle :

Pour effectuer le calcul d'une loi de commande d'un processus donné, il est, en général, nécessaire de s'intéresser aux propriétés de commandabilité et d'observabilité du modèle d'état, car celles-ci conditionnent la possibilité ou non d'envisager telle ou telle stratégie.

Définition : La notion de dualisation des sources et des détecteurs consiste à inverser ses causalités, c.-à-d. transformer une source (ou détecteur) d'effort (respectivement de flux) en une source (ou détecteur) de flux (respectivement d'effort).

Théorème [4, 7, 8, 10]: *Un système modélisé par bond graph est structurellement commandable si et seulement si les deux conditions suivantes soient respectées :*

i. *Il existe un chemin causal liant une source à chaque élément dynamique I et C en causalité intégrale préférentielle ;*
ii. *Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée quand on met le bond graph en causalité dérivée. Si les éléments dynamiques I et C restent en causalité intégrale, la dualisation des sources doit permettre de les mettre en causalité dérivée.*

1.9.3. Observabilité structurelle [7] :

Un modèle bond graph est structurellement observable en état si et seulement si les conditions suivantes soient vérifiées :

i. *Sur le modèle bond graph en causalité intégrale, il existe un chemin causal entre les éléments dynamiques I et C et un détecteur ;*
ii. *Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée quand on met le bond graph en causalité dérivée préférentielle. Si des éléments I et C restent en causalité intégrale, la dualisation des détecteurs doit permettre de les mettre en causalité dérivée.*

Exemple : Considérons le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle suivant (***Fig. 1.23***) :

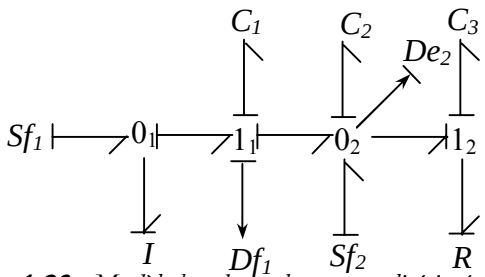


Fig. 1.23 : *Modèle bond graph en causalité intégrale d'ordre 4*

Afin d'étudier la commandabilité et l'observabilité structurelle de ce système, on met le bond graph en une causalité dérivée comme illustré ci-après (***Fig. 1.24***):

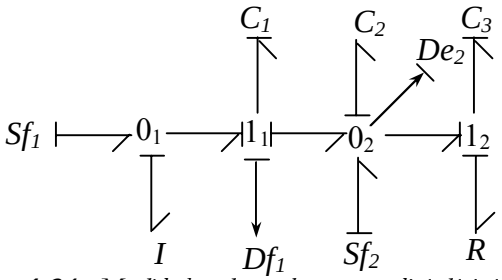


Fig. 1.24 : *Modèle bond graph en causalité dérivée du système*

On trouve qu'il y a un élément C (C_2) qui reste en causalité intégrale, donc le rang de ce système est $q = 3$.

Pour vérifier la commandabilité du système :

1. il existe un chemin causal entre chaque élément I et C et les sources Sf_1 et Sf_2.
2. pour faire passer l'élément C_2 en causalité dérivée, on essayera tout d'abord de dualiser la source Sf_1 (***Fig. 1.25.a***), puis Sf_2 (***Fig. 1.25.b***) :

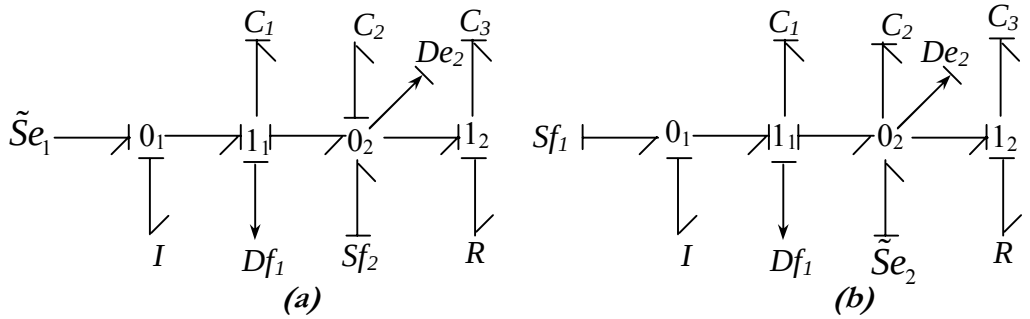


Fig. 1.25 : *Dualisation de la source Sf_1* ***(a)*** *puis Sf_2* ***(b)***

Cependant, comme nous pouvons le constater, la dualisation de la source Sf_1 ne permet pas de passer l'élément C_2 en causalité dérivée (au contraire, un conflit causal apparaît). Ceci s'interprète comme une non commandabilité structurelle de l'état par Sf_1. Si on dualise maintenant la source Sf_2, on peut passer l'élément C_2 en causalité dérivée, donc on peut dire que l'état est commandable par la source Sf_2.

Même chose pour l'étude de l'observabilité, on dualise le détecteur Df_1, s'il ne passe pas, on dualise le détecteur De_2, comme le montre la figure (***Fig. 1.26***) :

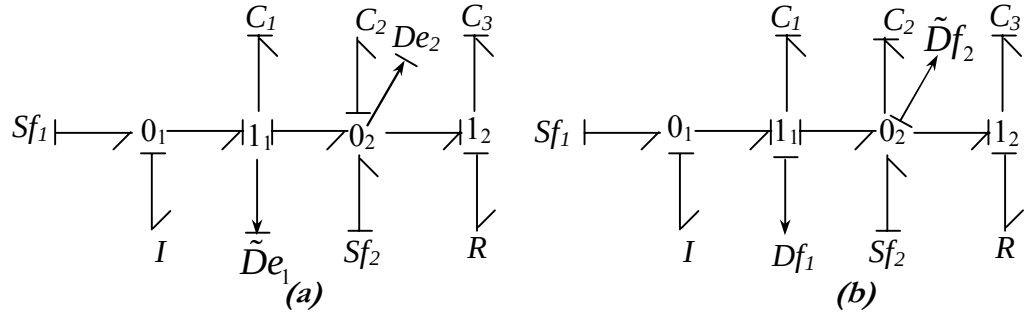


Fig. 1.26 : *Dualisation de détecteur* ***(a)*** *Df_1* ***(b)*** *De_2*

On constate que la dualisation du détecteur Df_1 ne permet pas de passer l'élément C_2 en causalité dérivée, donc l'état n'est pas observable par ce détecteur, mais la dualisation de De_2 le permet, d'où l'observabilité de l'état par ce détecteur.

1.10. Les Bond graphs et la modélisation Orienté Objet :

1.10.1. La modélisation orienté objet:

A. Définition de l'approche orienté objet:

La complexité et la taille agrandissante des applications et les problèmes de maintenance ont mis en évidence de promouvoir l'abstraction des données sous forme d'un modèle adéquat. Une telle modélisation consiste à intégrer des modèles hétérogènes et les utiliser dans des applications multiples. Cependant, le besoin d'uniformisation des représentations de connaissances des modèle hétérogènes induit l'utilisation de la programmation orienté objet (P.O.O.), qui permet une modélisation aidée par l'encapsulation des attributs, une conception naturelle car homomorphique à l'entité représentée et une simulation facilitée par l'envoi de messages. De même, elle facilite l'écriture de programmes de modélisation, de simulation ou de la conception assistée.

Dans la technologie objet, on crée des modèles possédant différents niveaux de détail et de profondeur pendant les phases d'analyse et de conception. L'analyse orienté objet (O.O.A) est l'analyse d'un système du monde réel; le résultat est un modèle qui comprend un certain nombre d'objets. Chaque objet du modèle correspond à un objet du monde réel; c'est-à-dire qu'il y a une projection naturelle du domaine problème sur le domaine de la modélisation. Les objets du modèle doivent être des concepts du domaine de l'application **[76]**.

B. Caractéristique de la modélisation orienté objet:

L'approche orienté objet pour la modélisation se caractérise par **[36]**:

1. **Objet:** Les composants du modèle du processus physique sont considérés comme des objets. Cependant, les modèles de base comprend des paramètres hérités comme des données provenant du monde extérieur à travers les interfaces et les équations constitutives. Il y a une correspondance aux objets de programmation orienté objet. Les modèles sont vus comme une agrégation des données avec leurs méthodes de traitement.
2. **Modèle hiérarchique:** Un modèle du système est composé de sous modèles. C'est la composition naturelle hiérarchique d'un système physique.
3. **Instanciation:** Les modèles et les sous modèles des composants sont instantiés de modèles génériques ou classes.
4. **Héritage:** Si un sous modèle est instancié à un autre modèle, leurs propriétés sont héritées par le modèle.
5. **Encapsulation:** Les connaissances contenues dans un modèle sont encapsulées. Seulement les parties prédéfinies sont accédées par les manières prédéfinies via l'interface au monde extérieur de l'objet.
6. **Connexion des sous modèles:** Les sous modèles sont connectés entre eux selon la structure physique du système.

Remarques:

1- La propriété (4) implique que les connaissances valables sont réutilisées permettant plus de sécurité de développement du modèle. Seulement la propriété particulière des sous modèles est spécifiée, les autres propriétés communes avec les superclasses sont utilisées sans aucune modification

2- Les composants techniques sont interconnectés par le fil électrique, les manches mécaniques, les conduites hydrauliques, tant que les processus physiques interagissent par l'échange d'énergie, de masse, ou de l'information. Dans ce cas, il y a une influence mutuelle entre les objets.

1.10.2. Les bond graphs en vue d'une approche orienté objet:

Bien que la modélisation bond graph est plus ancienne que la modélisation orienté objet et en plus elle n'est pas inspirée d'une approche particulière objet, mais elle présente des caractéristiques, elle peut être vue comme celle de l'approche objet. Les caractères communs de ces deux méthodes sont:

1. **Objet:** La notion d'objet n'est pas la clé de la modélisation bond graph, les phénomènes physiques avec leurs composants génériques et la façon de leurs interconnexions sont le point de départ de l'approche bond graph. Du point de vue objet, ses composant représentés par des nœuds en bond graph peuvent être considérés comme des objets.
2. **Modèle hiérarchique:** Dans la modélisation bond graph, on prend le processus comme des sous modèles qui inter-changent de la puissance. C'est le modèle hiérarchique appelé word bond graph ou bond graph à mots.
3. **Instanciation:** Dans la modélisation bond graph, les modèles de mécanismes énergétiques fondamentaux sont notés par des symboles réservés. Un nœud en bond graph représentant un processus de base peut être vu comme une instanciation du modèle générique qui lui correspond. Les annotations sont ajoutées au nœud caractérisant la particularité du modèle et le distingue des autres instanciations du modèle générique.
4. **Héritage:** Le processus d'instanciation, c'est-à-dire copier et adapter un modèle implique que les propriétés de la super classe sont héritées par le modèle instancié.
5. **Encapsulation:** Puisque le modèle bond graph peut être accédé par son interface de ports de puissance ou des ports de signal respectivement, le principe d'encapsulation de la connaissance est aussi pris dans le modèle bond graph. Le modèle de stockage ne passe pas leur valeur de variable d'état à travers les ports incidents adjoints, donc la variable d'état représente une information encapsulée.
6. **Connexion des sous modèles:** Finalement, puisque les sous modèles bond graph sont connectés entre eux selon la façon de leurs composants correspondants échangent de la puissance avec les autres, il y a une forte affinité topologique entre la structure bond graph et la structure du système physique.

Dans l'approche objet, la communication entre les objets est assurée par des messages. On peut voir les liaisons en bond graph (demi flèche) et par l'attribution de la causalité convenable, comme des signaux de communication entre ces nœuds. Cette correspondance entre les deux approches de modélisation permet d'implanter des programmes voir des logiciels de simulation des modèles bond graph par l'utilisation de la programmation orienté objet. Cependant, ils existent quelques uns qui intègrent dans leurs bibliothèques des éléments bond graph comme 20-sim de l'université de Twente (Netherlands), Symbols 2000, Camp-G, MS1, …etc.

1.11. Conclusion:

On conclue ce chapitre par la remarque vue sur la richesse de l'outil bond graph en tant que support pour l'étude des systèmes complexes, de la modélisation à la simulation, de l'analyse à la synthèse des lois de commande. On a présenté dans ce chapitre l'outil bond graph et ses caractéristiques en mono-énergie (simple domaine de représentation). Toutefois, il est capable de représenter des phénomènes physiques où différents domaines physiques interagissent, il est appelé bond graph multi-énergie (le lien comporte plusieurs variables de puissance). Cependant, toute les propriétés décrites précédemment (affectation de causalité, mise en équation, analyse, …etc.) restent valable

pour le bond graph multi énergie. Il faut encore signaler l'existence du pseudo bond graph pour la modélisation des domaines physiques où le produit effort-flux n'a pas de sens physique comme dans l'hydraulique, la thermodynamique, et la chimie. Plus de détail sur ces concepts sera le sujet du chapitre 3. Le chapitre suivant présente un état de l'art sur la surveillance des processus.

Chapitre 2

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART SUR LA SURVEILLANCE

2.1. Introduction :

Le diagnostic industriel dont la vocation première, est le savoir détecter et localiser les défaillances de matériels dans les systèmes industriels. Il joue un rôle primordial pour contribuer à faire gagner des points de disponibilité et de productivité des capitaux investis dans l'outil de production, soit par l'amélioration des produits fabriqués et/ou essentiellement savoir éviter les dégradations fonctionnelles qui mènent à des arrêts indésirables de production ou des accidents catastrophiques.

Les travaux de recherche sur le diagnostic ont mobilisé ces dernières années une large communauté internationale de chercheurs, donnant naissance à plusieurs approches et méthodes sur ce sujet. Suivant la complexité et la forme de connaissance sur le système étudié, on distingue souvent les méthodes de surveillance à base ou sans modèle.

Ce chapitre à pour but de présenter les notions et les outils nécessaires pour la conception des système de surveillance, avec une classification des méthodes connues pour ce sujet. Un état de l'art sur l'utilisation de l'approche bond graph pour la surveillance est donné à la fin de ce chapitre, avec un exemple illustratif sur une méthode direct de génération des résidus auprès de la structure du modèle bond graph.

2.2. Définitions et terminologies :

2.2.1. Définitions :

- **Définition 1 :** Un *processus industriel* est un assemblage fonctionnel de composants technologiques qui assure la fabrication d'un produit ou fournit un service.
- **Définition 2 :** Un *processus physique* est caractérisé par l'ensemble de trois variables :
  - des entrées de commande, qui permettent d'agir sur l'évolution du processus ;
  - des sorties, variables mesurables ou au moins détectables, qui caractérisent l'action du processus sur son environnement ;
  - des variables d'état, variables internes du système, dont l'action sur l'environnement n'est pas nécessairement perceptible directement mais dont l'évolution régit celle du processus.

Ces variables peuvent être influencées par des perturbations ou entrées inconnues non contrôlées. Un tel processus peut être représenté par la figure suivante (**Fig. 2.1**) :

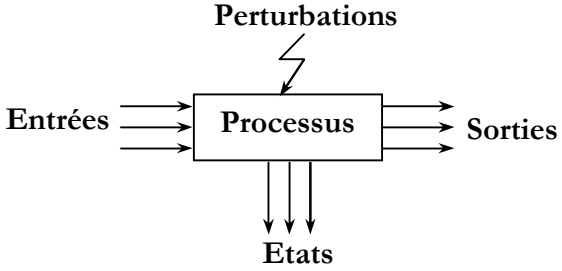


Fig. 2.1 : *Représentation générale d'un processus*

- **Définition 3 :** Un *défaut* est considéré comme tout écart entre la caractéristique d'une entité et sa caractéristique normale. Le défaut est en général une imperfection liée à la conception ou à la mise en œuvre d'un dispositif. Un défaut peut rester caché un certain temps avant de donner lieu à une défaillance.
- **Définition 4 :** Une *défaillance* est une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour que sa mission ne

soit pas assurée dans les conditions prévues. Une défaillance conduit à un défaut, mais le défaut n'induit pas nécessairement une défaillance **[39]**.

- **Définition 5 :** Une *panne* est l'interruption permanente de la capacité du système à réaliser une fonction requise sous des conditions de fonctionnement spécifiées. La panne résulte toujours d'une défaillance et elle introduit en plus la notion d'arrêt accidentel du fonctionnement du système **[2, 41]**.
- **Définition 6 :** Un *dysfonctionnement* est une irrégularité intermittente dans la réalisation d'une fonction désirée du système **[42]**.
- **Définition 7 :** Une *erreur* est l'écart entre une valeur mesurée ou estimée et la vraie valeur spécifiée ou théoriquement correcte **[2, 42]**.
- **Définition 8 :** Un *symptôme* est le changement du comportement d'une quantité observable, qui sort du domaine définissant son comportement normal **[42]**.
- **Définition 9 :** Les *contraintes* sont des limitations imposées par la nature (lois physiques) ou par l'opérateur.
- **Définition 10 :** Un *résidu* est un indicateur de défaut, qui exprime l'incohérence entre les informations théoriques fournies par un modèle **[2, 42]**.
- **Définition 11 :** Une *entrée inconnue* ou *perturbation* est un signal non mesurable et non commandable agissant sur le système. La notion d'entrée inconnue inclut les erreurs de modélisation ainsi que les bruits du système et de la mesure **[42]**.

2.2.2. Classification des défauts :

Du point de vue de la surveillance, les défauts peuvent être classés selon leurs origines en (**Fig. 2.2**) :

- **Défauts du processus :** On distingue deux types :
  - défaillances dues à des entrées inconnues agissant sur le processus ;
  - défaillances dues à des modifications des paramètres du modèle représentant l'installation.
- **Défauts capteurs :** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.
- **Défauts d'actionneurs :** Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et les sorties d'actionneurs.
- **Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande :** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

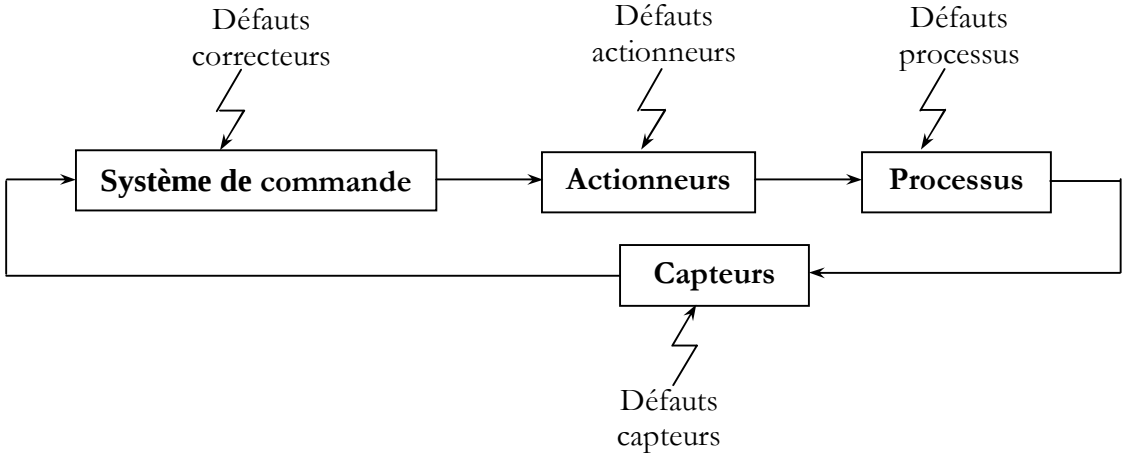


Fig. 2.2 : *Types de défaillances affectant un système physique*

2.2.3. Modes de fonctionnement des systèmes :

Un système possède généralement plusieurs modes de fonctionnement. Ces modes correspondent au fait que la mission, pour laquelle le système a été conçu, est totalement, partiellement ou pas du tout remplie. Ceci permet de classer les modes de fonctionnement de la façon suivante **[41]**:

- **Modes de fonctionnement normaux :** La mission est accomplie. Plusieurs modes de fonctionnement nominaux permettent d'obtenir l'adéquation avec l'objectif de la mission. Un mode de fonctionnement peut s'écarter du fonctionnement nominal tout en restant normal.
- **Modes de fonctionnement anormaux :** La mission n'est que partiellement ou pas du tout remplie. Le service n'est pas satisfaisant voir critique. Ces modes peuvent correspondre aux **modes interdits** (le système ne doit absolument pas fonctionner dans ces modes pour des raisons de sécurité), aux **modes défaillants** (mauvais fonctionnement du système), aux **modes dégradés** (la mission est partiellement remplie ou elle est remplie avec des performances moindres), aux **modes critiques** (les caractéristiques de fonctionnement sont particulières et généralement non souhaitées).
- On peut aussi définir des **modes de fonctionnement d'exception** (ils sont normaux ou anormaux mais aussi peu tolérés ou fréquents), d'**indisponibilité** (le système ne peut pas accomplir sa mission) ou **évolutifs** (modes transitoires de passage d'un mode de fonctionnement à un autre).

2.2.4. But, fonctions et conception des systèmes de surveillance :

a- But de la surveillance : Le but de la surveillance est de concevoir un système capable de produire une alarme définissant la présence d'un défaut dans une ou plusieurs parties du système à surveiller dans les meilleurs délais, vis-à-vis des perturbations, des bruits et des incertitudes.

A partir d'une base de données brutes, qui est l'ensemble des données disponibles aux opérateurs (mesures, algorithmes de commande, algorithmes de décision, … etc.), on peut créer pour la surveillance une base de données validées (données brutes si la cohérence prouvée, estimées sinon) et une base de données enrichies qui nous donne les informations sur les incohérences (**Fig. 2.3**).

b- Fonctions de la surveillance : Pour bien maîtriser les systèmes industriels, il est nécessaire de savoir détecter un défaut en présence d'autres effets (bruits de mesures, perturbations, erreurs de mesures), de le localiser (processus, capteurs, actionneurs ou système de commande) et de le diagnostiquer si possible (instant d'apparition, amplitude, … etc.).

La surveillance consiste à réaliser les tâches suivantes :

1. **Détection du défaut :** consiste à indiquer la présence d'un défaut par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal.
2. **Localisation du défaut :** consiste à localiser l'élément défectueux (capteurs, actionneurs, composants de processus, … etc.) par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous certaines hypothèses de défaillance.
3. **Diagnostic ou identification du défaut :** correspond à déterminer son amplitude, son comportement temporel, l'instant d'apparition, …etc. Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information provenant d'une

inspection, d'un contrôle ou d'un test sur le processus **[39]**, donc le problème de diagnostic consiste à résoudre le problème inverse de la relation de cause à effet connaissant principalement l'effet par ses symptômes observables (signatures vibratoires, acoustiques, thermiques, magnétiques, électriques, radiographiques, … etc.).

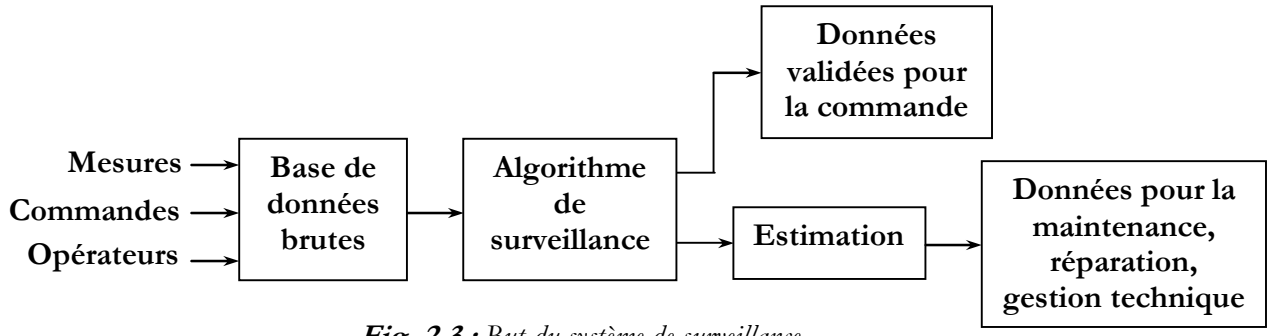


Fig. 2.3 : *But du système de surveillance*

En résumé, on peut dire que le système de surveillance suit les étapes suivantes **[2]**(**Fig. 2.4**) :

- Acquisition des informations : données théoriques + mesurées ;
- Etape de détection : test sur la cohérence entre le modèle et l'observation ;
- Etape de décision : décider si le système est en défaut ou non ;
- Etape de diagnostic : définir le comportement défaillant ainsi que leur cause.

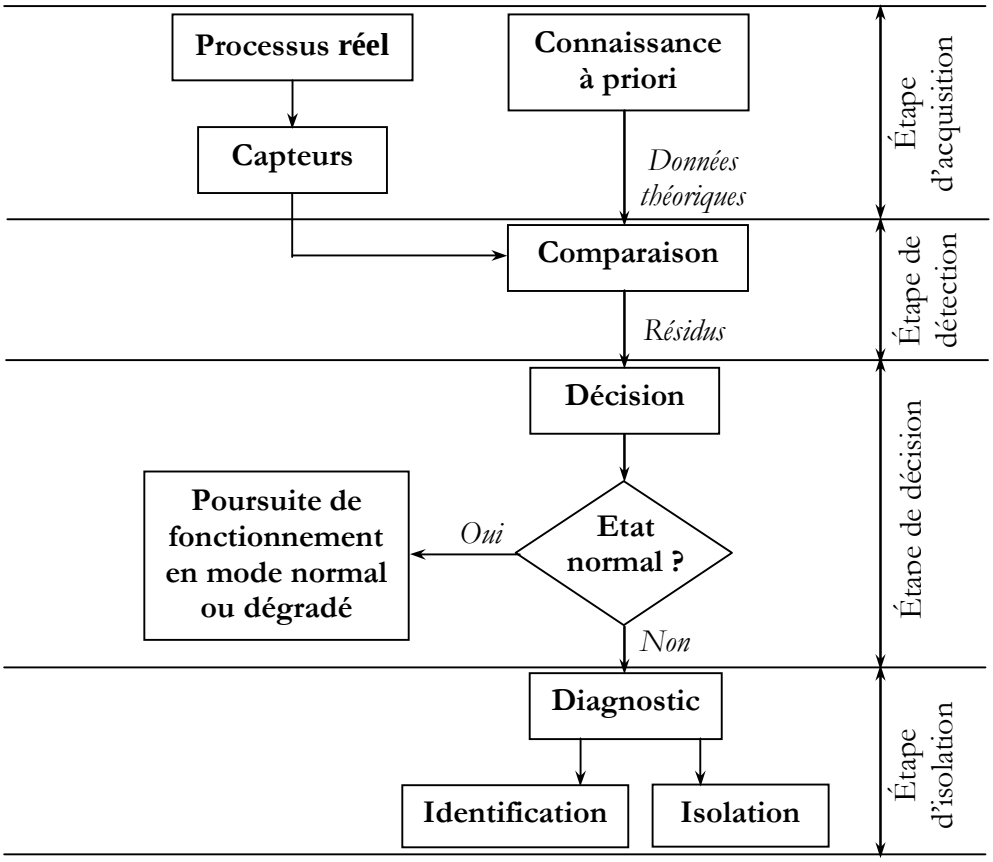


Fig. 2.4 : *Les étapes de surveillance*

c- Conception d'un système de surveillance : La conception d'un système de surveillance est basée sur un cahier des charges qui contient les objectifs, les critères de qualité et les contraintes posées par le processus à surveiller.

1- **Définition des objectifs :** Le cahier des charges de la surveillance doit préciser les composants et les défaillances associées qui doivent être détecter et /ou localiser. On peut les formaliser sous forme :
   - d'une liste des paramètres à surveiller.
   - des données sur les écarts non admissibles.

2- **Définition des critères de qualité:** Le cahier des charges fixe les critères de qualité concernant la détection, la localisation et le diagnostic. On peut résumer ces critères en :
   - Sensibilité aux défauts (les non détections des défauts à faible amplitude) ;
   - Rapidité de détection (meilleur délai de détection) ;
   - Robustesse (limiter voir ignorer les fausses alarmes dues aux entrées perturbatrices) ;
   - Techniques de localisation des défauts à faible amplitude ou les défauts affectant plusieurs variables du système.

3- **Définition des contraintes :** Le cahier des charges doit préciser l'ensemble des contraintes faces au système de surveillance, parmi eux, on distingue :
   - la base de données disponibles (brutes, incomplètes, …) ;
   - le coût, la maintenabilité, la complexité, … etc. du système de surveillance.

Enfin, le concepteur du système de surveillance doit être en mesure de définir une architecture d'instrumentation optimale pour assurer le bon service du système (choix et placement de capteurs).

2.2.5. Classification des méthodes de surveillance :

Le principe général des systèmes de surveillance consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement nominal (pour la détection) ou de ses fonctionnements défaillants (pour la localisation). La forme sous laquelle cette connaissance est disponible conditionne le choix de la méthode utilisée pour la conception du système de surveillance.

Les méthodes de surveillance et de diagnostic se répartissent en deux grandes classes selon que l'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. Dans le premier cas, différents types de fonctionnement sont décrits par des modèles de comportement, alors que dans le deuxième cas, les différents types de fonctionnement sont décrits par les données de certains nombres de points expérimentaux.

A. Méthodes à base de modèle : La détection de défaut basée sur l'utilisation des modèles peut être organisée en deux étapes : la génération des résidus et la prise de décision. La génération des résidus s'effectue en comparant les données brutes aux données délivrées par les modèles (**Fig. 2.4**)**[38]**. Dans cette étape on distingue trois grandes classes fondées respectivement sur l'estimation paramétrique **[57-61]**, l'estimation d'état ou de sortie -Observateurs de Luenberger ou Filtres de Kalman linéaires et non linéaires- **[37-38]** et le principe de la redondance qui peuvent être physiques (utilisation de plusieurs capteurs pour la mesure d'une même variable) ou analytique **[37, 43, 52]**.

Ils existent d'autres méthodes à base de modèle qui utilisent l'approche structurelle tels que : le bond graph **[2-3, 10, 14-16, 18-19, 27-31]**, l'analyse structurelle **[41, 53]**, la modélisation fonctionnelle et matérielle (arbre fonctionnel, arbre de

défaillance, … etc.)**[39]**, la théorie des graphes simples et signés **[54]**. Seules les méthodes par bond graphs seront développées par la suite.

B. Méthodes sans modèle : Les méthodes sans modèle s'appuient sur des données enregistrées sur le fonctionnement du processus, qui sont un résumé de la connaissance à priori, et c'est la position d'une nouvelle observation vis-à-vis de ces données qui définit le diagnostic. Donc, c'est l'analyse de données fournies par le système qui permet de décider son état de fonctionnement. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle qui peuvent intégrer aussi la connaissance humaine sous forme de règles linguistiques.

On peut citer parmi les méthodes sans modèle, celle de la reconnaissance de formes **[39, 51]**, de l'approche statistique **[37]**, de l'analyse de données (analyse en composante principale PCA **[46-47, 50]**) et de l'intelligence artificielle (système expert **[39, 51]**, logique floue **[44-45, 57, 73]**, et réseaux de neurones **[39, 73]**).

2.3. Méthodes de surveillance à base de modèle :

2.3.1. Modélisation des systèmes :

- **Définition 12 :** Un modèle est une reproduction d'un objet, c.-à-d. une représentation formalisée d'un phénomène.
  Trois types de modèles peuvent être considérés **[40, 43]** :
  - **Les modèles fonctionnels :** Ils sont représentés de manière graphique et construits à l'aide de diagrammes élémentaires organisés en réseaux hiérarchiques.
    - *Les modèles structurels :* ils sont représentés sous forme de tables remplies de « 0 » et de « 1 ». Cette représentation binaire exprime l'existence ou non de lien entre les variables de description du système. Ce modèle est utilisé pour l'analyse structurelle des systèmes **[53]**. On peut passer du modèle bond graph au modèle structurel par l'application d'une procédure présentée dans **[3, 10]**.
    - *Les modèles de comportement :* Ils sont représentés sous forme de relations liant les variables de description du système. Ces relations peuvent être analytiques (statiques ou dynamiques), qualitatives (équations de confluence) ou bien se présenter sous forme de règles de production (bases de connaissance).
    On considère les modèles de comportement représentés par les équations différentielles, qui s'écrivent sous la forme d'état continue standard suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, w) \\ y = h(x, w) \end{cases} \tag{2.1}$$

où $x \in \Re^n$ est le vecteur d'état, $w \in \Re^m$ est le vecteur des signaux d'excitation, $y \in \Re^p$ est le vecteur des sorties mesurées. Les fonctions $f(.)$ et $h(.)$ sont des fonctions analytiques quelconques.

Le vecteur w est composé de quatre types de signaux différents : $w = \left(u^T \; v^T \; \varphi^T \; \vartheta^T\right)^T$ avec,

- $u \in \Re^{m_u}$ est le vecteur des entrées de commande,
- $v \in \Re^{m_v}$ est le vecteur des signaux de perturbations qui ne se modélisent pas sous la forme stochastique,
- $\varphi \in \Re^{m_\varphi}$ est le vecteur des pannes,
- $\vartheta \in \Re^{m_\vartheta}$ est le vecteur des signaux modélisés par un processus stochastique. Ces signaux représentent l'influence des bruits de mesure et des erreurs de modélisation.

Suivant la composition de *w*, il est possible de qualifier de deux manières différentes les modèles d'états :

- **Les modèles de fonctionnement normal (**de référence ou sain**) :** Ces modèles ne prennent pas en compte les pannes :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u,v,\vartheta) \\ y = h(x,u,v,\vartheta) \end{cases} \quad (2.2)$$

- **Les modèles de fonctionnement défaillants :** Ces modèles introduisent les défauts dans les signaux d'excitation. Ces types de modèle sont indispensables pour la localisation des défauts :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u,v,\varphi,\vartheta) \\ y = h(x,u,v,\varphi,\vartheta) \end{cases} \quad (2.3)$$

En fonction de défauts qu'il représente, le vecteur de pannes φ peut être scindé en deux sous vecteurs, φ_{act} et φ_{capt}.

- $\varphi_{act} \in \Re^{m_{\varphi act}}$ symbolise les pannes intervenant dans l'équation d'état et éventuellement dans l'équation de sortie (par exemple les pannes actionneurs),
- $\varphi_{capt} \in \Re^{m_{\varphi capt}}$ symbolise les pannes capteurs. Elles interviennent dans l'équation de mesure.

Le modèle (2.3) s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u,v,\varphi_{act},\vartheta) \\ y = h(x,u,v,\varphi_{act},\varphi_{capt},\vartheta) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3.2. Génération des résidus :

Comme on a dit précédemment, les résidus sont des signaux indicateurs; de défauts. Dans un système de surveillance, on associe à chaque élément du processus ou autres (capteurs, actionneurs, …), un résidu qui indique la cohérence entre le modèle et le fonctionnement réel.

La génération des résidus est propre au modèle que l'on dispose sur le système à surveiller. On distingue deux approches :

a- *Méthodes à base de modèle de bon fonctionnement* :

Cette méthode consiste à faire une comparaison entre le fonctionnement réel et le modèle de fonctionnement normal non défaillant (du bon fonctionnement) (***Fig. 2.5***). Le résultat est les résidus (indicateurs de défaillance), alors la surveillance sera faite par des tests sur ces résidus.

On peut utiliser pour la génération des résidus par cette méthode le modèle (2.2).

b- *Méthodes à base de modèle de fonctionnement défaillant* :

La comparaison dans cette méthode est faite entre le fonctionnement réel et un ou plusieurs modèles de fonctionnement défaillant (***Fig. 2.6***). Cette méthode est très efficace surtout pour l'isolation de défauts et le diagnostic des défaillances.

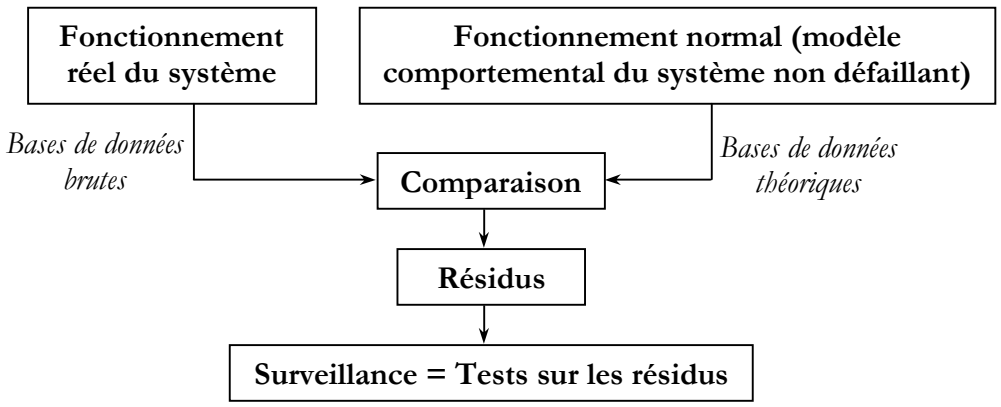


***Fig. 2.5** : Génération des résidus à base de modèle de bon fonctionnement*

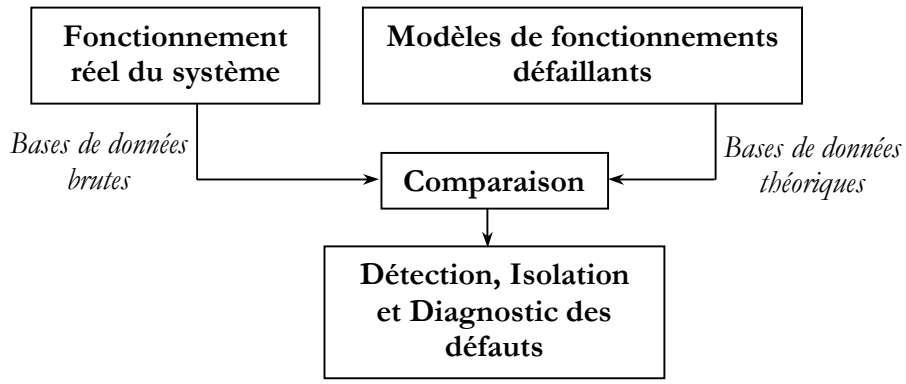


***Fig. 2.6** : Génération des résidus à base de modèle de fonctionnement défaillant*

2.3.3. Approches de génération des résidus :

Ils existent plusieurs approches de génération des résidus à base de modèle, parmi lesquelles on a :

- Pour les systèmes linéaires :
  - Identification des paramètres,
  - Estimation d'état ou de sortie,
  - Projection dans l'espace de parité.
- Pour les systèmes non linéaires :
  - Linéarisation autour d'un point de fonctionnement,
  - Identification des paramètres non linéaires,
  - Théorie d'élimination des variables inconnues (méthode de Gauss),
  - Utilisation des observateurs non linéaires.

On se limite dans cette partie aux méthodes appliquées aux systèmes linéaires.

A. Identification des paramètres :

Les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour estimer les différentes valeurs des paramètres du modèle utilisé pour la représentation du système. Après la validation du modèle, le processus d'identification reste en temps réel. Les résidus sont ensuite générés simplement, en comparant les valeurs estimées des paramètres avec les valeurs nominales. Le vecteur des résidus est alors :

$$r(t) = \begin{bmatrix} \theta_p^* \\ \theta_m^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\theta}_p(t) \\ \hat{\theta}_m(t) \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

où $\hat{\theta}_p(t)$ et $\hat{\theta}_m(t)$ sont les paramètres du processus et du système de mesure estimées à l'instant t , et

θ_p^* et θ_m^* sont les valeurs nominales.

Dans cette approche, une alarme est associée à chaque résidu, c.-à-d. à chaque paramètre surveillé du processus. Son déclenchement est représentatif d'un écart anormal entre la valeur nominal du paramètre et sa valeur réelle. Tous les modèle ou les algorithmes d'identification reconnus peuvent être utilisés pour cette approche, du continu au discret **[60]** (lois de distribution, modèles de conduite, modèle de connaissance) , et aussi les méthodes adaptatives et hybrides **[57, 61]**.

B. Estimation d'état ou de sortie :

La génération des résidus à l'aide de l'estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \tag{2.6}$$

Ils existent plusieurs travaux sur ce contexte, celles qui utilisent le filtre de *Kalman* (reconstructeur d'état dans le milieu stochastique) dans le cas linéaire **[59]** ou étendu **[55]**, ou qui utilisent les observateurs de *Luenberger* sous différentes versions, à modèle de connaissance **[44]**, robuste **[45, 58]**, à entrées inconnues (*UIO : Unknown Input Observer*) **[56]**, à grand gain ou à mode glissant **[43]**. La théorie de conception des systèmes de surveillance par l'estimation d'état ou de sortie est développée dans **[37-38]**.

C. Espace de parité :

La connaissance à priori sur le système est représentée par un modèle d'évolution et d'observation et par des caractéristiques statistiques des signaux mesurés. La génération des résidus consiste à construire un espace de parité obtenu en effectuant une projection orthogonale des relations du modèle de référence à l'espace des observations.

A partir des ces modèles, on peut définir différents types de redondance auxquels sont attachées différentes méthodes de localisation de pannes.

1. **Redondance directe :** Appelée aussi redondance matérielle ou physique. Elle se produit lorsqu'on dispose de plusieurs systèmes de mesures identiques dont le sorties sont égales, aux phénomènes parasites présents.

   La détection de défaut nécessite la génération de résidus qui peuvent être obtenus par différentes manières :

   - Par comparaison deux à deux des mesures délivrées par capteurs,
   - Par comparaison de chaque mesure à la médiane de l'ensemble des autres mesures délivrées par les capteurs mesurant la même grandeur physique.

   Cette approche n'est dédiée qu'aux pannes capteurs. De plus le coût, l'encombrement et la probabilité de défaillances de mode commun constituent les inconvénients majeurs de cette approche.

2. **Redondance statique :** Les mesures sont liées par des relations algébriques, fonctions ou non du temps. Dans le cas linéaire, les mesures redondantes sont modélisées par l'équation suivante :

$$y = Cx + h(u, v, \varphi, \vartheta) \tag{2.7}$$

pour qu'il y ait une redondance, il faut, bien sûr, que le nombre de paramètres soit inférieur au nombre de mesures. Les équations de redondance s'obtiennent en éliminant l'état x par la recherche d'une matrice (vecteur) W orthogonale à C :

$$r = Wy = Wh`(u, v, \varphi, \vartheta) \tag{2.8}$$

Les vecteurs lignes de W définissent l'espace de parité statique **[40]**, alors que les équations de parité (résidus) sont fonctions des signaux d'entrées (bruits, pannes, …).

Par cette méthode, le système de surveillance effectue les traitements suivants :

- ✓ Calculer le vecteur $r = Wy$,
- ✓ Tester les propriétés statistiques des résidus (décision) :
  - ➢ Si elles sont celles associées aux bruits et/ou perturbations, alors $\varphi = 0$ (pas de défaillance),
  - ➢ Sinon, il y a lieu une ou plusieurs défaillances,
  - ➢ Localiser le(s) capteur(s) défaillant(s).

3. **Redondance dynamique ou analytique :** La redondance analytique consiste à trouver des relations entre les variables connues du système (entrées et sorties). Ces relations, appelées relations de redondance analytique (RRA), sont satisfaites si le comportement actuel du système est cohérent avec le comportement de référence, non satisfaites sinon. Cet ensemble de RRAs est utilisé dans la procédure de décision à la fois pour détecter la présence de défaillances dans le système, et aussi pour localiser celles-ci.

   Plusieurs méthodes de génération des RRAs ont été développées. Elle se basent généralement sur la représentation par espace d'état par projection **[43, 51, 56]**, la représentation par schéma blocs, la représentation structurelle **[53]** ou sur la matrice de transfert **[49]**. Il a été possible de développer les RRAs pour les systèmes non linéaires en utilisant la théorie d'élimination pour les systèmes polynomiaux **[37-38, 43, 52]**. Dans **[3, 15, 18, 19, 27-29]** on trouve des méthodes de génération des RRAs par la modélisation en bond graph mono énergie.

   Considérons la représentation d'état discrète suivante :

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + F\varphi(k) + Gw`(k) \ldots\ldots\ldots\ldots (a) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) + E\varphi(k) + Hw`(k) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (b) \end{cases} \tag{2.9}$$

   où x, y, u, φ sont respectivement le vecteur d'état, de sortie, de commande et de défauts possibles affectant l'ensemble des capteurs et des actionneurs. Le vecteur $w`$ regroupe tous les autres signaux d'entrées sur le système tels que le bruit, les perturbations, …etc., k est l'instant d'échantillonnage.

   La génération des RRAs s'effectue en éliminant toutes les entrées inconnues, telles que l'état x .

   Considérons le vecteur y à l'instant $k+1$:

$$y(k+1) = Cx(k+1) + Du(k+1) + E\varphi(k+1) + Hw`(k+1) \ldots\ldots\ldots (c)$$

   En utilisant la relation (2.9.a), on obtient :

$$y(k+1) = CAx(k) + CBu(k) + CF\varphi(k) + CGw`(k) + Du(k+1) + E\varphi(k+1) + Hw`(k+1) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (d)$$

   d'où le système :

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} D & 0 \\ CB & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E & 0 \\ CF & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi(k) \\ \varphi(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H & 0 \\ CG & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w`(k) \\ w`(k+1) \end{bmatrix} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (e)$$

Si on généralise l'opération à l'ordre p, on obtient :

$$\begin{aligned} y(k,k+p) = {} & OBS(A,C,p)\,x(k) + COM(B,D,p)\,u(k,k+p) \\ & + COM(F,E,p)\,\varphi(k,k+1) \\ & + COM(G,H,p)\,w`(k,k+p) \end{aligned} \qquad (2.10)$$

tel que OBS = matrice d'observabilité,

COM = matrice de commandabilité.

$$OBS(A,C,p) = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ . \\ . \\ . \\ CA^p \end{bmatrix}, \quad COM(B,D,p) = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ CB & D & 0 & . & . & . & . \\ CAB & CB & D & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & D & 0 \\ CA^{p-1}B & CA^{p-2} & . & . & . & CB & D \end{bmatrix}$$

Il existe p tel que le rang de $OBS(A,C,p)$ soit inférieur au nombre de ligne **[40]**, donc on peut trouver une matrice W telle que :

$$WOBS(A,C,p) = 0 \qquad (2.11)$$

L'espace supplémentaire à $OBS(A,C,p)$, défini par W est appelé espace de parité. En projetant (2.10) dans cet espace, on obtient, en absence de bruits et de perturbations et pannes :

$$Wy(k,k+p) - WCOM(B,D,p)\,u(k,k+p) = 0 \qquad (2.12)$$

Cette relation est appelée ***relation de redondance analytique dynamique***, qui n'est d'autre que le résidu.

Dans la réalité (présence des effets indésirables), on a :

$$\begin{cases} r(k+p) = Wy(k,k+p) - WCOM(B,D,p)\,u(k,k+p) \ldots\ldots\ldots\ldots (a) \\ r(k+p) = WCOM(F,E,p)\,\varphi(k,k+1) + WCOM(G,H,p)\,w`(k,k+p) \ldots (b) \end{cases} \qquad (2.13)$$

L'équation (2.13.a) représente la forme de calcule du résidu, alors que (2.13.b) représente la forme d'évaluation.

Il a été montré dans quelques travaux **[43, 56]** la complémentarité des différentes méthodes précitées pour la génération des résidus, notamment entre l'espace de parité et l'estimation d'état.

2.3.4. Evaluation et optimisation des résidus :

2.3.4.1. Evaluation des résidus :

Après avoir générer les résidus, il reste à décider sur la nature de ses variations. Les résidus sont des indicateurs de cohérence entre les mesures collectées (le fonctionnement réel) et les données théoriques (modèles), ils sont normalement nuls à l'état normal (ou nominal) du processus, différent de zéro lors d'une défaillance, mais à

cause de la présence des bruits, des perturbations et des incertitudes de modélisation, les résidus ne sont jamais nuls, même en absence de défaillances. Pou cela, il est nécessaire d'entamer une étape d'évaluation afin de décider si la non nullité des résidus est due à la présence d'un ou plusieurs défauts ou aux signaux indésirables (fausses alarmes).

L'évaluation des résidus consiste à décider entre deux hypothèses **[2, 51, 53]** :

- H_0: effets de bruits, perturbations, …
- H_1: effets de défauts.

Pour répondre à cette question d'appartenance, il faut faire des tests sur les résidus. Chaque résidu subi un traitement individuel par la théorie de décision ou par le traitement de signal appliqué à la détection de rupture. Les tests utilisés pour la décision varient du simple au complexe selon le processus à surveiller et la nature du signal du résidu obtenu. On distingue différents types de test **[37]** :

- Comparaison de paramètres à des valeurs données (moyenne, variance,…etc.),
- Test de Neyman-Pearson,
- Test de Bayes,
- Test progressif de Wald,
- Test de Page et le *CUSUM* (somme cumulée),
- Les tests basés sur les lois de distribution (loi normale, χ^2, Fisher **[61]**, …etc.)

L'évaluation d'un seuillage sur le résidu pour prendre une décision finale est une des méthodes la plus utilisée. L'objectif est de fixer un seuil au-dessous duquel on considère qu'il existe ou pas une cohérence entre les différentes informations fournies par le processus et le modèle obtenu.

Plusieurs fonctions de seuillage peuvent être utilisées. La plus simple demeure la fonction du seuil échelon S. Le choix de ce seuil est beaucoup délicat, un seuil grand peut éliminer les erreurs de fausses alarmes, mais implique des erreurs de non détection et augmente la durée des délais de détection (le contraire pour le choix d'un seuil petit). Les incertitudes ou plus généralement les perturbations (structurées et non structurées) ajoutent aussi des problèmes supplémentaires pour la logique de seuil. Certains auteurs ont trouvés la solution pour ces problèmes par l'utilisation des résidus robustes **[45]** (pour les perturbations structurées) ou par l'utilisation d'un seuil mobil (ou adaptatif) choisi par des critères à base de la logique floue pour éliminer les effets des perturbations non structurées **[44-45, 57]**.

Il faut noter que les performances de ces tests sont garanties par le type de défaut à détecter ou à décider sur sa présence, comme pour le test séquentiel de Wald qui est efficace pour la détection des défauts de type ***biais***, ou pour la logique de seuil qui est très performant pour la détection des grosses pannes comme ***biais*** ou ***rupture*** de capteur, mais moins efficace pour les défauts de type ***vieillissement*** ou ***dérive*** **[51]**.

2.3.4.2. Optimisation des résidus :

Les résidus sont des signaux générés par le système de surveillance pour décider sur l'état du fonctionnement du processus. Ils peuvent subir des perturbations qui gênent le fonctionnement du système de surveillance lui même, provoquant des erreurs de détection et/ou de localisation.

Pour cela, il serait nécessaire d'optimiser ces résidus pour obtenir une meilleure indication sur la cohérence du modèle avec le processus. Certains auteurs proposent l'exposition des résidus générés par des filtres pour minimiser les effets indésirables des bruits et des perturbations, comme les filtres *EWMA* (*Exponentially Weighted Moving Average*) **[46, 48]** ou les filtres de *Kalman* adaptés aux milieux stochastiques.

Ils existent d'autres méthodes analytiques conformes à la génération des résidus à base de modèle, notamment l'espace de parité et l'estimation d'état. Ces méthodes se basent sur le concept de critères de *Sensibilité/Robustesse* des résidus faces aux défauts et aux états et entrées inconnues.

Pour la méthode de l'espace de parité **[37, 40]**, on utilise le concept de décomposition des résidus pour améliorer les performances de l'étape de détection en *résidus robustes* aux entrées inconnues et aux états, *sensibles* aux défauts, alors que pour l'étape de localisation on utilise les concepts de *résidus structurés* et *résidus directionnels* **[37, 40, 43, 49]**.

- **Résidus structurés :** Les résidus structurés sont conçus de manière à ce que chacun des résidus soit affecté par un sous ensemble de défauts et robuste (non affecté) par rapport aux autres défauts restants (***Fig. 2.7***).

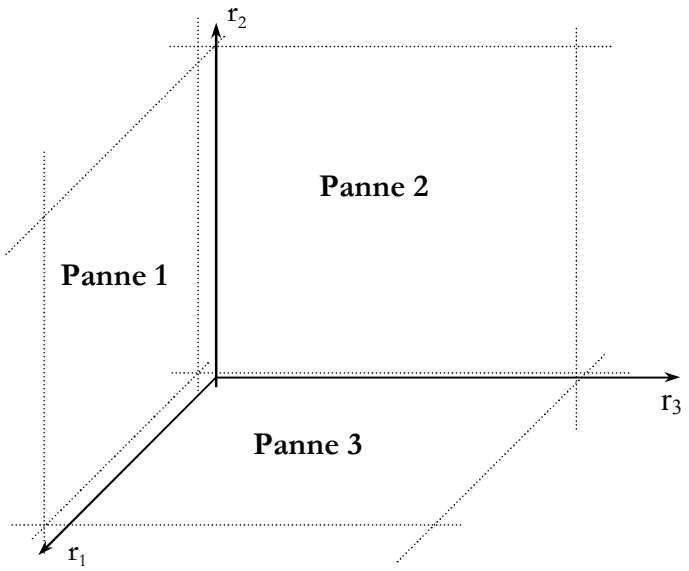


Fig. 2.7 : *Les résidus structurés*

- **Résidus directionnels :** Le concept des résidus directionnels représente une autre possibilité pour réaliser la tâche de localisation des pannes. Ils sont construits tels que, en réponse à une panne donnée, le vecteur des résidus soit orienté suivant une direction bien précise dans l'espace de résidus (***Fig. 2.8***).
- **Résidus robustes :** Le principe de conception des résidus robustes consiste à trouver une matrice W qui vérifie **[37]**:

$$\begin{cases} W.OBS\left(A,C,p\right)=0: & \text{Elimination des états} \\ W.COM\left(G,H,p\right)=0: & \text{Elimination des entrées inconnues} \\ W.COM\left(F,E,p\right)\neq 0: & \text{Condition de détectabilité} \end{cases} \tag{2.14}$$

Pour la méthode par observateur, les problèmes de *Sensibilité/Robustesse* sont résolus par l'utilisation des observateurs à entrées inconnues *UIO* (*Unknown Input Observer*) **[40]**, qui mènent à des conditions supplémentaires sur les matrices de l'observateur, permettant d'éliminer certaines entrées inconnues, ou par une reformulation du problème sous forme d'une norme connue pour la minimisation, comme H_2, H_∞, … etc. **[37, 73]**.

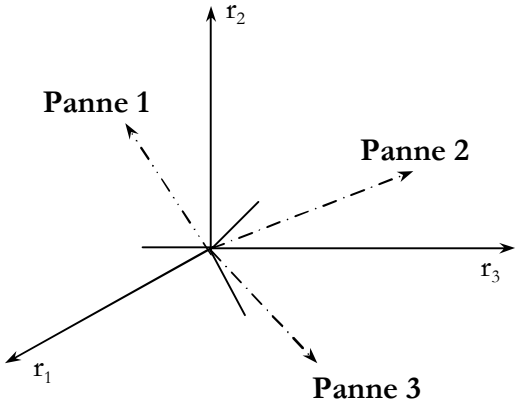


Fig. 2.8 : *Les résidus directionnels*

Tant que pour l'étape de localisation, la structuration des résidus s'effectue par l'utilisation des bancs d'observateurs à entrées inconnues *UIO* sous les schémas *DOS* (*Dedicated Observer Scheme*) ou *GOS* (*Generalized Observer Scheme*) qui peuvent être dédiés à la détection et à la localisation des défauts simples ou multiples des capteurs et des actionneurs **[37, 40]**.

2.3.5. Conclusion :

En conclusion, les méthodes à base de modèles sont les plus familiarisées pour les automaticiens dans la conception des systèmes de surveillance, par leurs simplicités de mise en œuvre, mais elles présentent certains inconvénients comme les inexactitudes des modèles utilisés (erreurs de modélisation, phénomènes non modélisables, … etc.), la taille du modèle pour les grands systèmes, et aussi le choix de la méthode appropriée pour ce modèle. La section suivante traite alors les différents types de méthodes de surveillance sans modèle, utilisées notamment pour les systèmes complexes à grandes dimensions

2.4. Méthodes de surveillance sans modèle :

2.4.1. Introduction :

On ne dispose pas de modèle décrivant le comportement du système pour des raisons différentes pour la conception d'un système de surveillance, on peut le remplacer par les méthodes sans modèle. Les méthodes de surveillance sans modèle utilisent les données acquises sur le processus pour définir son état de fonctionnement. On développe ici, quelques méthodes les plus utilisées comme : la reconnaissance de formes, les méthodes statistiques et les méthodes à base de l'intelligence artificielle.

2.4.2. Surveillance par reconnaissance des formes :

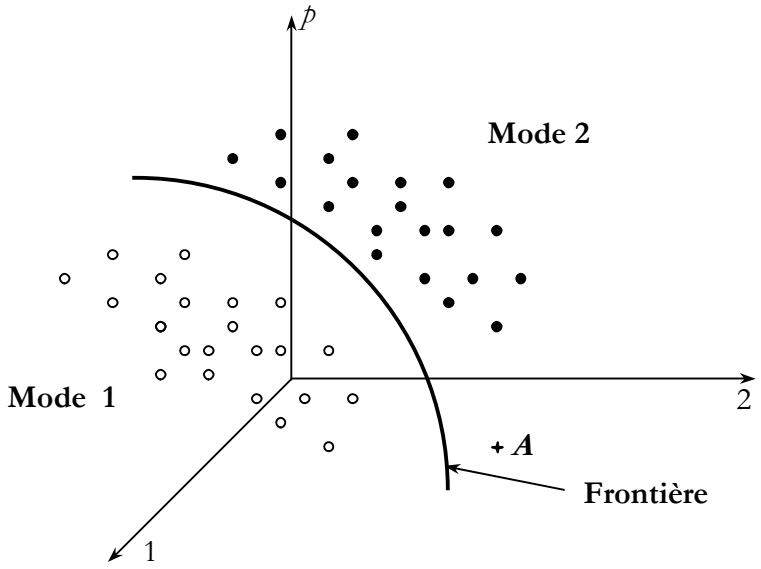
Les méthodes de reconnaissance de formes constituent des outils privilégiés pour la classification des signatures externes associés aux modes normaux et anormaux de fonctionnement des processus industriels **[39]**.

Ce type de méthode est utilisé pour la surveillance des systèmes complexes, pour lesquels un modèle satisfaisant leur comportement est difficile à obtenir. Les seules informations disponibles, hormis les informations humaines, sont issues des différents signaux. L'objectif de la reconnaissance de formes consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connus à priori **[51]**.

A. Notions de modes (classes) : On choisit p paramètres (valeurs de certains pics, énergie spectrale dans certaines bandes, valeur moyenne, variance, …etc.) susceptibles de représenter les modes de fonctionnement. Cet ensemble de p paramètres constitue le vecteur d'observation x à chaque instant. Ce vecteur peut être représenté dans l'espace $\Re^p$ de dimension p. par suite du bruit inhérent aux différentes mesures, une suite

d'observations du même mode de fonctionnement ne va pas se retrouver en un seul point, mais occuper une zone de l'espace $\Re^p$.

Si les *p* paramètres ont été judicieusement choisis, le problème de diagnostic revient alors à l'obtention de frontières entre ces zones. La figure suivante (***Fig. 2.9***) illustre une telle présentation :



***A** : nouvelle observation ; correspond à quel mode ?*

***Fig. 2.9 :** Représentation et décision dans l'espace des formes*

Il s'agit de reconnaître à quel mode (ou classe) se rattache la forme observée. Il convient donc, d'utiliser cette approche pour :

- choisir une représentation des modes appuyées sur *p* paramètres significatifs ; ce choix est délicat et généralement issu de l'expérience, aucune méthode ne permet de le guider,
- avoir des données correspondant à chacun des modes observables ; c'est ce que l'on appelle l'ensemble d'apprentissage.

B. Notions de règles de décision : L'ensemble d'apprentissage peut être constitué à partir d'expériences réelles, provoquées, ou par exploitation de l'historique. La connaissance de cet ensemble est incomplète, du fait qu'on ne connaît jamais tous les modes de fonctionnement d'un processus. Généralement, on dispose de vecteurs d'observation correspondant à un nombre limité de modes avec défaut. Il faut donc élaborer des règles de décision avec une connaissance incomplète, parfois limitée seulement à des observations qui correspondent à un mode normal.

Dans la théorie de décision classique, l'affectation à un mode (mode *1* ou *2*) d'un vecteur d'observation revient à un test entre deux hypothèses H_1 et H_2 . Pour tenir compte de la connaissance incomplète, on introduit une nouvelle hypothèse H_r , dite hypothèse de rejet ; cela revient à séparer l'espace des observations en trois régions. La première où l'on décidera du mode *1*, la deuxième au mode *2* et la troisième où l'on rejettera le point comme observation d'un des modes connus. Les vecteurs observation rejetés peuvent formés d'autres modes inconnus au départ. Pour cet objectif, appelé l'*apprentissage*, de nombreuses méthodes dites génériques ont été proposées, parmi lesquelles la méthode des nuées dynamiques qui est la plus utilisée **[40, 51]**. La figure suivante illustre le processus général de l'algorithme d'apprentissage (***Fig. 2.10***).

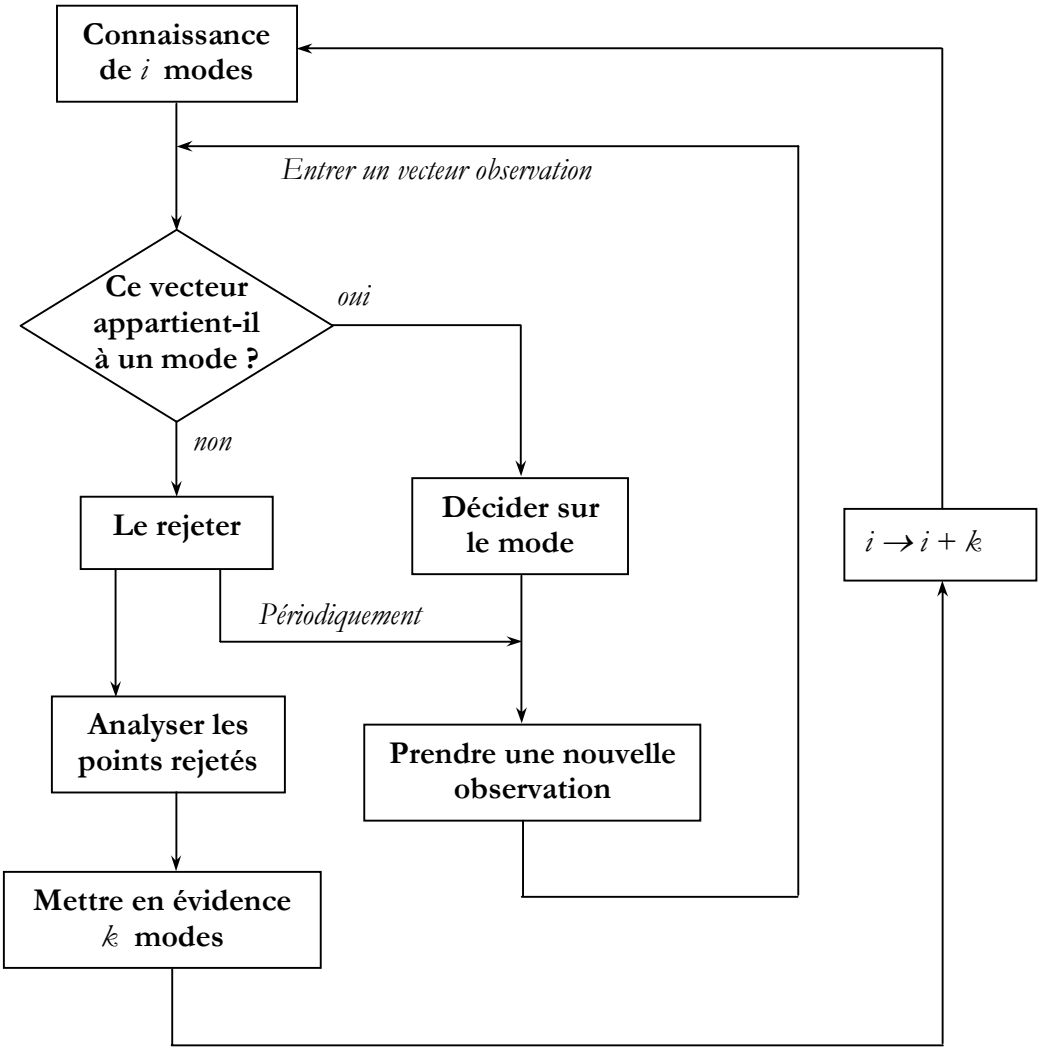


Fig. 2.10 : *Principe de diagnostic par reconnaissance de formes*

C. Conclusion : L'approche par reconnaissance de formes pour la surveillance des systèmes se base sur la connaissance d'un ensemble de mesures effectuées sur le processus et leurs états de fonctionnement associés. Cette technique suppose la connaissance à priori de tous les états de fonctionnement (normal et en défaut), ce qui représente l'inconvénient majeur de la technique, en plus elle ne prend pas en compte l'évolution du système.

2.4.3. Surveillance par l'approche statistique :

L'approche classique de la décision statistique consiste à déterminer une règle de décision qui satisfasse un critère de performance fixé. En diagnostic, l'approche statistique est basée sur des tests à des hypothèses simples en prenant compte des probabilités d'erreurs, comme **[37]**:

- Test le plus puissant,
- Test bayésien,
- Rapport de vraissemblance,
- Test de Neyman-Pearson.

Ou des tests séquentiels basés sur l'analyse séquentiel des données, comme :

- Le test séquentiel du rapport de vraissemblance,
- Le test séquentiel de χ^2.

L'approche statistique est beaucoup utilisée dans les problèmes de diagnostic en ligne (en temps réel). Il existe un lien entre cette approche et l'approche géométrique à base de redondance analytique statique pour profiter des grandes performances de cette dernière dans la détection et la localisation des défauts **[37, 50]**.

L'Analyse en composante principale dans la surveillance des systèmes :

L'Analyse en composante principale *ACP* (en anglais : *PCA. Principal Component Analysis*) est la méthode la plus célèbre dans l'approche statistique pour la détection des défauts dans les processus complexes, par son appui pour l'isolation des défauts. Elle peut réduire significativement la dimension du modèle d'un processus donné, en exposant leurs dépendances linaires entre les variables **[46, 47, 50]**.

L'analyse en composante principale décompose un vecteur type normalisé x en deux parties,

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{2.15}$$

où $x \in \Re^m$ est le vecteur type normalisé de moyenne nulle et de variance unité. Les vecteurs $\hat{x}$ et $\tilde{x}$ sont respectivement, les parties modelées et résiduelles *de x*,. Le vecteur $\hat{x}$ est la projection sur les sous espaces des composants principaux *PCs*:

$$\hat{x} = Pt = PP^T x = Cx \tag{2.16}$$

avec $P \in \Re^{m \times l}$ est la matrice poids de l'ACP, $t \in \Re^l$ est le vecteur de score et $l \geq 1$ est le nombre de *PC* conservés dans le modèle de l'*ACP*. La matrice $C \equiv PP^T$ représente la projection sur les *l=dimensionnels PC*, $\mathbb{S}$. Donc, $\hat{x} \in \mathbb{S} \subseteq \Re^m$, avec $dim(\mathbb{S}) = l$.

Les colonnes de la matrice de poids *P*, sont les vecteurs propres de la matrice de corrélation ***(R)*** associés aux (*l*) plus grandes valeurs propres. Pour cette raison, l'*ACP* prend les corrélations de mesures maximales de l'historique des données en fonctionnement normal. Le nombre de composants principaux (*l*) dépend de la corrélation selon les variables du processus.

Le vecteur résidu $\tilde{x}$ projeté dans le sous espace résiduel **(*RS*)** est :

$$\tilde{x} = (I - C)x = \tilde{C}x \in \tilde{\mathbb{S}} \subset \Re^m \tag{2.17}$$

où $\tilde{C} \equiv I - C$ représente la matrice de projection sur le (***RS***), $\tilde{\mathbb{S}}$, avec $dim(\tilde{\mathbb{S}}) = \tilde{l} = m - l$.

Une modification dans la variable de corrélation indique une situation anormale. Sous cette situation l'échantillon x augmente sa projection dans (***RS***). En résultat, l'amplitude de $\tilde{x}$ atteint des valeurs anormales comparées à ceux obtenues pendant les conditions normales. Une méthode statistique typique pour la détection de conditions anormales est le carrée de l'erreur de prédiction (*SPE. Squared Prediction Error*),

$$\text{SPE} \equiv \left\| \tilde{x} \right\|^2 = \left\| \tilde{C}x \right\|^2 \tag{2.18}$$

Une limite de confiance pour *SPE* quand le processus est considéré normal si :

$$\text{SPE} \leq \delta^2 \tag{2.19}$$

où δ^2 désigne une limite de confiance ou le seuil pour le *SPE*.

Un autre index souvent employé pour la détection de défauts est le test d'Hotelling T^2 **[37, 47]**. L'index T^2 est défini comme :

$$T^2 = t^T \Lambda^{-1} t \tag{2.20}$$

qui suit une distribution χ^2 de *l* degrés de liberté, où $\Lambda = diag\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_l\}$ est une matrice diagonale contenant les *l* plus grandes valeurs propres de la matrice covariance de *x*. Un diagramme de contrôle multivariable de χ^2 peut être obtenu en traçant T^2 par

rapport au temps, avec une limite de contrôle $\chi^2_\beta(l)$, où β est le niveau de confiance de test. Si $T^2 > \chi^2_\beta(l)$, une situation anormale est indiquée.

Un modèle *ACP* extrait la corrélation des variables en raison de l'équilibre massif, l'équilibre énergétique et les limitations opérationnelles. Les deux méthodes *SPE* et T^2 ont des signification physiques différentes. Le *SPE* mesure la distance entre les principales composantes, donc indique les défauts de corrélation, d'où la détection des défauts qui violent l'équilibre massique et énergétique du système, et aussi les défauts de dépassement des contraintes opérationnels. On résulte que la méthode *SPE* est très efficace pour les capteurs et processus, mais elle nécessite peu d'amélioration dans sa version originale, pour la détection des défauts multidimensionnels **[47]**.

La méthode T^2 est utilisée pour la détection des changements de sortie, qui troublent la structure de corrélation, mais elle est moins efficace pour les autres défauts de processus**[47]**.

Les limites de l'*ACP* viennent du fait que c'est une méthode de projection, et que la perte de l'information induite par la projection peut entraîner des interprétations erronées.

2.4.4. Extension vers l'intelligence artificielle :

L'intelligence artificielle est presque aussi vieille que l'informatique et les chercheurs en intelligence artificielle (IA) se sont fixés pour objectifs d'analyser « les comportement intelligents de l'homme dans les domaines de la perception, de la compréhension, de la décision et de la conception », afin de les reproduire sur un ordinateur **[39]**.

L'IA comporte deux objectifs principaux de recherche : comprendre l'homme, et simuler ses activités. Le premier objectif est plus délicat car il étudie les différents aspects de l'intelligence et fait appel à des compétences très multidisciplinaires, telles que la psychologie, la linguistique, la neurophysiologie, la logique, la neurobiologie et même la philosophie. Le second objectif est d'ordre plus technique et consiste à étudier les moyens informatiques nécessaires à la simulation du comportement humain.

Dans le domaine de supervision industrielle (surveillance et diagnostic), l'IA rapporte plusieurs solutions qui se sert à aider l'opérateur à la décision par plusieurs approches, les plus répandues sont :

- Les systèmes experts,
- Les réseaux de neurones,
- La logique floue.

Les méthodes à base de l'IA rentrent dans les méthodes de diagnostic sans modèle parce quelles ne nécessitent pas de modèles analytiques pour leurs développement et leurs mises en fonctionnement, nous utilisent seulement les données prélevées du système à surveiller sous différentes formes (statistiques, numériques, visuelles, …).

A. Les systèmes experts :

Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste de ce problème **[39]**. Les systèmes experts, par leurs capacités à reproduire le raisonnement d'un expert humain dans un domaine donné, offrent des perspectives plus larges dans la surveillance, car ils permettent de résoudre aussi bien les problèmes de diagnostic externe (analyse de signatures externes) que les problèmes de diagnostic interne (analyse de la cohérence du modèle avec le processus).

Le système expert est un outil qui permet de traiter un grand nombre de données, de type information humaine, en particulier, de modifier et d'augmenter les connaissances

concernant le système surveillé au cours du temps **[51]**. Donc, il est utilisé comme un intermédiaire entre un expert qui transmet sa connaissance au système expert, et un utilisateur (non expert) qui se sert du système expert, pour résoudre ses problèmes avec l'efficacité du spécialiste.

La structure générale d'un système expert est donnée par la figure ***2.11***. Elle comprend une base de faits, une base de connaissance et un moteur d'inférence **[51]**.

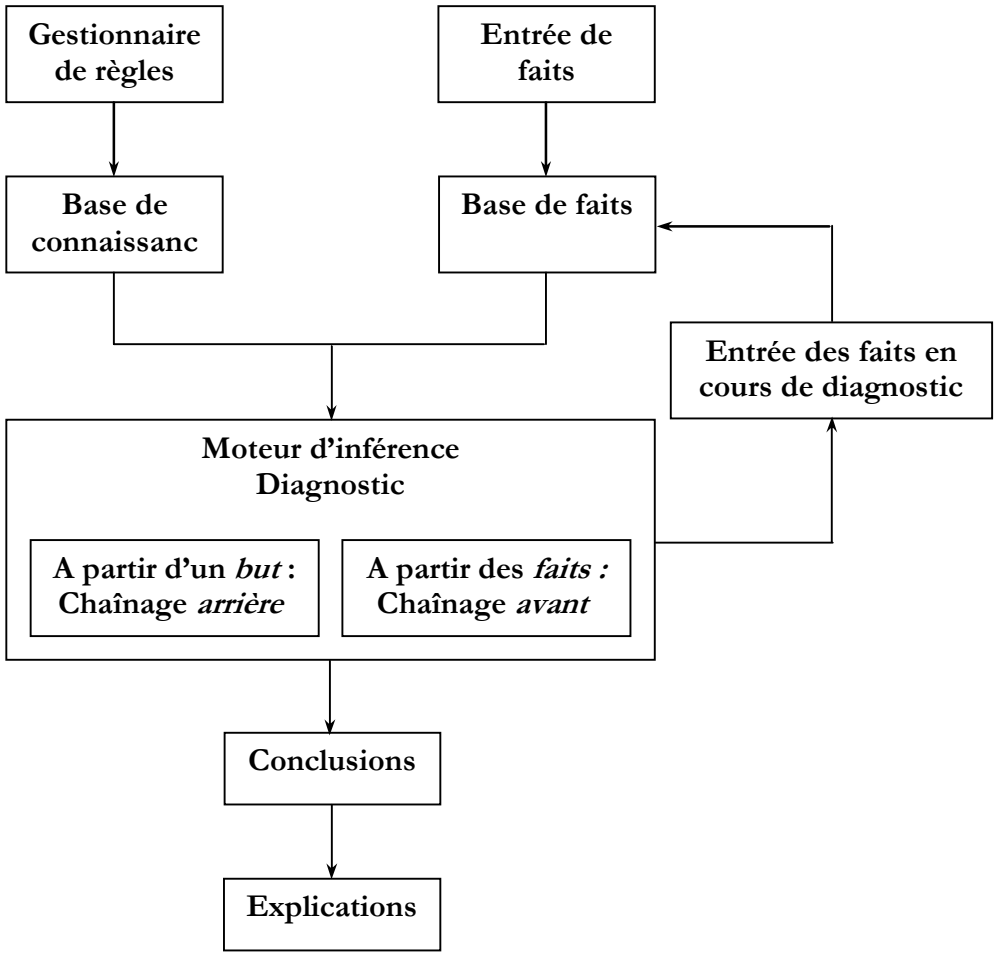


Fig. 2.11 : *Schéma général d'un système expert* **[51]**

1. La base de connaissances : La base de connaissances est souvent la partie stable du système : elle est immédiatement présente dès l'appel au système. Les connaissances sur le système sont décrites sous forme de **règles de production**. Une règle de production a la structuration générale suivante : « **SI** *condition 1* **ET** *condition 2* … **ET** *condition n* **ALORS** *conclusion* ». Dans ces règles, les conditions sont des prémisses. Pour qu'une règle soit vérifiée et qu'elle génère sa conclusion, sa liste de prémisses doit être entièrement vérifiée. Les règles fournies peuvent être empreintes d'imprécision et d'incertitude ; par exemple « **SI** *une fuite importante se produit dans tel organe,* **ALORS** *il est possible que tel fait se produise* ».

2. La base de faits : Les faits sont les objets élémentaires de l'application : c'est l'information de base nécessaire au système pour l'établissement d'un diagnostic. Les faits peuvent être de deux types : faits initiaux entrés par l'utilisateur et faits déduits par le système lui même ; leur rôle est généralement identique **[51]**.

3. Le moteur d'inférence : Le moteur d'inférence contrôle l'ordre des déductions successives. Deux stratégies générales de démonstration sont possibles :

- **Le chaînage avant :** où l'on part de la base de faits initiale, on déclenche toutes les règles dont les prémisses sont satisfaites ; on ajoute les obtenus et l'on poursuit jusqu'à « épuisement ».
- **Le chaînage arrière :** où l'on part du but ; on regarde toutes les règles qui ont ce but pour conséquence ; chacune de ces règles est analysée : si toutes ses prémisses sont dans la base initiale des faits, le but est atteint, sinon on enregistre les prémisses inconnues comme autant de buts à atteindre et l'on recommence le cycle sur chacun d'eux.

4. Conclusion : Les systèmes experts ont trouvés leur domaine d'équilibre en matière d'application. En particulier, dans le domaine de diagnostic industriel, l'apparition de générateur de systèmes experts, couplés avec des modules conviviaux de dialogue, permet aisément de capitaliser la connaissance pour le diagnostic de matériels simples (dépannage automobiles, électroménager, … etc.). Par contre, pour les systèmes industriels complexes, il est indispensable d'engager une étude technico-économique pour passer du stage de concept de systèmes expert à sa phase d'implantation opérationnelle réelle **[39]**. Le développement d'un système expert en diagnostic dans les systèmes industriels est relativement coûteux par rapport à l'expertise humaine dotée de caractères psychologiques et sociologiques, en plus que le système expert lui même peut se manifester incorrectement lorsqu'il est attaqué par un virus (défaut logiciel) ou par un défaut matériel interne.

B. Les réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels sont des outils particulièrement adaptés pour aider les spécialistes de maintenance dans leurs activités de reconnaissance et de classification des différentes informations et signatures délivrées lors de la surveillance d'un processus complexe.

Cette théorie est née du rapprochement de la biologie et de l'informatique pour simuler le fonctionnement du cerveau humain dans ses fonctions de classification et d'apprentissage. Elles possèdent des propriétés similaires à celles de la reconnaissance de formes pour la classification automatique des signatures **[39]**.

Les neurones, selon une architecture bien précise, sont connectés entre eux par des liaisons pondérées. Chaque neurone peut être considéré comme une fonction mathématique de plusieurs entrées provient par les autres neurones et une sortie vers les autres neurones selon l'architecture des réseaux.

En effet, la caractéristique principale des réseaux de neurones est leur capacité d'apprendre les signaux comme des exemples peut se régénérer par les réseaux. Donc, on peut utiliser ces réseaux pour la génération des résidus comme pour l'isolation des défauts.

Dans la littérature, les réseaux de neurones sont beaucoup utilisés pour résoudre les problèmes de surveillance dans les processus complexes, selon plusieurs architectures comme **[73]**:

- MPL- Multi Layer Perception (Perception en multi couches),
- DS-FNN- Device Specific Artificial Neural Network,
- Dynamical Neural Network (Les réseaux de neurones dynamiques),
- RBF- Radial Basis Function Neural Network,
- CPN- Counter Propagation Network.

Ils sont utilisés aussi sous forme hybride composée avec d'autres systèmes comme :

- WSBFNN- Wavelet Sigmoid Based Function Neural Network,
- WSBFNES- Wavelet Sigmoid Based Function Neural Network with Expert System,
- FNN- Fuzzy Neural Network.

L'architecture générale d'un système de surveillance à base de réseaux de neurones peut prendre la forme donnée par la figure suivante (***Fig. 2.12***).

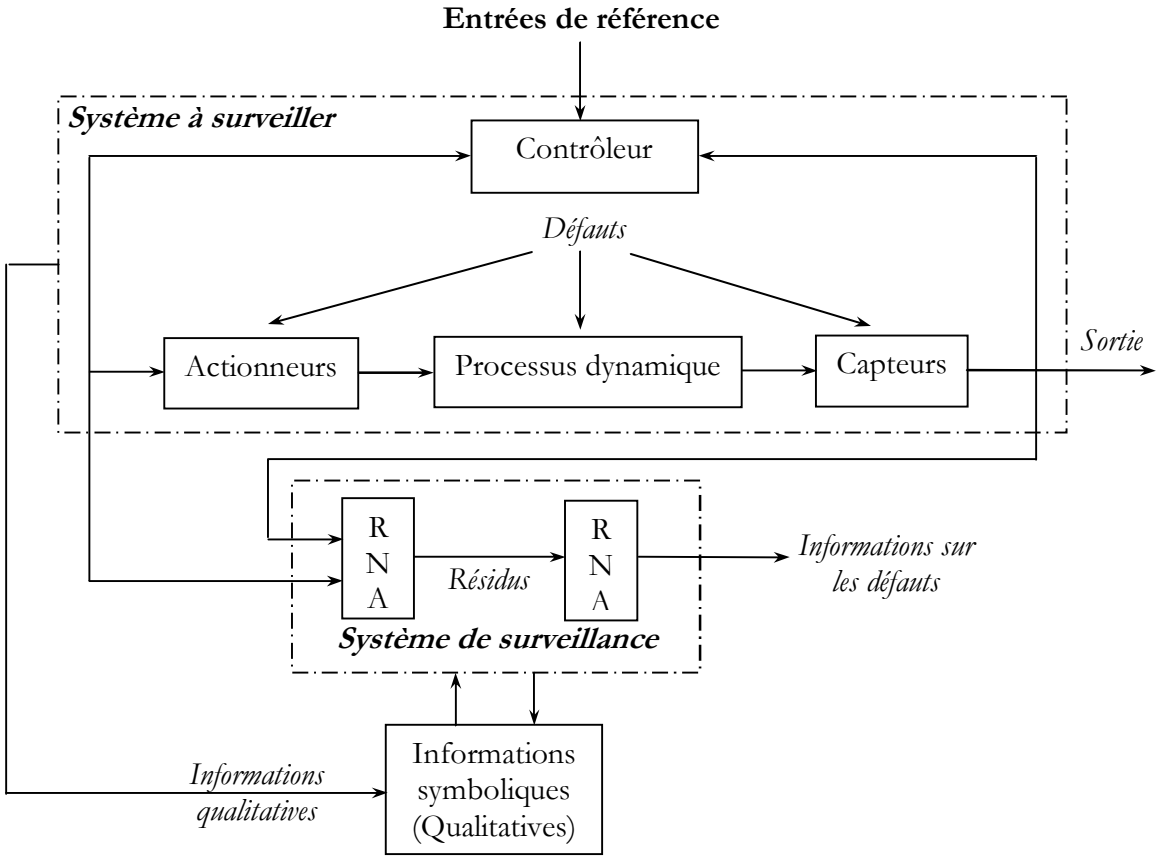


Fig. 2.12 : *Structure générale d'un système de surveillance à base de réseaux de neurones*

Les réseaux de neurones présentent plusieurs avantages par rapport aux techniques classiques (à base de modèle) pour la surveillance, les plus répandus sont :

- leur capacité d'apprentissage,
- leur robustesse aux entrées inconnues,
- le parallélisme de traitement,
- surveillance en temps réel,
- traitement de grand nombre de données.

Les principaux inconvénients des réseaux de neurones sont :

- la complexité de calcul,
- le temps d'apprentissage augmente avec la taille du réseau,
- le choix de structure ainsi que le type des fonctions d'activation se font par tâtonnement qui mènent à des erreurs ou des défauts sur le réseau lui même.

C. La logique floue :

La logique floue, née en 1965, a trouvé sa place pour traiter les problèmes de surveillance par leur caractères imprécis et *'Flous'*, comme la logique humaine.

La logique floue est utilisée pour générer **[73]** et aussi pour évaluer les résidus **[44, 45, 57]**. La génération des résidus s'effectue à travers l'expression des relation de cause à effet par des fonctions floues, pour construire un observateur qualitatif, alors que la décision sur ces résidus prend un caractère flou pour le choix du seuil de résidu.

Considérons un observateur qualitatif (à base de connaissance) type suivant (***Fig. 2.13)*** :

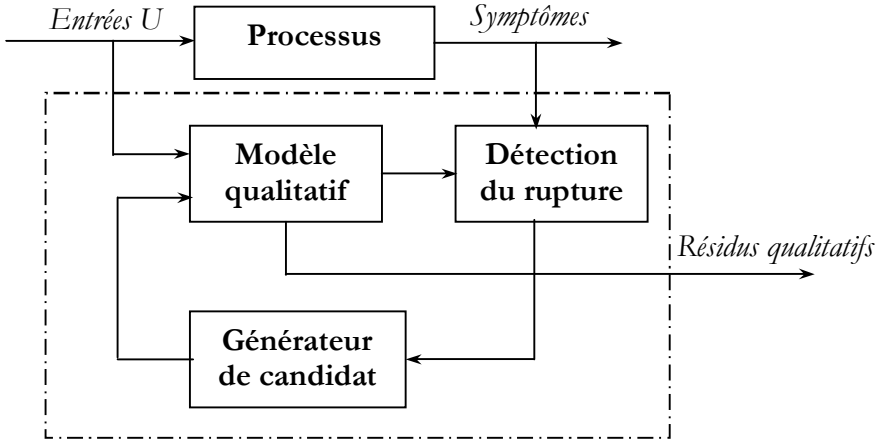


Fig. 2.13 : *Observateur qualitatif (à base de connaissance)*

La connaissance est dérivée dans ce cas, du modèle mathématique, généralement, incomplet et/ou imprécis. La caractéristique essentielle de la modélisation qualitative est que le comportement dynamique du processus est décrit par des symboles ou des termes qualitatifs. Par exemple, froid, chaud, on, off, pression élevée, odeurs différentes, valeur limité, etc., ce qui peut être exprimé par des ensembles flous. D'une autre façon, les variables du système dynamique sont représentées par des ensembles flous caractérisés par des fonctions d'appartenance et reliées entre elle par des lois (***Fig. 2.14***).

Le modèle fuzzifié produit des sorties d'information pour ses entrées avec l'aide sur les dépendances entre les variables de l'ensemble des informations fuzzifiées, sous une forme d'arbre d'état, telle que chaque partie de l'arbre représente un comportement possible du système **[44]**.

Le principe d'évaluation floue des résidus consiste en un processus à trois étape (***Fig. 2.14***). Premièrement, les résidus sont fuzzifiés, puis évalués par un mécanisme d'inférence utilisant les règles SI-ALORS (IF-THEN), et finalement ils sont défuzzifiés pour produire une décision finale sur l'occurrence ou non d'un défaut.

La combinaison de la logique floue avec d'autres méthodes de surveillance est une approche très utilisée pour assurer les bonnes performances des deux méthodes, comme les réseaux de neurones **[73]**, ou les observateurs non linéaires **[45]**.

Il reste à signaler l'utilisation de la logique floue pour les problèmes de la tolérance aux fautes, qui donne beaucoup d'aide à l'opérateur devant les défaillances, tout en assurant la continuité de conduite de l'installation (reconfiguration) et la sécurité en cas de dégradation des composants pour éviter les dégâts catastrophiques.

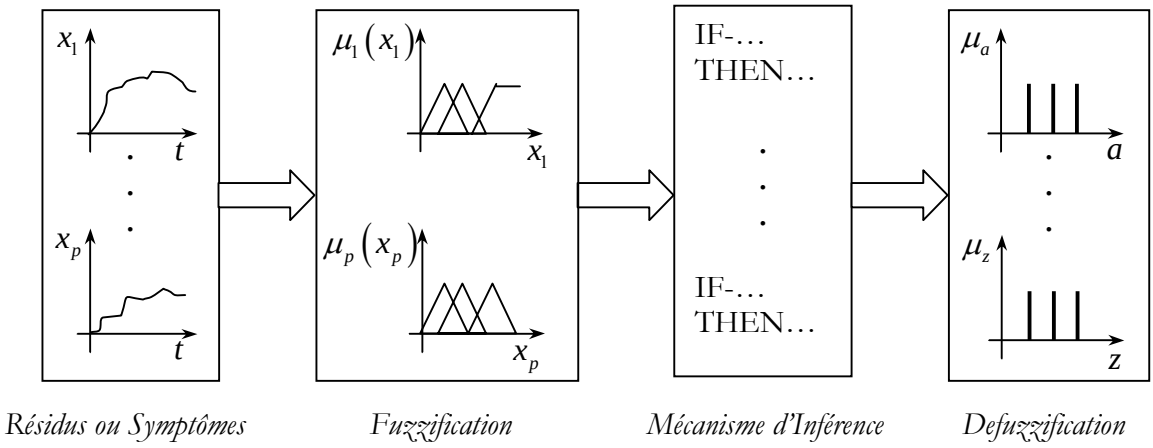


Fig. 2.14 : *Schéma général d'évaluation des résidus ou supervision floue*

2.4.5. Conclusion :

Les méthodes de surveillance sans modèle présentées dans cette section, ont une grande capacité de travail avec les systèmes complexes, où l'on trouve beaucoup de données de nature et de significations diverses (signaux, voyants lumineux, …etc.). Ils n'existe pas en conséquence, un moyen de choix entre ces méthodes, seulement l'expérience a conduit les chercheurs d'utiliser telle ou telle méthode. L'inconvénient majeur des méthodes de surveillance sans modèle, est la négligence de l'apport de la modélisation dans la connaissance du comportement du processus à surveiller.

2.5. Etat de l'art de la surveillance par bond graph :

Le modèle bond graph, obtenu à partir d'une analyse énergétique du système physique, est un outil d'aide pour l'analyse des propriétés du système. La surveillance, avec ses aspects, détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs, trouve un intérêt à l'existence d'un tel modèle.

Les premiers travaux dans la surveillance par bond graph consiste à utiliser le modèle obtenu pour passer aux autres formes de représentation connues pour la surveillance à base de modèle, comme la représentation d'état **[31]**, les modèles analytiques par projection orthogonale **[3, 28]**, la fonction de transfert **[3, 27]**, les graphes biparties **[3, 10]**, les graphes causaux normaux et temporels **[10, 30]**. Ensuite, certains travaux ont utilisés le modèle bond graph mono énergie pour générer les relations de redondance analytique à partir de leur structure de jonction **[3, 27-29]**. Cette méthode très efficace pour la détection des défauts capteurs et actionneurs a été étendue pour définir les conditions de surveillabilité des composants **[3]**, ainsi que le choix du nombre et de placement des capteurs utilisés pour la mesure et l'instrumentation du système de surveillance **[3, 29]** en parcourant les différents chemins causaux du modèle, ou par le passage au graphe causal normal **[10]** et temporel **[30]**.

La littérature est enrichie par l'utilisation des bond graphs aussi pour l'analyse fonctionnelle, structurelle, d'aide à la décision et à la supervision des processus complexes comme celles du génie des procédés **[13, 14]**, avec l'apparition de nouveaux termes dans la théorie des bond graphs comme les chemins causaux généralisés, utilisés pour la génération des relations de redondance analytique dans les modèles bond graph multi énergies **[2, 16, 18-19]**, et les modèles bond graphs linéarisés (ou à éléments linéarisés) **[2, 15]**, où on linéarise les éléments bond graph multi-ports non linéaires afin de faciliter l'utilisation de la théorie de détection de défauts développée pour les modèles bond graphs mono-énergies.

Nous développons dans le chapitre 3 la méthode de linéarisation des éléments multiports non linéaires, comme nous exposons dans la chapitre5 l'utilité de cette linéarisation pour la surveillance d'un système complexe (procédé de distillation discontinue) en utilisant le concept du chemin causal généralisé pour la génération des résidus et pour la définition des conditions de surveillance.

Afin de montrer l'efficacité du bond graph dans la génération des résidus, nous reprenons l'exemple donné par **[31]**, mais par la méthode proposée par **[3]**.

Exemple : Soit le système décrit par la figure suivante (***Fig. 2.15***). Ce système est composé de quatre sous systèmes interconnectés : (1) un circuit électrique conduisant (2) un moteur avec une inertie I_2 et frottement R_2, connecté à (3) une pompe d'inertie I_3 et de frottement R_3 remplissant l'eau dans (4) un système de réservoir connecté à deux conduites d'entrée et de sortie avec les restrictions R_4 et R_5 respectivement. L'élément C_1 représente l'élasticité du bras de moteur.

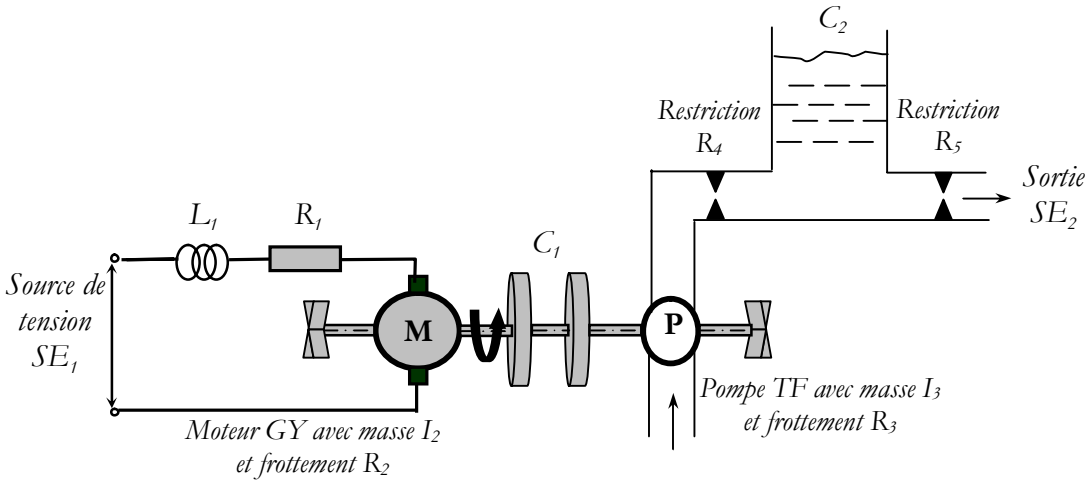


Fig. 2.15 : *Système de commande du flux d'eau*

Le modèle bond graph représentant ce système est donné par la figure suivante (***Fig. 2.16***) :

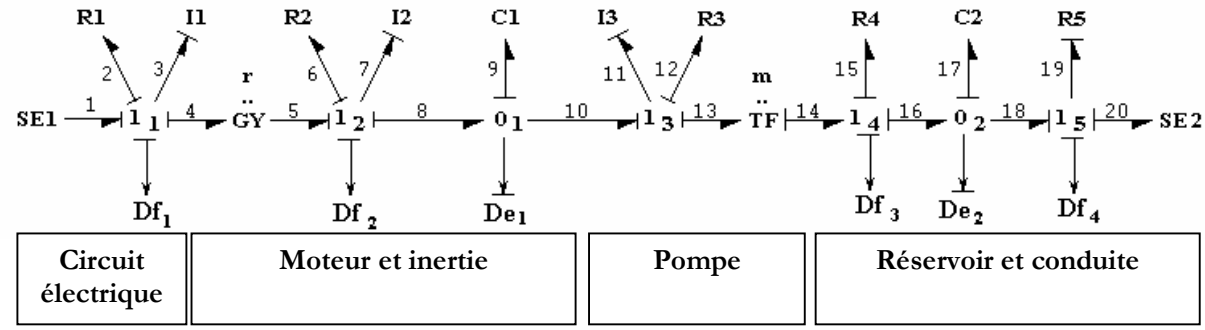


Fig. 2.16 : *Modèle bond graph du système* ***Fig. 2.15***

Le système d'instrumentation comporte 6 capteurs : Df_1 détecteur du courant électrique, Df_2 détecteur de la vitesse angulaire du bras de moteur, De_1 détecteur du couple de moteur, Df_3 détecteur du débit du liquide entrant, De_2 détecteur de la pression dans le réservoir, Df_4 détecteur du débit du liquide sortant. On suppose que l'effet des perturbations est négligeable (pression atmosphérique).

La procédure de génération des relations de redondance analytique (RRAs) directement à partir du modèle bond graph est énoncée comme suit **[3]**:

1. A partir des variables à surveiller, choisir un type de jonction,
2. Choisir une jonction de ce type,
3. Ecrire la relation constitutive et exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues (à surveiller) en suivant les chemins causaux possibles,
4. Passer à la jonction suivante et appliquer l'étape 3. jusqu'à l'obtention de suffisamment de relations de redondance analytique (jusqu'à l'obtention de signatures différentes pour les différentes variables ou épuisement des jonctions).

L'application de cette procédure sur ce système (***Fig. 2.16***), en supposant que les variables à surveiller sont l'ensemble des capteurs et d'actionneurs (S_i *et* D_i), donne les résultats suivants :

- Jonction 1_1 : $f_1 = f_3,\ f_2 = f_3,\ f_4 = f_3,\ f_3 = Df_1$

$$e_3 = e_1 - e_2 - e_4 \tag{2.21}$$

  - Elément R_1 :

$$e_2 = R_1 f_2 = R_1 f_3 = R_1 Df_1 \tag{2.22}$$

  - Elément I_1 :

$$f_3 = \frac{1}{I_1 s} e_3 \Rightarrow e_3 = (I_1 s)\, f_3 = (I_1 s)\, Df_1 \tag{2.23}$$

- Jonction GY :

$$\begin{cases} e_4 = r.f_5 \\ e_5 = r.f_4 = r.f_3 = r.Df_1 \end{cases} \tag{2.24}$$

- Jonction 1_2 : $f_5 = f_7,\ f_6 = f_7,\ f_8 = f_7,\ f_7 = Df_2$

$$e_7 = e_5 - e_6 - e_8 \tag{2.25}$$

  - Elément R_2 :

$$e_6 = R_2 f_6 = R_2 f_7 = R_2 Df_2 \tag{2.26}$$

  - Elément I_2 :

$$f_7 = \frac{1}{I_2 s} e_7 \Rightarrow e_7 = (I_2 s)\, f_7 = (I_2 s)\, Df_2 \tag{2.27}$$

- Jonction 1_3 : $f_{10} = f_{11},\ f_{12} = f_{11},\ f_{13} = f_{11}$

$$e_{11} = e_{10} - e_{12} - e_{13} \tag{2.28}$$

  - Elément R_3 :

$$e_{12} = R_3 f_{12} = R_3 f_{11} \tag{2.29}$$

  - Elément I_3 :

$$f_{11} = \frac{1}{I_3 s} e_{11} \Rightarrow e_{11} = (I_3 s)\, f_{11} \tag{2.30}$$

- Jonction TF :

$$\begin{cases} e_{13} = m.e_{14} \\ f_{14} = m.f_{13} = m.f_{11} \end{cases} \tag{2.31}$$

- Jonction 1_4 : $f_{15} = f_{14},\ f_{16} = f_{14},\ f_{14} = Df_3$

$$e_{14} = e_{15} + e_{16} \tag{2.32}$$

  - Elément R_4 :

$$e_{15} = R_4 f_{15} = R_4 f_{14} = R_4 Df_3 \quad (2.33)$$

- Jonction 1_5 : $f_{18} = f_{19}, f_{20} = f_{19}, f_{19} = Df_4$

$$e_{19} = e_{18} - e_{20} \quad (2.34)$$

- Elément R_5 :

$$f_{19} = \frac{1}{R_5} e_{19} \Rightarrow e_{19} = R_5 f_{19} = R_5 Df_4 \quad (2.35)$$

- Jonction 0_1 : $e_8 = e_9, e_{10} = e_9, e_9 = De_1$

$$f_9 = f_8 - f_{10} \quad (2.36)$$

- Elément C_1 :

$$e_9 = \frac{1}{C_1 s} f_9 \Rightarrow f_9 = (C_1 s) e_9 = (C_1 s) De_1 \quad (2.37)$$

- Jonction 0_2 : $e_{16} = e_{17}, e_{18} = e_{17}, e_{17} = De_2$

$$f_{17} = f_{16} - f_{18} \quad (2.38)$$

- Elément C_2 :

$$e_{17} = \frac{1}{C_2 s} f_{17} \Rightarrow f_{17} = (C_2 s) e_{17} = (C_2 s) De_2 \quad (2.39)$$

Pour la déduction des relations de redondance analytique, on choisit le type de jonction « 1 », pour cela on a :

- Jonction 1_1 : $e_3 = e_1 - e_2 - e_4$

Avec : $e_1 = SE_1$,

$e_2 = R_1 Df_1$,

$e_3 = (I_1 s) Df_1$,

il ne reste que e_4 qui est déduit à travers le parcours des chemins causaux :

$e_4 = r.f_5$ de la relation (2.24), f_5 est donné par la caractéristique de le jonction 1_2, donc :

$e_4 = r.f_5 = r.f_7 = r.Df_2$,

d'où la première relation de redondance analytique :

$$RRA_1 = (R_1 + I_1 s) Df_1 + r.Df_2 + SE_1 \quad (2.40)$$

- Jonction 1_2 : $e_7 = e_5 - e_6 - e_8$

Avec : $e_6 = R_2 Df_2$,

$e_5 = r.f_4$ de la relation (2.24), f_4 est donné par la caractéristique de le jonction 1_1, donc :

$e_5 = r.f_4 = r.Df_1$,

$e_7 = (I_2 s) Df_2$,

il ne reste que e_8 qui est donné par la caractéristique de le jonction 0_1, donc :

$e_8 = De_1$

d'où :

$$RRA_2 = (R_2 + I_2 s) Df_2 - r.Df_1 + De_1 \quad (2.41)$$

- Jonction 1_3 : $e_{11} = e_{10} - e_{12} - e_{13}$

Avec : $e_{11} = (I_3 s) f_{11}$,

e_{10} est donné par la caractéristique de le jonction 0_1 :

$e_{10} = De_1$,

$e_{12} = R_3 f_{11}$,

e_{13} est donné par la caractéristique de le jonction TF :

$e_{13} = m.e_{14}$, e_{14} est donné par la caractéristique de le jonction 1_4 :

$e_{14} = e_{15} + e_{16}$, avec :

$e_{15} = R_4 Df_3$,

e_{16} est donné par la caractéristique de la jonction 0_2 :

$e_{16} = De_2$, donc $e_{14} = R_4 Df_3 + De_2 \Rightarrow e_{13} = m\left(R_4 Df_3 + De_2\right)$,

$f_{11} = f_{13}$, avec $f_{13} = \frac{1}{m} f_{14} = \frac{1}{m} Df_3$, donc $f_{11} = \frac{1}{m} Df_3$

d'où :

$$RRA_3 = \left(R_3 + I_3 s + m^2 R_4\right) Df_3 + m\left(De_2 - De_1\right) \qquad (2.42)$$

- Jonction 1_4 : $e_{14} = e_{15} + e_{16}$ Cette relation est déjà utilisée dans la relation précédente.
- Jonction 1_5 : $e_{19} = e_{18} - e_{20}$,

$e_{19} = R_5 Df_4$,

$e_{18} = De_2$ donné par la caractéristique de la jonction 0_2,

$e_{20} = SE_2$,

d'où :

$$RRA_4 = R_5 Df_4 - De_2 + SE_2 \qquad (2.43)$$

On construit ainsi, un tableau de signatures de pannes des composants surveillés et leurs correspondances sur les RRAs.

	SE_1	SE_2	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	De_1	De_2
RRA_1	**1**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
RRA_2	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**
RRA_3	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**1**
RRA_4	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**
RRA5	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**
RRA_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**

Tableau 2.1 : *Signatures des composants surveillés*

On remarque sur les RRAs obtenues (les 4 lignes premières du ***Tableau 2.1***) que les composants (Df_1 , Df_2) ont la même signature logique, aussi pour les composants (SE_2, Df_4), (1100) et (0001) respectivement, ce qui mettre l'isolation des défauts sur les composants concernés difficile. Pour résoudre ce problème, on a intérêt de suivre l'écriture des relations de redondance analytique par l'utilisation des relations de structure de jonction 0 jusqu'à l'obtention de signatures différentes (étape 4.).

- Jonction 0_1 : $f_9 = f_8 - f_{10}$

$f_9 = \left(C_1 s\right) De_1$,

$f_8 = f_7 = Df_2$, déduit par la caractéristique de la jonction 1_2 ,

$f_{10} = f_{11} = \frac{1}{m} Df_3$, par le parcours des chemins causaux on rencontre les jonctions 1_3, TF et 1_4,
d'où la nouvelle relation de redondance :

$$RRA_5 = (C_1 s)\, De_1 + \frac{1}{m} Df_3 - Df_2 \qquad (2.44)$$

Cette relation résout le problème de l'isolabilité de défauts qui affectent les composants (Df_1, Df_2) par la nouvelle signature ajouté par cette relation (l'avant dernière ligne du ***Tableau 2.1***), mais le problème reste pour l'autre paire (SE_2, Df_4). Pour le remédier on passe à la jonction 0_2 :

- Jonction 0_2 : $f_{17} = f_{16} - f_{18}$

  $f_{17} = (C_2 s)\, De_2$,

  $f_{18} = f_{19} = Df_4$, résultat de la caractéristique de la jonction 1_5,

  $f_{16} = f_{14} = Df_3$, résultat de la caractéristique de la jonction 1_4,

  d'où :

$$RRA_6 = (C_2 s)\, De_2 + Df_4 - Df_3 \qquad (2.45)$$

Cette nouvelle relation résout le problème de localisabilité des défauts qui affectent les composants (SE_2 , Df_4) par l'ajout d'une nouvelle signature théorique pour les deux composants, (000100) et (000101) respectivement.

On peut dire par comparaison à l'article **[31]**, que cette méthode qui utilise de même l'outil bond graph pour le diagnostic de défaut est très performante que celle utilisée dans **[31]**. Dans **[31]**, à partir du modèle bond graph, on construit le modèle d'état du système (***Fig. 2.15***), puis on divise le modèle en 4 sous système {système électrique - moteur - pompe - réservoir}. Avec des facteurs de pondération basés sur la probabilité de défaillance pour chaque sous système, on procède par une série de calcul d'une quantité appelée « entropie d'information » du bond de division (4, 10, 14), puis la valeur la plus petite de cette quantité correspond au bond de division, et la procédure de diagnostic quand un défaut est détecté par la comparaison entre la valeur mesurée de chaque composant physique avec la valeur normale (celle du modèle), et cela par la division successive de chaque sous système en composants ordinaires (R, C et I).

Cette procédure est notablement très lente, par étapes ou par le temps de calcul écoulé après la détection de défaut, alors que celle présentée par l'exemple précédent marque son efficacité soit pour la détection ou pour la localisation des défaut, et qui est même extensible pour la surveillance des composants physique (R, C et I), en utilisant simplement les relations constitutives de ces éléments comme un support de génération des RRAs.

2.6. Conclusion :

Ce chapitre vient de définir les concepts généraux de la surveillance des processus complexes. Les différentes méthodes trouvées dans la littérature expriment l'importance du savoir faire face aux différents modes de fonctionnement du système. L'outil bond graph avec ses aspects structurels et mathématiques prend sa place dans cette discipline pour aider les automaticiens et surtout les opérateurs dans ces situations. Le concept de génération de résidus par bond graph est présenté ici en mono-énergie, et fera l'objet d'une extension en multi-énergie dans le chapitre 5. Le chapitre suivant traite la modélisation des phénomènes physiques rencontrés dans les industries de génie des procédés par l'approche bond graph multi énergie.

Chapitre 3

CHAPITRE 3 : LES BOND GRAPHS MULTI ENERGIES EN GENIE DES PROCEDES

3.1. Introduction :

La modélisation des systèmes en génie des procédés est une étape nécessaire pour leur mise en œuvre, leur commande ainsi que leur supervision. Ces systèmes comportes l'interaction de plusieurs domaines de la physique telle que l'hydraulique, la thermodynamique et la chimie, d'où la nécessité d'une méthode unifiée de modélisation comme les bond graphs.

Cependant, vu la complexité de systèmes en génie des procédés, peu de travaux ont été élaborés dans ce sujet par les bond graphs qui se comporte comme un domaine ouvert pour la recherche.

Ce chapitre vient de présenter les bond graphs multi énergies rencontrés dans les processus en génie des procédés, en définissant leurs caractères d'interaction, et les différents phénomènes et composants présents dans ce secteur. Une méthode de linéarisation des composants multiports permettant de réduire la complexité d'analyse et de mise en équation de ces composants pour une utilisation ultérieure des concepts de bond graph déjà définis dans le chapitre 1.

3.2. Variables de puissance en génie des procédés :

3.2.1. Représentation multi-liens :

Les bond graphs mono-énergies sont utilisés pour la modélisation des processus mettant en œuvre une seule énergie à la fois (mécanique, électrique, thermique, …). Les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisés par l'interaction de plusieurs phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissance sont couplées. Elles seront représentées par un lien entouré par un anneau, comme indiqué sur la figure **3.1.a. [7, 9, 11, 21]**. Il existe aussi d'autres représentations en liens pointillés et en traits pleins ou par deux liens séparés pour distinguer entre vrai et pseudo-bond graph (**Fig. 3.1.b, c**).

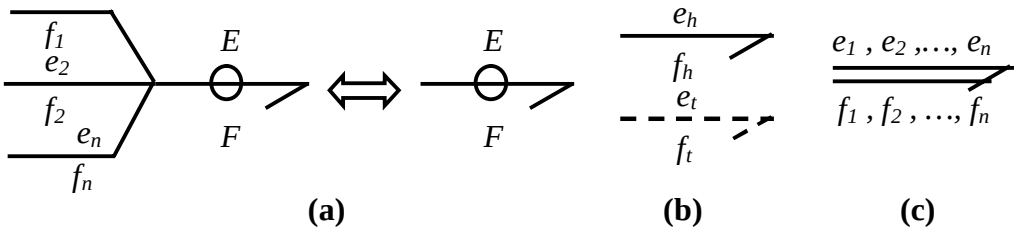


Fig. 3.1 : *Représentation multiliens des bond graphs multi énergies*

En génie des procédés, la forme vectorielle des variables de puissance est comme suit **[2, 21]** :

$$E = \begin{bmatrix} e_h & e_t & e_c \end{bmatrix}^T, \quad F = \begin{bmatrix} f_h & f_t & f_c \end{bmatrix}^T \tag{3.1}$$

avec e_h , e_t et e_c représentent respectivement l'effort hydraulique, thermique et chimique, f_h , f_t et f_c désignent respectivement les flux correspondants. La liste et le choix des variables seront développés par la suite.

3.2.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond graph :

Les systèmes mécaniques ou électriques sont modélisés par des bond graphs dont lesquels le produit effort-flux est la puissance instantanée transférée le long du lien ou à

travers les ports des composants du système. Ces bond-graphs sont appelés « vrais » bond graphs.

En génie des procédés, l'utilisation du vrai bond-graph introduit des variables d'effort thermique et chimique (entropie, potentiel chimique) de nature complexe et mal adapté aux problèmes de simulation, car elles n'obéissent pas à des lois de conservation simples **[9, 11]**. On introduit alors pour leur modélisation d'autres variables appelées « pseudo » bond graph pour lesquelles le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance **[11]**, avec les mêmes propriétés classiques d'un vrai bond graph (assignation de la causalité, la mise en équation, ….).

Sur le tableau **3.1**, les variables de puissance en vrai et en pseudo bond-graph utilisées en génie des procédés sont représentées.

Domaine	**Vrai bond graph**		**Pseudo bond graph**	
	Effort (e)	Flux (f)	Effort (e)	Flux (f)
Chimique 1.Tranformation 2.Cinétique	Potentiel chimique $\boldsymbol{\mu}$ **[J/mole]** Affinité chimique $\boldsymbol{A}$ **[J/mole]**	Flux molaire $\boldsymbol{\dot{n}}$ **[mole/s]** Vitesse de réaction $\boldsymbol{\dot{\xi}}$ **[mole/s]**	Concentration $\boldsymbol{C}$ **[mole/m^3]** -	Flux molaire $\boldsymbol{\dot{n}}$ **[mole/s]** -
Hydraulique	Pression $\boldsymbol{P}$ **[Pa]**	Débit volumique $\boldsymbol{\dot{V}}$ **[m^3/s]**	Pression $\boldsymbol{P}$ **[Pa]**	Débit massique $\boldsymbol{\dot{m}}$ **[Kg/s]**
Thermique 1. Conduction 2. Convection	Température $\boldsymbol{T}$ **[°K]**	Flux d'entropie $\boldsymbol{\dot{S}}$ **[J/(°K.s)]**	Température $\boldsymbol{T}$ **[°K]** Température ou Enthalpie spécifique $\boldsymbol{T}$ **[°K]** ou $\boldsymbol{h}$ **[J/Kg]**	Flux de chaleur $\boldsymbol{\dot{Q}}$ **[W]** Flux d'enthalpie $\boldsymbol{\dot{H}}$ **[W]**

Tableau 3.1: *Variables de puissance en vrai et en pseudo bond graph en génie des procédés*

D'autres variables peuvent aussi intervenir telles que le flux d'énergie interne $\boldsymbol{\dot{U}}$ ou la qualité $\boldsymbol{X}$ d'un mélange liquide-vapeur. On remarque que le nombre de variables est supérieur au nombre de degrés de liberté, c'est pourquoi le choix de la variable de liaison n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser.

La section suivante met le point sur le choix des variables pour quelques procédés types rencontrés en génie des procédés.

3.2.3. Phénomènes en génie des procédés :

a- Phénomènes de conduction :

Dans le cas de la modélisation de la matière au repos (problème de conduction) qu'on le rencontre en général dans les échangeurs de chaleurs (*Heat Exchanger* en anglais), dans les fours, dans les pertes thermiques à travers les parois, etc., on peut utiliser aussi bien la paire température-flux d'entropie ($\boldsymbol{T}$,$\boldsymbol{\dot{S}}$) pour constituer un vrai bond graph que la paire température-flux thermique ($\boldsymbol{T}$,$\boldsymbol{\dot{Q}}$) pour un pseudo bond graph **[9, 11]**. L'utilisation de cette dernière est toutefois plus commode pour la modélisation du phénomène de conduction de chaleur (**Fig. 3.2**).

En effet, le flux de chaleur échangé entre deux corps (**Fig. 3.2.a**) est décrit par une simple équation constitutive en pseudo bond graph (analogue à la loi d'Ohm en électricité) :

$$\dot{Q}=\frac{1}{R}(T_1-T_2) \tag{3.2}$$

Ce qui se représente facilement par un modèle en pseudo bond graph (**Fig. 3.2.b**).

Par contre, l'utilisation du flux d'entropie conduit à écrire les lois sous forme non linéaire couplée (les deux variables S_1 et S_2 s'expriment en fonction des deux efforts T_1 et T_2), ce qui nécessite l'utilisation d'un élément *R* à deux ports comme le montre la figure **3.2.c**.

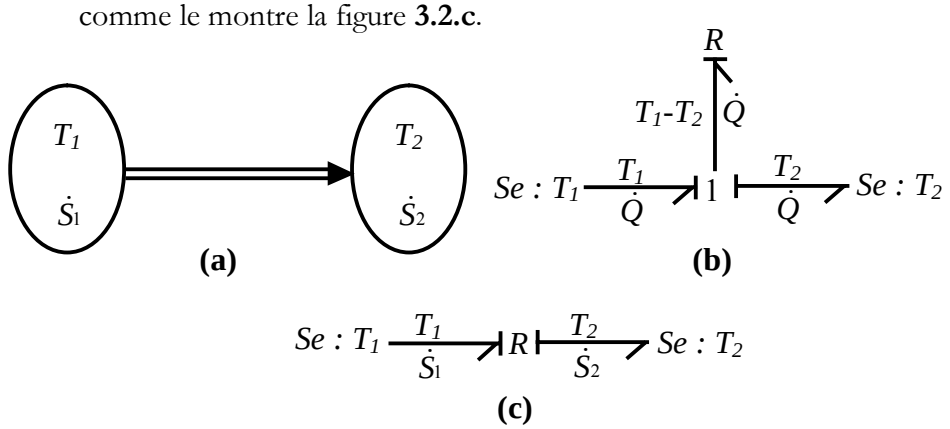


Fig. 3.2 : *Choix des variables de puissance pour le phénomène de conduction*
(a) *Schéma de principe,* ***(b)*** *Modèle en pseudo bond graph*
(c) *Modèle en vrai bond graph*

L'expression des flux d'entropie est déduite de l'équation de Carnot **[11]** :

$$\begin{cases} \dot{S}_1=\dfrac{\dot{Q}}{T_1}=\dfrac{1}{R}\dfrac{T_1-T_2}{T_1}, \dot{S}_2=\dfrac{\dot{Q}}{T_2}=\dfrac{1}{R}\dfrac{T_1-T_2}{T_2} \\ \dot{Q}=\dot{S}_2-\dot{S}_1=\dfrac{1}{R}\dfrac{(T_1-T_2)^2}{T_1T_2} \end{cases} \tag{3.2}$$

b- Phénomènes de convection :

Dans un processus de convection, nous avons deux énergies : hydraulique et thermique. Pour l'énergie hydraulique, on utilise en qualité de variable de puissance la paire $(P,\dot{m})$ et concernant la variable de flux thermique, le flux d'enthalpie $(\dot{H})$ est utilisé, puisqu'il représente la quantité d'énergie véhiculée dans le fluide par unité de temps, donc de puissance. En qualité de variable d'effort thermique, on utilise soit la température *T*, soit l'enthalpie spécifique *h*.

Le flux d'enthalpie est calculé, alors par l'expression :

$$\dot{H}=\dot{m}c_pT=\dot{m}h \tag{3.3}$$

Il faut noter que la notion d'enthalpie spécifique est, certes, d'approche intuitive plus difficile que la température, mais peut être déterminée facilement à partir des variables d'état hydraulique, la masse (*m*), et d'énergie, l'enthalpie (*H*) ($h=H/m$) **[9, 11]**. La détermination de température nécessite par contre la connaissance de la chaleur spécifique c_p ($T=\dfrac{\dot{H}}{\dot{m}c_p}$). La température est un paramètre mesurable par les capteurs, donc commode pour les boucles de commande.

Le choix de la variable d'effort dépend de l'état du fluide modélisé. On distingue principalement les états suivants **[9]**:

- **Liquide à température normale sous saturée :** Dans ce cas, nous avons intérêt à utiliser la température, en qualité de variable d'effort, car la chaleur spécifique c_p à température sous saturée est pratiquement constante et dépend faiblement de la température : celle de l'eau par exemple varie uniquement de 0.418 à 0.420 $J/(Kg°C)$ entre 15 et 100 °*C*. La manipulation de la variable *T* est, par rapport à l'enthalpie, plus commode pour la commande, car mesurable et plus " naturelle " pour l'opérateur.

- **Liquide à température saturée :** Le liquide étant à saturation, on peut déterminer pour chaque température, l'enthalpie correspondante. La chaleur spécifique varie avec la température, il sera alors difficile de calculer le flux d'enthalpie. Il suit qu'il est plus simple d'utiliser la paire *enthalpie spécifique-flux d'enthalpie* ($h, \dot{H}$). De plus, ce choix permet de reconstituer d'autres variables tel que le titre de la vapeur dans un mélange diphasique (X) et d'utiliser ainsi en simulation les fonctions thermodynamiques.

c- Systèmes chimiques :

Peu de travaux sur la modélisation par bond graph des systèmes chimiques ont été développés, telle que la modélisation des phénomènes de transformation de matière ou les réactions chimiques. On peut citer les travaux de **[24, 72]** qui traitent les phénomènes physico-chimiques sans modéliser les réactions chimiques par l'utilisation des vrais bond graphs pour reconstruire les différentes équations d'équilibre massique et énergétiques, alors que **[22]** traite les phénomènes hydrauliques et thermiques d'un mélange dans les réacteurs parfaitement mélangés (CSTR- Continuous Stirred Tank Reactor), modélisé par les pseudo-bond graphs. Dans l'article **[26]**, une proposition d'extension des pseudo-bond graph pour les systèmes thermodynamiques prend en considération le changement des propriétés thermodynamiques causé par l'ajout de nouveaux éléments de propriétés différentes, par le simple ajout des nouveaux bond hydrauliques sans changer la structure du modèle.

Pour les systèmes à changement de composition de la matière, l'article **[18]** traite la surveillance par bond graph d'une colonne de distillation continue. Les auteurs de cet article ont choisis de modéliser les phénomènes de transfert de la matière à travers les plateaux par des résistances multiports modulées par la différente concentration du mélange, et des élément *C* pour le stockage de la matière dans la phase liquide sur les plateaux. On peut trouver dans l'article **[75]** une application sur la modélisation bond graph d'un système chimique lié avec un système économique, présentée par le modèle en vrai bond-graph d'un réacteur continu (CSTR) pour la réaction chimique et en pseudo-bond graph pour les domaines hydraulique et thermique. Cet article montre aussi le caractère multidisciplinaire de la modélisation bond graph en regroupant différents domaines (chimique, hydraulique, thermique et économique), qui donne une autre méthode pour l'analyse et la synthèse des procédés industriels.

Dans les systèmes chimiques proprement dits, on peut distinguer les variables de puissance affectées aux produits chimiques participant à la réaction et celle

modélisant les phénomènes cinétiques de la réaction. Concernant les produits de réaction, la variable d'effort est le potentiel chimique (ou tension chimique) $\mu[J/mole]$ qui forme avec le flux molaire $\dot{n}[mole/s]$ un vrai bond graph. Comme il est montré dans **[9, 11]**, l'énergie interne accumulée par un système chimique est décrite par l'équation de Gibbs :

$$dU = TdS - PdV + \mu dn \qquad (3.4)$$

La relation (3.4) est représentée en bond graph par le multiport *C* à trois ports comme indiqué sur la figure ***3.3***:

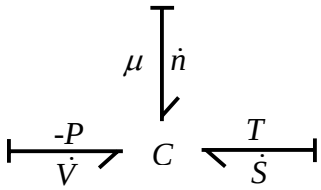


Fig. 3.3 : *Bond graph d'un système chimique à un seul composant*

Deux ports associant les puissances thermodynamique et hydraulique, et un lien supplémentaire de puissance chimique.

Pour un système chimique de *k* composés, la relation (3.4) devient :

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^{k} \mu_i \dot{n}_i \qquad (3.5)$$

le modèle bond graph correspondant est donnée par la figure suivante (***Fig. 3.4***) :

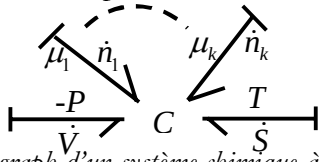


Fig. 3.3 : *Bond graph d'un système chimique à un seul composant*

La tension chimique comme elle a été définie dans **[9, 11]**, est le quotient de l'enthalpie libre par la quantité de la matière. Dans le système SI, elle s'exprime en Joule par mole. Son unité est le *Gibbs [G],* $1G = \dfrac{1\,Joule}{1\,mole}$

Il existe une similarité entre la pression et la tension chimique. En particulier, si la pression augmente, la tension chimique augmente aussi. Par contre, contrairement à la pression, la tension chimique diminue avec l'augmentation de la température **[11]**.

Dans **[26]**, nous trouvons un autre choix pour la modélisation des systèmes mixtes (différents composés chimiques), sert à attribuer pour chaque composé une pression et un flux massique spécifique, inspiré par le fait qu'il existe un lien entre le flux molaire $\dot{n}$ et le flux massique $\dot{m}$, donc les états du système sont la pression, les pressions partielles des composés et la température sont en fonction de la masse totale, les masses partielles, l'énergie totale et le volume du fluide.

En pseudo-bond graph, on utilise la concentration $C\left[mole/m^3\right]$ au lieu du potentiel chimique en qualité de variable d'effort et le flux molaire pour la variable de flux. Notons que dans les mêmes conditions, le potentiel chimique de

l'espèce *i* est lié approximativement à sa concentration C_i par l'expression connue **[9, 11]**:

$$\mu_i = \mu_{i_0} + RT \ln C_i \tag{3.6}$$

où C_i est la concentration molaire et μ_{i_0}, la tension chimique indépendante de la référence prise à *T=constante*. *R* est la constante des gaz.

Concernant les variables de puissance des phénomènes chimiques proprement dits (réactions chimiques), modélisés par un vrai bond graph, on a pour l'effort, l'affinité chimique $A[J/mole]$ qui représente la forme motrice qui pilote la réaction. Elle doit être nulle à l'équilibre ($A=0$) **[11]**, et pour le flux, la vitesse de réaction $\dot{\xi}[mole/s]$ qui est fonction de la température *T* et de l'affinité *A*.

En pseudo-bond graph, les variables de puissance utilisées pour modéliser la réaction chimique sont : les concentrations des substances C, en qualité d'effort, et en qualité de flux les dérivés de concentration $\dot{C}$. Cette approche est largement utilisée, car elle permet de manipuler des variables plus intuitives et facilement mesurables (concentration), donc leur simulation est facile **[2, 11]**.

d- Changement de phase :

On distingue dans ce processus, l'évaporation et la condensation de la vapeur :

- **Evaporation :** Le phénomène d'évaporation est illustré ici par la modélisation d'une chaudière alimenté en liquide, par les pseudo-bond graphs (***Fig. 3.5***) :

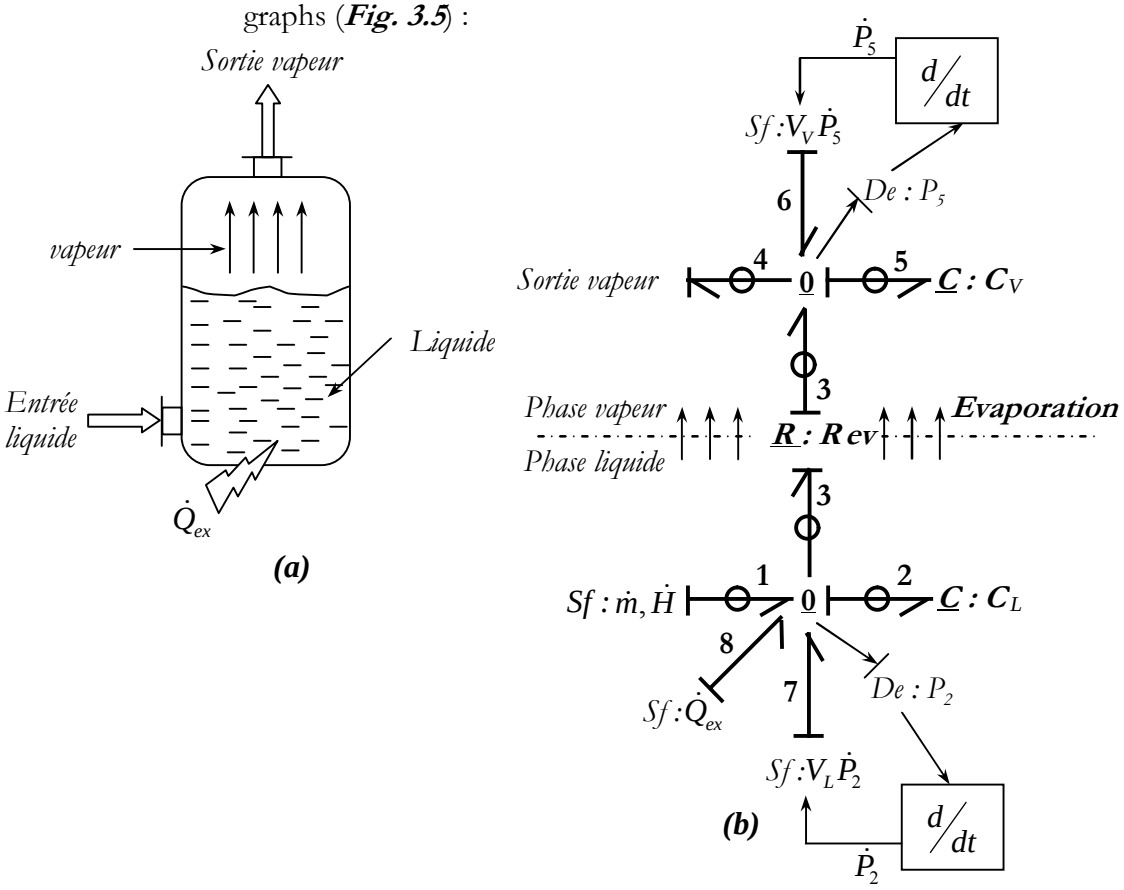


Fig. 3.5 : *Modèle en pseudo-bond graph du procédé d'évaporation*
(a) *Schéma de principe* ***(b)*** *Modèle bond graph*

On a dans ce cas précis : les phases eau et vapeur sont nettement séparées. Les phénomènes de stockage et de dissipation d'énergie dans le système sont ici clairement représentés par les liens couplés d'énergie thermique $(h, \dot{H})$ et hydraulique $(P, \dot{m})$. La puissance thermique de chauffe $\dot{Q}_{ex}$ est représentée par un lien simple. Les deux phases eau et vapeur sont liées par le multiport $R : R_{ev}$ qui modélise le phénomène d'évaporation. L'accumulation d'énergie dans les phases vapeur et eau est modélisée par les multiports C_V et C_L, qui associent le stockage d'énergie thermique et hydraulique dans leurs phases correspondantes.

Les termes $V_V \dot{P}_5$ et $V_L \dot{P}_2$ modélisés par les sources de flux (Sf) sur les liens 6 et 7 représentent l'énergie mécanique de pressurisation due à la variation des pressions, qui sont ajoutées aux parties thermiques du modèle **[9, 11]**.

- **Condensation :** Le phénomène de condensation est un procédé de changement de phase qui s'accompagne de la libération de sa chaleur de vaporisation.

  La condensation de la vapeur est supposée se produire par échange de chaleur avec un corps plus froid. Nous sommes alors en présence de deux phénomènes thermiques qui se déroulent simultanément : phénomène de conduction de la chaleur vers l fluide ou solide refroidissant et convection du condensât. Nous utilisons alors pour la simulation les paires $(T, \dot{Q})$ et $(h, \dot{H})$ pour la puissance thermique et $(P, \dot{m})$ pour la puissance hydraulique. Il faut noter que ces deux énergies sont fortement couplées. Le débit massique condensé dépend aussi des variables d'effort thermiques que hydrauliques **[9]**.

  Le phénomène de la condensation peut être représenté par le modèle bond graph simplifié de la figure ***3.6***. Un modèle bond graph détaillé est donné dans **[1, 2, 9, 74]**.

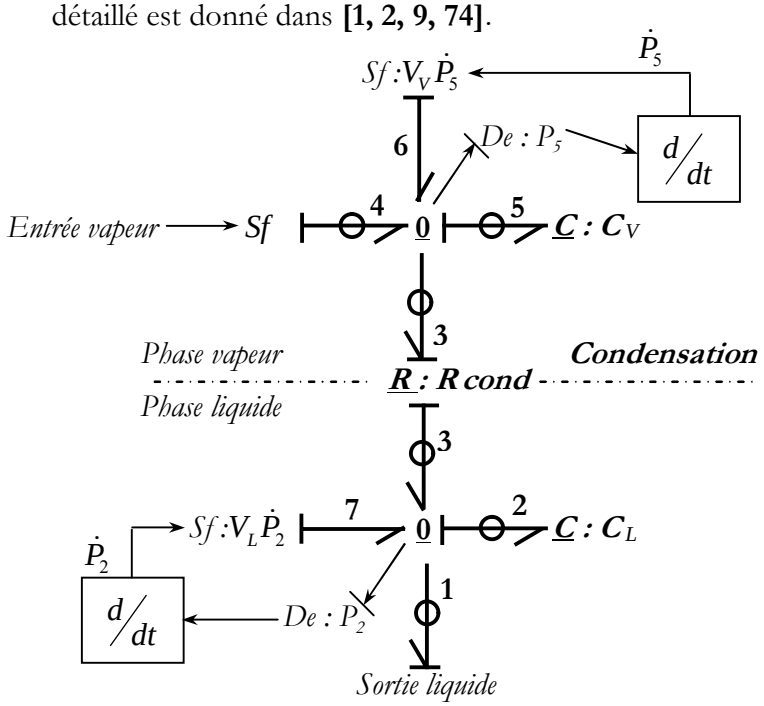


Fig. 3.6 : *Modèle en pseudo-bond graph simplifié du procédé de condensation*

e- Mélange Liquide-Vapeur :

On trouve souvent dans l'industrie de génie des procédés des systèmes de mélange liquide-vapeur, comme les procédés de distillation ou les générateurs de vapeur.

On distingue, en fonction de l'état thermodynamique du mélange, différents cas :

- **Mélange à température normale :** On choisi pour la variable d'effort thermique, la température (T) car la chaleur spécifique à température normale est pratiquement constante et dépend faiblement de la température **[11]**. La manipulation de (T) est plus commode par rapport à (h) pour la commande car elle est mesurable et est plus naturelle pour l'opérateur.
- **Mélange à température saturée :** Le mélange étant à saturation, on peut déterminer en équilibre thermodynamique pour chaque température, l'enthalpie correspondante (équation 3.3). La chaleur spécifique (c_p) varie sensiblement avec la température, alors il est plus simple d'utiliser la paire *enthalpie spécifique-flux d'enthalpie* ($h, \dot{H}$) **[11]**. De plus, ce choix permet de reconstituer d'autres variables tel que le titre de la vapeur dans un mélange diphasique (X) et d'utiliser ainsi en simulation les fonctions thermodynamiques. Parmi les processus industriels où on trouve les mélanges liquide-vapeur, on a l'accumulateur de vapeur avec son modèle bond graph donné par la figure ***3.7*** **[9, 11]** et aussi dans les procédés de distillation (plateaux) :

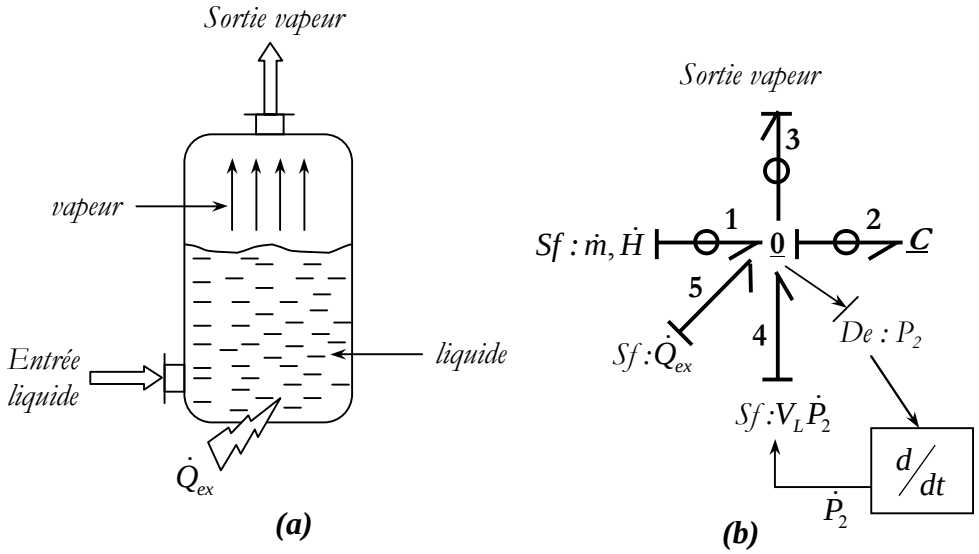


Fig. 3.7 : *Modèle bond graph d'un accumulateur de vapeur*
(a) *Schéma de principe* ***(b)*** *modèle bond graph*

3.3. Eléments multiports en génie des procédés :

3.3.1. Source thermofluide :

Dans les systèmes thermofluides, le couplage des deux énergies est quantifié par l'équation de couplage (éq. 3.3). A travers cette équation, on voit que le flux thermique est une fonction de flux hydraulique et de l'effort thermique :

$$f_t = F\left(f_h, e_t\right) \tag{3.7}$$

Il est possible de représenter la source thermofluide comme elle est définie par la figure suivante (***Fig. 3.8***).

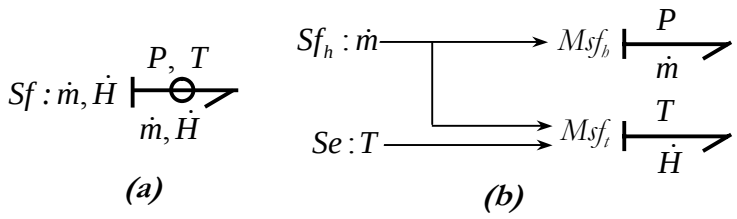


Fig. 3.8 : *Représentation d'une source thermofluide à énergies couplées,* ***(a)*** *découplées* ***(b)***

Cette représentation est importante du point de vue physique et de l'analyse des systèmes de commande **[2, 21]**. En effet, le modèle bond graph nous montre bien que les véritables actionneurs sont le flux hydraulique $Sf_h : \dot{m}$ (qui peut être fournie par une pompe), et la source de température $Se : T$ (fournie par une source extérieure). La source de flux thermique (flux d'enthalpie) dépend bien de la température du fluide et de son débit massique.

3.3.2. Elément R :

Les phénomènes dissipatifs d'énergie sans génération d'entropie, rencontrés usuellement dans les procédés énergétiques, sont principalement provoqués par les procédés technologiques suivants : les restrictions hydrauliques (conduite, vanne, filtre,… etc.), changement de phase de la vapeur (évaporation, condensation), transfert thermique, … etc.

Le multi-port *R* met en œuvre des lois matricielles. Dans notre cas, nous avons quatre entrées et quatre sorties choisies en fonction des causalités affectées à cet élément.

a- Conduite à restriction fixe : A chaque système réel de transport est associé des éléments *R* et *I* : l'élément *I* décrit l'inertie du fluide transportée et *R* représente le phénomène de dissipation d'énergie.

Si l'inertie du fluide est négligeable, alors le processus peut être décrit par un multiport *R* (***Fig. 3.9***).

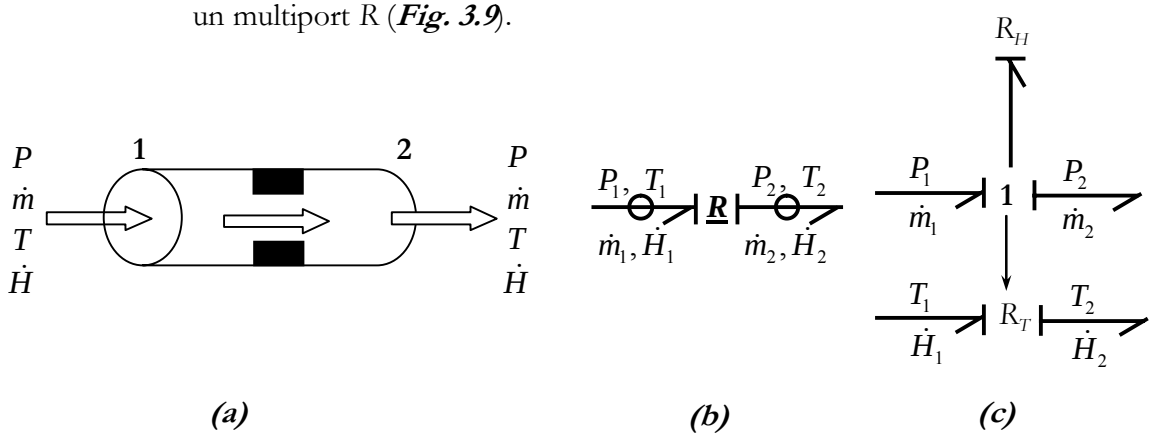


Fig. 3.9 : *Modèle bond graph d'un tuyau avec restriction hydraulique fixe* ***(a)*** *Schéma de principe,* ***(b)*** *bond graph couplé,* ***(c)*** *bond graph découplé*

En tenant compte de la loi de continuité ($F_{in} = F_{out}$), la relation matricielle constitutive de l'élément multiport *R* est comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{H}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m}_2 \\ \dot{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{RH}\left(P_1, P_2, T_1, T_2\right) \\ \Phi_{RT}\left(P_1, P_2, T_1, T_2\right) \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Les relations Φ_{RH} et Φ_{RT} sont non linéaires et dépendent principalement de l'état thermodynamique du fluide (régime saturé ou sous saturé) et de la nature des phénomènes physiques mis en jeu (compressibilité).

Pour un régime laminaire **[2, 21]**, en utilisant l'équation (3.3), l'équation (3.8) devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{m} \\ \dot{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R.sign(P_1 - P_2)\sqrt{|P_1 - P_2|} \\ R.T_1.sign(P_1 - P_2)\sqrt{|P_1 - P_2|} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

avec $R = \dfrac{D^2.\pi.1000}{128.L.\nu}$ (3.10)

tel que D : est le diamètre de la conduite,
L : longueur de la conduite,
ν : viscosité dynamique

alors pour le régime turbulent,

$$R = \sqrt{\frac{\rho.D^5.\pi^2}{8.L.\lambda}} \tag{3.11}$$

avec ρ : masse volumique,
λ : Coefficient de perte de charges.

b- Conduite à orifice variable (vanne réglable) : Si la restriction est une vanne, alors le coefficient hydraulique dépend de la position x de la tige de la vanne. Le modèle bond graph correspondant est donné par la figure ***3.10***.

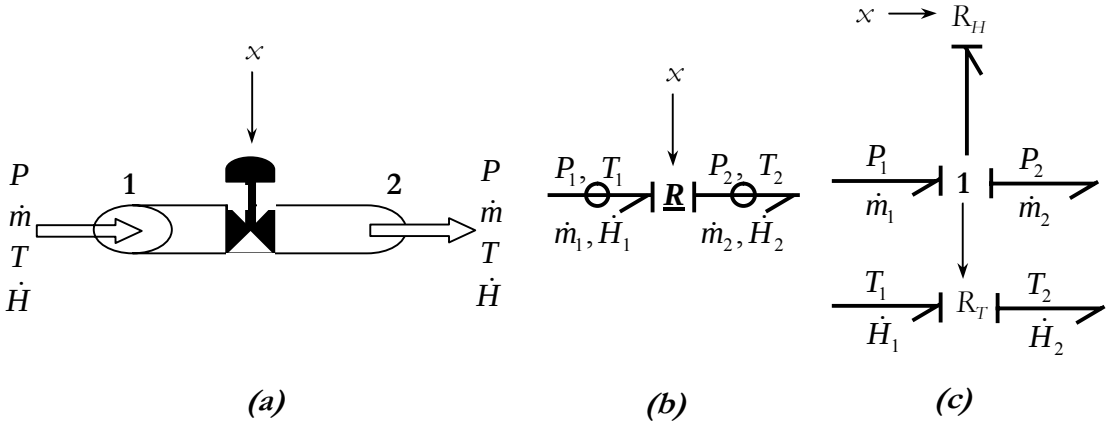


Fig. 3.10 : *Modèle bond graph d'une vanne à orifice variable*
(a) *Schéma de principe* ***(b)*** *Modèle bond graph multi énergie* ***(c)*** *bond graph découplé*

La variation du flux à travers la vanne peut être calculée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{m} \\ \dot{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{V\max}.f(x).sign(P_1 - P_2)\sqrt{|P_1 - P_2|} \\ C_{V\max}.f(x).T_1.sign(P_1 - P_2)\sqrt{|P_1 - P_2|} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

avec, C_V : est une grandeur qui représente la taille de la vanne,
x : position de la tige de la vanne comprise entre 0 et 1,
$f(x)$: caractéristique de la vanne qui peut prendre une des formes suivantes :

- Linéaire : $f(x) = x$,
- Racine carrée : $f(x) = \sqrt{x}$,

- Egale pourcentage : $f(x) = R^{x-1}$, avec R est la réglabilité de la vanne comprise généralement entre 20 et 50.

3.3.3. Elément C :

Dans les processus industriels de génie des procédés, les multiports *C* représentent les accumulateurs d'énergies (chaudière, réservoir, ballon, …) et y sont associés au phénomène de stockage de l'énergie thermique, hydraulique et aussi chimique **[18]**.

Mis en causalité intégrale, le multiport *C* comporte trois variables d'état :

$$E = \begin{bmatrix} e_h \\ e_t \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{CH}\left(\int (F_{in}, F_{out})\, dt\right) \\ \Phi_{CT}\left(\int (F_{in}, F_{out})\, dt\right) \\ \Phi_{CC}\left(\int (F_{in}, F_{out})\, dt\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{CH}(m, H, n) \\ \psi_{CT}(m, H, n) \\ \psi_{CC}(m, H, n) \end{bmatrix} \qquad (3.13)$$

avec Φ_{CH}, Φ_{CT} et Φ_{CC} sont des fonctions fortement non linéaires des flux entrants et sortants du multiports et dépendent de l'état thermodynamique et chimique du fluide (saturation et nombre de constituants).

a- Réservoir de stockage :

Considérons le modèle dynamique d'un réservoir de stockage qui appartient à la classe des processus d'accumulation d'énergie. Le modèle bond graph couplé est donné par la figure ***3.11.b***, ainsi que le modèle bond graph découplé (***Fig. 3.11.c***), qui est plus adapté à l'analyse 11t5b1Tj0 -0.40-1t5b5.6(é)6.c2TD00ac 00a 453.6803Tf11.9979 e .9979ergan

$$\begin{cases} m_V = \int \left(\dot{m}_{ev} - \dot{m}_{out} \right) dt \\ H_V = \int \left(V_V \dot{P}_V + \dot{H}_{ev} - \dot{H}_{out} \right) dt \end{cases} \tag{3.17}$$

Les sources de flux fictives $Sf^* : V_L \dot{P}_L$ et $Sf^* : V_V \dot{P}_V$ représentent l'énergie mécanique de pressurisation due respectivement à la variation des pressions du liquide et de la vapeur. V_L et V_V sont les volumes occupés par le liquide et la vapeur dans la chaudière.

Les efforts thermiques (enthalpies spécifiques) sont calculés en divisant l'enthalpie totale H par la masse stockée correspondante dans chaque phase.

On considère qu'à l'interface liquide-vapeur, il se produit un échange par évaporation. Ces phénomènes sont modélisés par l'élément R *:* R_{ev} . Les équations constitutives de ce multiport qui associe les phénomènes d'évaporation (de dissipation d'énergie) sont empiriques **[2, 9, 11]**, et calculent le débit massique et l'enthalpie d'évaporation :

$$\begin{cases} \dot{m}_{ev} = K_{ev} \left(P_L - P_V \right) \\ \dot{H}_{ev} = \dot{m}_{ev} \left(h_L - h_V \right) = \dot{m}_{ev} L \end{cases} \tag{3.18}$$

avec L *:* est la chaleur latente d'évaporation,

K_{ev} *:* coefficient de proportionnalité déterminé par expérience.

L'eau et la vapeur sont à saturation, les pressions P_L et P_V sont alors calculées en fonction des enthalpies correspondantes sur la base des tables ou des fonctions thermodynamiques $f_P \left(h_L \right)$ et $f_P \left(h_V \right)$ **[9, 11]**.

3.3.4. Elément Hexa :

L'élément *Hexa* (***H**eat **Ex**chan**g**er ou échangeur de chaleur*) permet de représenter les phénomènes de transfert de flux thermique par conduction à travers une paroi (sans contact direct).

Comme il est montré dans **[9]**, les phénomènes d'échange de chaleur entre deux fluides à travers une paroi métallique (***Fig. 3.14.a***) sont modélisés par des éléments *R* (***Fig. 3.14.b***) ou par des éléments *Hexa* (***Fig. 3.14.c***).

Dans le processus d'échange thermique (dans les processus thermo-fluides) (***Fig. 3.14.a***), il existe une continuité du débit massique ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$) mais une variation de la température et du flux thermique ($T_1 \neq T_2, \dot{H}_1 \neq \dot{H}_2$). La modélisation par une jonction 0 de ce type de processus telle que celle donnée par la figure (***Fig. 3.14.b***) n'est pas adéquate. (Jonction 0 $\Rightarrow T_1 = T$ qui ne reflète pas le phénomène physique réel). Si on remplace la jonction 0 et l'élément *R* par un bloc de fonction *Hexa* comme dans la (***Fig. 3.14.c***), on déduit les équations constitutives de cet élément comme suit :

$$\begin{cases} \dot{m}_2 = \dot{m}_1, \dot{H}_2 = \dot{H}_1 - \dot{Q}_3 \\ T_2 = \dfrac{\dot{H}_2}{\dot{m}_2 c_{p_2}} \neq T_1 \end{cases} \tag{3.19.a}$$

$$\begin{cases} \dot{m}_2 = \dot{m}_1, \dot{H}_2 = \dot{H}_1 - \dot{Q}_3 \\ T_2 = \dfrac{\dot{H}_2}{\dot{m}_2 c_{p_2}} \neq T_1 \end{cases} \tag{3.19.b}$$

qui décrivent précisément les phénomènes physiques du système, sachant que c_p est la chaleur spécifique, qui est déterminée à partir des propriétés du fluide.

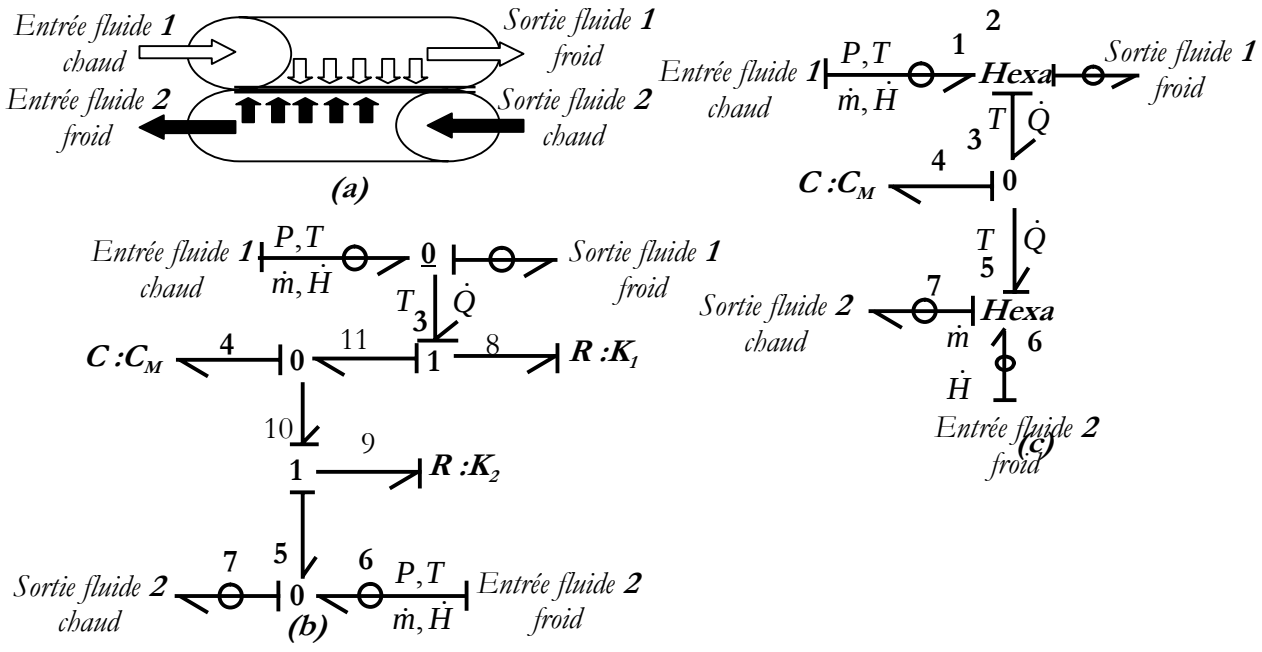


Fig. 3.14 : *Modèle bond graph d'un échangeur de chaleur*
(a) *Schéma de principe,* ***(b)*** *Modèle avec des éléments* R*,*
(c) *Modèle avec des éléments Hexa*

Parmi les applications des éléments *Hexa*, il y a les modèles du condenseur, échangeur de chaleur pour les stations de génération de vapeur **[1, 2, 9, 74]** ou pour les colonnes de distillation **[18]**.

3.4. Linéarisation des éléments bond graph multi-énergies non linéaires :

3.4.1. Introduction :

Le modèle bond graph est aussi un outil d'analyse et d'aide à la décision pour les systèmes industriels, et afin d'appliquer les propriétés structurelles déduites du bond graph linéaire (*chapitre1*), les modèles bond graphs non linéaires à énergies couplées doivent être linéarisés.

Pour linéariser les modèles non linéaires à énergies couplées (présents en génie des procédés), l'approche classique en automatique consiste à écrire l'équation d'état globale non linéaire (EENL) du système puis la linéariser et obtenir ainsi un modèle linéarisé tangent (EEL). Cette procédure est évidemment complexe à réaliser dans le cas des procédés complexes constitués par l'interconnexion d'un ensemble de composants.

En bond graph, il a été montré dans **[2]** que le triplet (*A, B, C*) d'une équation d'état linéarisée (EEL) obtenu par un modèle linéarisé tangent par une approche classique est équivalent à celui obtenu par bond graph linéarisé (BGL) en linéarisant les composants du bond graph non linéaire (BGNL) comme elle est illustrée par la figure (***Fig. 3.15***).

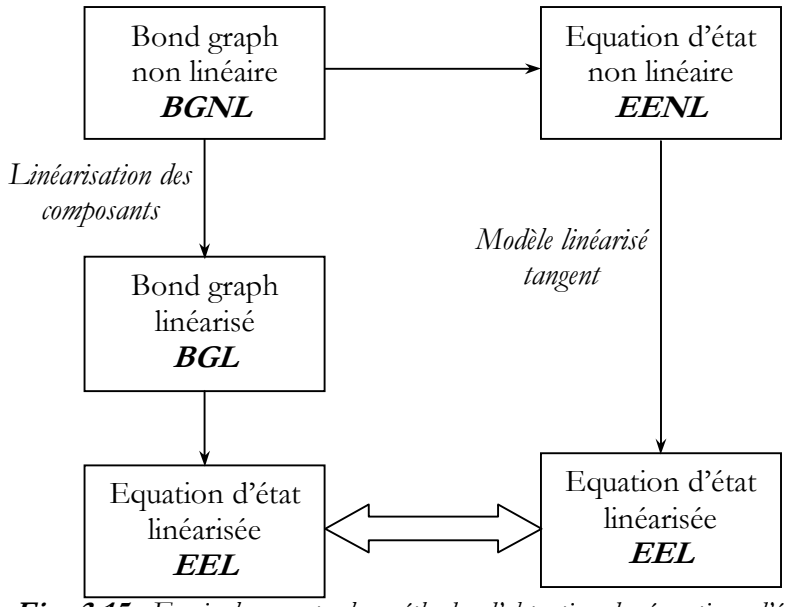


Fig. 3.15 : *Equivalence entre les méthodes d'obtention des équations d'états linéaires*

Cette méthode consiste à linéariser les composants multiports non linéaires ainsi rencontrés dans la modélisation en génie des procédés, comme les sources thermofluides, les éléments mutiports *R* et *C* suivant la procédure utilisée dans **[2, 16, 18]**, pour pouvoir appliquer les méthodes de génération des résidus pour la surveillance.

3.4.2. Source thermofluide linéarisé :

Dans les systèmes thermofluides, la couplage des deux énergies est quantifié par l'équation suivante :

$$\dot{H} = \dot{m}.h = \dot{m}.c_p.T = F\left(\dot{m},T\right) \tag{3.20}$$

A travers cette équation non linéaire, on voit que le flux thermique f_T (flux d'enthalpie) est une fonction du flux hydraulique f_H (débit massique) et de l'effort thermique e_T (température) :

$$f_T = F\left(f_H, e_T\right) \tag{3.21}$$

La linéarisation de cette équation autour du point de fonctionnement $(\bar{\dot{m}}, \bar{T}, \bar{\dot{H}})$ donne :

$$\begin{cases} \dot{H}' = \left(\dfrac{\partial F}{\partial \dot{m}}\right)_{(\bar{\dot{m}},\bar{T})}.\dot{m}' + \left(\dfrac{\partial F}{\partial T}\right)_{(\bar{\dot{m}},\bar{T})} T' \\ \dot{H}' = c_p \bar{T}.\dot{m}' + \bar{\dot{m}} c_p T' \end{cases} \tag{3.22}$$

où $\dot{H}'$, $\dot{m}'$ et T' sont les variables incrémentées qui représentent les nouvelles variables.

Le terme $\bar{\dot{m}}.c_p.T'$ est représenté dans le modèle bond graph linéarisé par une source de flux modulée par T', et le terme $c_p.\bar{T}.\dot{m}'$ par une source de flux modulée par un lien d'information sur la variation du débit hydraulique $\dot{m}'$. On suppose que le détecteur qui nourri la source est idéal (ne consomme pas de puissance).

Le bond graph linéarisé est représenté par la figure (***Fig. 3.16***).

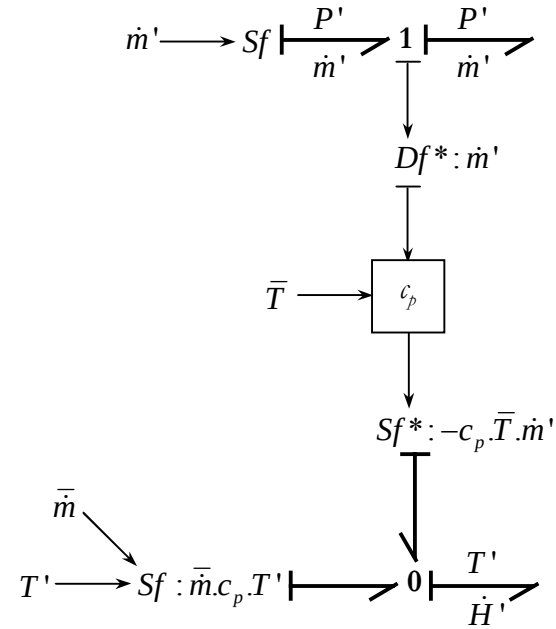


Fig. 3.16 : *Modèle bond graph linéarisé d'une source thermofluide*

3.4.3. Elément R linéarisé :

Comme nous avons déjà vue, les principaux phénomènes modélisés par le multiport *R* sont : l'évaporation, la condensation de la vapeur, la convection d'un fluide à travers un tuyau, …etc. et tout phénomène qui représente une dissipation ou une perte.

En général, les équations constitutives dans le cas d'une résistance *R* à 2-ports en causalité conductance (***Fig. 3.17***), si nous tenons compte de la loi de continuité qui conduit à l'égalité des débits massiques et d'enthalpies en amont et en aval de la conduite, et de l'état thermodynamique du fluide, que l'on suppose monophasique, sont données sous la forme matricielle suivante (cas d'une conduite à restriction variable) :

$$\begin{cases} \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} = \dot{m}(P,x) \\ \dot{H}_1 = \dot{H}_2 = \dot{H} = \dot{H}(P,T,x) \end{cases} \tag{3.23}$$

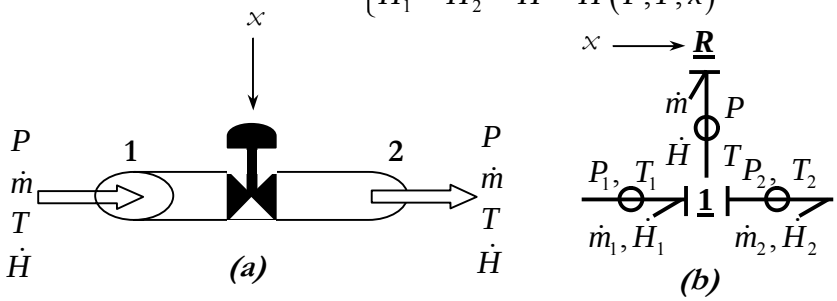


Fig. 3.17 : *Modèle bond graph d'une conduite à restriction variable en causalité conductance*

La linéarisation autour du point de fonctionnement $(\overline{P},\overline{T},\overline{x})$ **[2, 16]** donne :

$$\begin{cases} \dot{m}' = \left(\dfrac{\partial \dot{m}}{\partial P}\right)_{(\overline{P},\overline{T},\overline{x})}.P' + \left(\dfrac{\partial \dot{m}}{\partial x}\right)_{(\overline{P},\overline{T},\overline{x})}.x' \\ \dot{H}' = \left(\dfrac{\partial \dot{H}}{\partial P}\right)_{(\overline{P},\overline{T},\overline{x})}.P' + \left(\dfrac{\partial \dot{H}}{\partial T}\right)_{(\overline{P},\overline{T},\overline{x})}.T' + \left(\dfrac{\partial \dot{H}}{\partial x}\right)_{(\overline{P},\overline{T},\overline{x})}.x' \end{cases} \tag{3.24}$$

Le bond graph résultant d'un multiport *R* linéarisé est donné par la figure suivante (***Fig. 3.18***) :

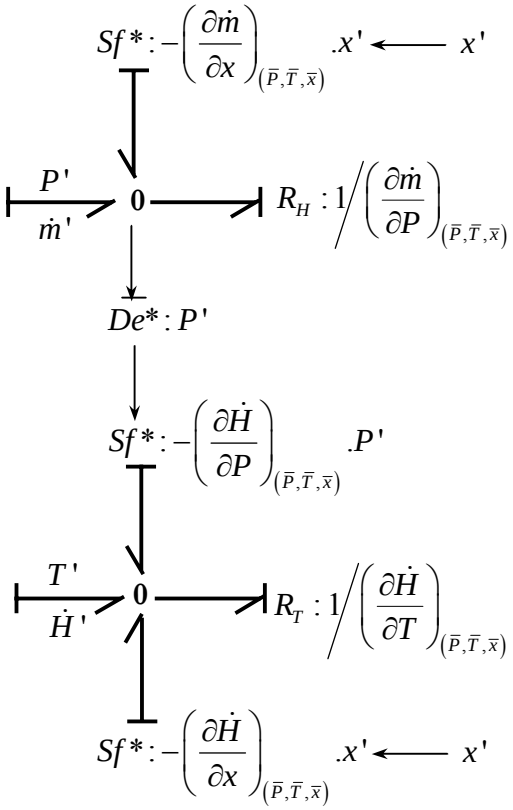


Fig. 3.18 : *Bond graph linéarisé du multiport* R *en causalité conductance*

Cette linéarisation ajoute au système une source de flux fictive modulée par une variable d'effort, obtenue par un détecteur d'effort fictif (le ' * ' pour distinguer les sources et les détecteurs fictifs des réels), et deux autres sources de flux fictives alimentées par le signal x , position de la tige de la valve.

3.4.4. Elément C linéarisé :

L'élément *C* modélise généralement les phénomènes d'accumulation d'énergie dans les processus de génie des procédés. Si on considère l'exemple d'une chaudière avec un mélange diphasique homogène à une seule phase (***Fig. 3.12***), et suivant la causalité intégrale affectée au multiport, les sorties de ce dernier sont données par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} P = \dfrac{g}{A}\left[\int \dot{m}dt\right] = F_H\left(m\right) \\ T = \dfrac{\int \dot{H}dt}{\int \dot{m}dt} = F_T\left(m, H\right) \end{cases} \tag{3.25}$$

La première équation est linéaire, on ne doit linéariser que la deuxième. La linéarisation de Tylor de cette dernière autour du point de fonctionnement ($\bar{m}, \bar{H}$) donne **[2, 16]** :

$$\begin{aligned} T' &= \left(\frac{\partial F_T}{\partial m}\right)_{(\bar{m},\bar{H})} .m' + \left(\frac{\partial F_T}{\partial H}\right)_{(\bar{m},\bar{H})} .H' \\ T' &= \frac{1}{m}\left[\int \dot{H}'dt\right] - \frac{\bar{H}}{\bar{m}^2}\left[\int \dot{m}'dt\right] \end{aligned} \tag{3.26}$$

Le bond graph linéarisé de l'élément *C* à 2-ports est donné par la figure suivante (***Fig. 3.19***) :

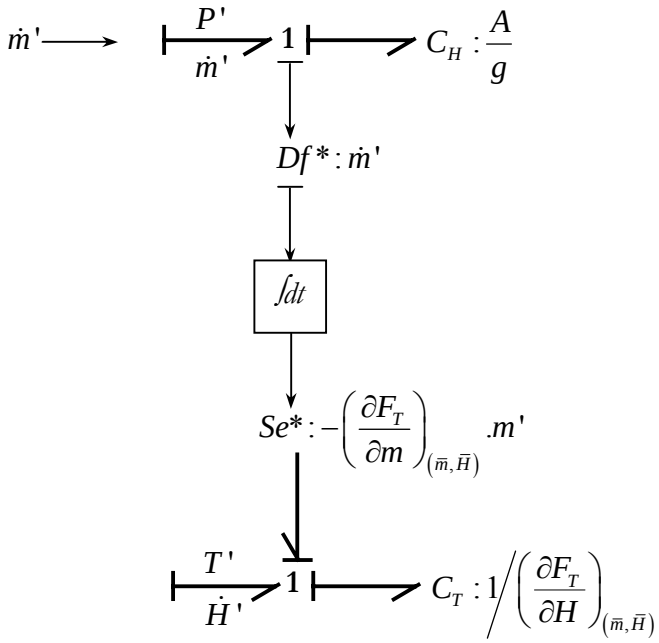


Fig. 3.19 : *Modèle bond graph linéarisé du multiport C en causalité intégrale*

3.5 Conclusion :

En concluant ce chapitre par la signalisation de l'apport bond graph pour la modélisation des systèmes en génie des procédés, en les rendant plus accessibles aux ingénieurs et physiciens par l'analogie aux autres domaines physiques.

Comme exemple d'application où on trouve différents phénomènes de génie des procédés, on a la colonne de distillation qui comporte plusieurs domaines de la physique: l'électricité pour la commande des électrovannes, la chimie par le transfert de la matière, la thermodynamique par les phénomènes énergétiques et l'hydraulique par l'écoulement du fluide à travers la colonne. Le chapitre suivant portera sur les clés de la modélisation d'un tel processus avec la comparaison de la modélisation analytique traditionnelle.

Chapitre 4

CHAPITRE 4 : LA COLONNE DE DISTILLATION DISCONTINUE

4.1. Introduction :

La distillation est la plus vieille méthode de séparation, et la plus importante pour la production des substances chimiques pures. Elle a été probablement découverte d'abord par les chimistes Alexandriens au premier siècle des ans de notre ère **[67]**. Elle a été principalement utilisée pour produire les boissons alcoolisées et les huiles essentielles.

Elle constitue la partie principale ou la plus utilisée dans les industries chimiques comme procédé de séparation (présente environ 90-95% dans l'industrie des Etats Unis **[62]**).

Le but de la distillation est de séparer l'alimentation ou deux ou plusieurs produits avec des compositions chimiques différentes de celui de l'alimentation.

Nous décrivons dans ce chapitre, son principe de fonctionnement, les différents types de colonnes les plus usités. La quatrième section sera consacrée à la présentation du modèle analytique et le modèle bond graph à mots d'une colonne de distillation discontinue pilote de type « UOP Batch distillation column» **[69, 70]**.

4.2. Principe de fonctionnement d'une colonne de distillation :

La distillation est une opération de base dans les industries pétrochimiques et pharmaceutiques. C'est un procédé chimique de type colonne qui permet de séparer les constituants d'un mélange liquide en se basant sur le fait que leurs points d'ébullition sont différents (à volatilité différente)**[62, 64, 65]**.

Quand un mélange est placé dans une enceinte sous des conditions de température et de pression comme les suivantes :

- augmentation de la température avec une pression constante,
- diminution de la pression avec une température constante,
- variation simultanée de la pression et de la température,

deux phases différentes apparaissent, une phase liquide et une vapeur, et un équilibre thermodynamique établit entre elles.

Une colonne de distillation consiste en un contact de courant vapeur et liquide dans le but d'effectuer un transfert de masse entre les deux phases. Cependant, le contact est généralement effectué par une série de plateaux. Dans une opération normale, il y a une certaine quantité de liquide sur chaque plateau, et quelques arrangements sont faits pour faire monter la vapeur en passant à travers le liquide, généralement par l'utilisation des plateaux perforés (**Fig. 4.1**).

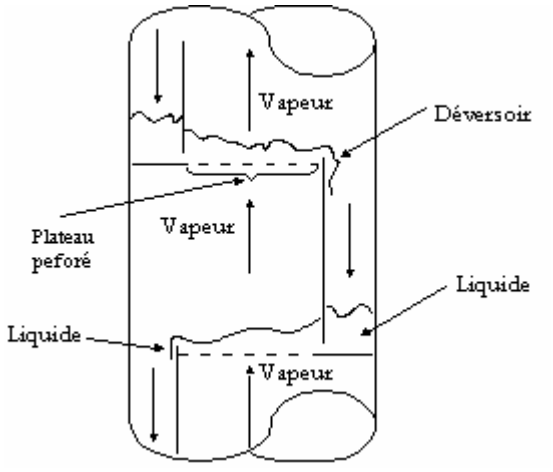


Fig. 4.1 : *Plateaux perforés de distillation*

Les mélanges à séparer sont variés du binaire (2 composants chimiques) aux multi-composants. En tête de la colonne (**Fig. 4.1**), la vapeur est condensée pour obtenir le distillat. Une partie du distillat est éliminée (produit de tête *D*) tandis que, pour améliorer les performances de la séparation, le reste du distillat est renvoyé au plateau supérieur (L_0). Le taux de reflux est défini comme le rapport entre le débit du reflux (L_0) et le débit du produit éliminé (*D*).

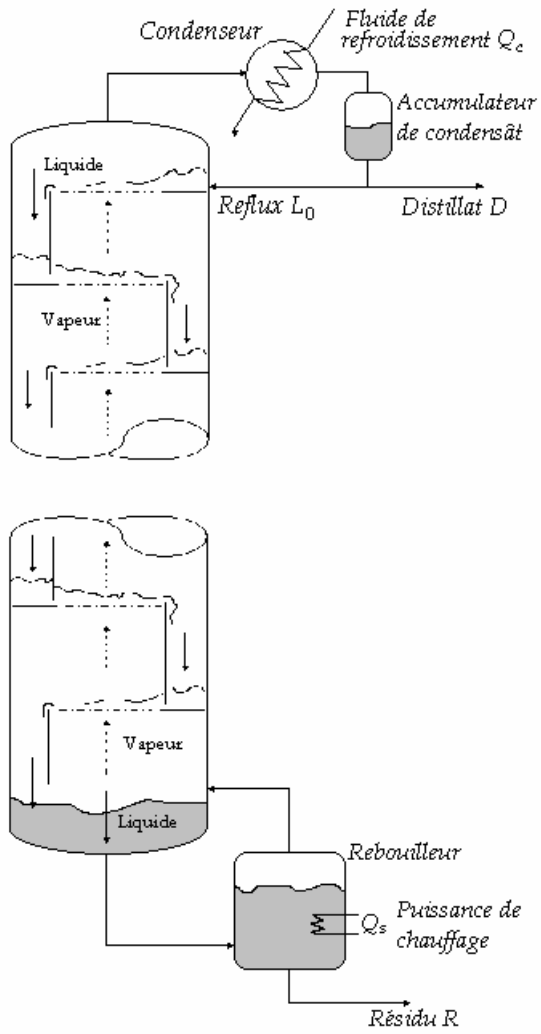


Fig. 4.2 : *Colonne de distillation à plateaux perforés*

Le liquide quittant le plateau inférieur parvient au rebouilleur où il est chauffé et partiellement vaporisé par une source de chaleur extérieure de puissance (Q_s). La vapeur venant du rebouilleur retourne au plateau inférieur et le liquide qui reste est éliminé comme résidu (*R*).

La pression est pratiquement identique sur tous les plateaux (elle croît en fait très faiblement d'un plateau au plateau inférieur), mais elle est plus faible dans le rebouilleur que dans le condenseur, ce qui permet aux flux de vapeur de monter par différence de pression. Les flux liquides descendent par gravité **[63]**.

Une valeur adéquate de la pression dans la colonne permet de garantir l'existence d'un équilibre liquide-vapeur pour toute la plage des compositions rencontrées sur les plateaux. Pour une colonne standard, à pression fixe, la température doit décroître du plateau au plateau supérieur. Cette différence de température entre la tête et le fond de la colonne, qui fait la qualité de séparation, est obtenue par un apport de calories en fond

(via la puissance de chauffage Q_s) et par un apport de frigories en tête via le débit de reflux refroidi par une puissance de condensation Q_s apporté par le fluide de refroidissement **[63]**.

4.3. Les différents types de colonnes de distillation :

Dans le secteur industriel de génie des procédés, il y a beaucoup de types de colonnes de distillation, chacune est conçue pour exécuter des types spécifiques de séparation et chaque conception diffère en termes de complexité et de fonctionnement. Selon le nombre et le type de plateaux utilisés et le mode de conduite de la colonne, on distingue les types suivants :

- le séparateur *Flash* ;
- la colonne de distillation continue,
- La colonne de distillation discontinue.

Ces trois classes de colonnes de distillation peuvent aussi contenir plusieurs configurations, selon le mélange à séparer, avec des spécifications techniques différentes concernant les conditions d'opération (température, pression, …).

4.3.1. Le Séparateur Flash :

Quand un mélange est placé dans une enceinte sous certaines conditions de température et de pression, deux phases différentes apparaissent, l'une liquide et l'autre vapeur, et un équilibre thermodynamique s'établit entre elles. Une analyse de composition des deux phases révèle que la vapeur contient préférentiellement les composés dont la masse molaire est petite. Cette opération de séparation, appelée ***Flash***, peut s'effectuer de façon continue. C'est la plus simple méthode de séparation par distillation de type colonne.

Le séparateur *Flash* est composé d'un seul plateau. Il est alimenté par le mélange (*F*), et deux flux en sortant, un flux de liquide (*L*), plus riche en composés lourds que le mélange d'alimentation, et un flux de vapeur (*V*), plus riche en composés légers (**Fig. 4.3**).

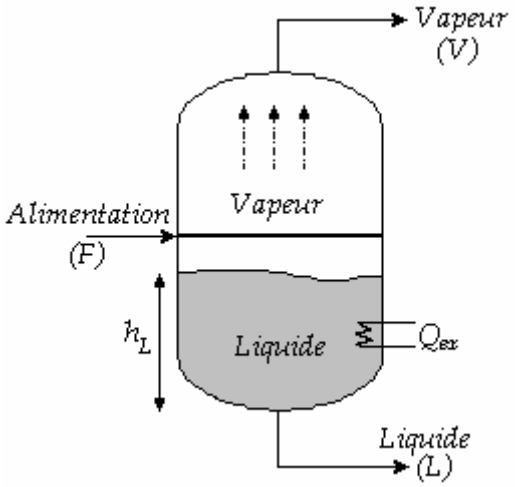


Fig. 4.3 : *Schéma général simplifié d'un séparateur Flash*

Les séparateurs Flash sont caractérisés par la complexité de leurs modèles, due au fait qu'ils sont basés sur des principes physiques et chimiques incluant différentes branches de science, telles que : la thermodynamique, la physico-chimique, la mécanique de fluide, les réactions cinétiques, … etc. Ceci génère des termes fortement non linéaires dans le modèle.

En général, les séparateurs Flash sont étudiés en régime statique du processus. Cela représente une simplification pour le modèle, avec aussi des conditions supplémentaires sur les caractéristiques d'opération, comme le débit d'alimentation, le niveau du liquide (h_L), la pression, …etc.

Des modèles proposés dans la littérature, comme le modèle algébro-différentielle **[63]** ou le modèle en pseudo-bond **[25]** qui montre l'efficacité de la méthodologie bond graph dans la modélisation et la simulation des systèmes thermodynamiques.

4.3.2. La colonne de distillation continue :

La colonne de distillation continue est la plus employées dans le secteur industriel pour la séparation des mélanges liquides et gazeux à compositions chimiques différentes.

Le principe de fonctionnement de la colonne continue est le même décrit dans la section 4.2, avec un plateau désigné spécial parce qu'il reçoit le mélange à séparer de façon continue de l'extérieur. La position du plateau d'alimentation dépend du mélange. Les autres plateaux sont empilés à l'intérieur de la colonne. Chaque plateau est alimenté à la fois par le débit de la vapeur sortant du plateau inférieur et par le débit du liquide sortant du plateau supérieur. L'opération de *Flash* a eu lieu physiquement sur chaque plateau (liquide froid en contact avec la vapeur chaude). Un équilibre thermodynamique tend à s'établir sur chaque plateau, autour de la surface de contact entre les quantités de liquide et de vapeur qui y sont retenues.

On distingue traditionnellement deux zones dans une colonne continue (**Fig. 4.4**) **[62, 63]** :

- La zone de rectification (ou concentration) : est l'ensemble de plateaux situés au-dessus du plateau d'alimentation ;
- La zone d'épuisement : est l'ensemble de plateaux situés au-dessous du plateau d'alimentation.

Moyennant un nombre suffisant de *Flash* successifs, on réussit à obtenir un distillat contenant essentiellement les composés légers et un résidu contenant essentiellement les composés lourds.

Les colonnes de distillation continues peuvent être classifiées selon :

- La nature de l'alimentation qu'elles traitent :
  - Colonne binaire : l'alimentation contient seulement un mélange de deux composants ;
  - Colonne multi-composants : l'alimentation contient plus de deux composants,
- La conception interne de la colonne :
  - Colonne à plateaux : où des plateaux de conception diverses sont employés pour supporter le liquide afin de fournir le meilleur contact entre la vapeur et le liquide, d'où la meilleure séparation ;
  - Colonne à garnissage : où au lieu des plateaux, « le garnissage » est employé pour augmenter le contact entre la vapeur et le liquide.

Plus de détails sur la classification, la conception, la modélisation et le choix des colonnes de distillation continues sont donnés par **[62]**.

Pour la modélisation de la colonne de distillation continue, la littérature est très riche par les travaux dans ce champ, selon la variété des colonnes rencontrées dans l'industrie. Son modèle vari du simple au complexe suivant le but de la modélisation, pour la conduite (**[63]** par la commande robuste, **[65]** par la commande adaptative ou par le pilotage numérique par PC dans **[66]**) par des modèles aux équations algébro-différentielles, pour l'analyse structurelle **[13]**, la surveillance **[18]** et la simulation **[24, 72]** par l'approche bond graph.

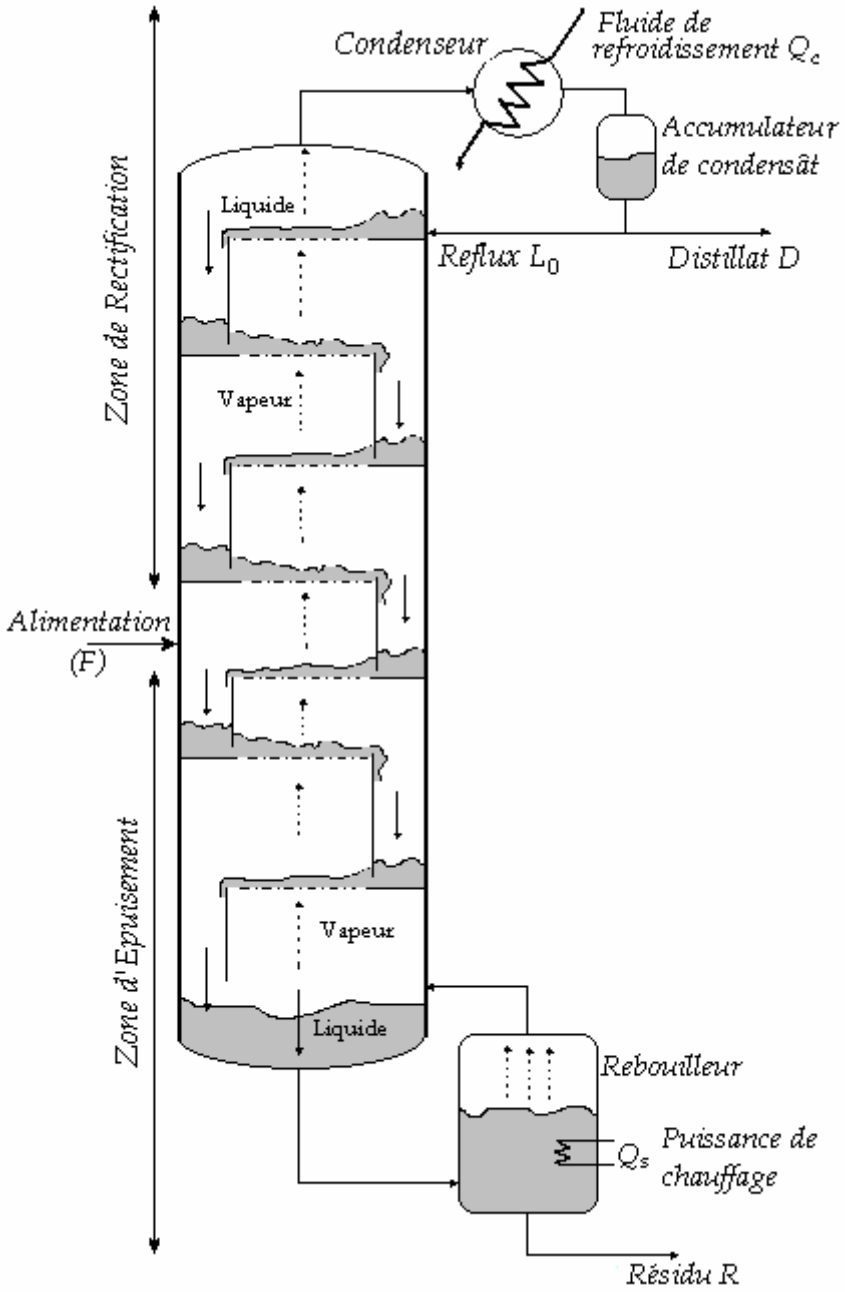


Fig. 4.4 : *Schéma de principe d'une colonne de distillation continue*

La modélisation de ce type de processus complexe passe par des hypothèses simplificatrices pour la réduction de la complexité et la taille du modèle. Ces hypothèses sont en général les suivantes **[18, 63, 65]** :

- L'équilibre liquide-vapeur est réalisé sur chaque plateau,
- L'influence de l'hydrodynamique est négligeable,
- Les rétentions vapeur sont négligées,
- Le condenseur est total,
- Les rétentions molaires liquides sont constantes sur chaque plateau,
- Les enthalpies sont constantes sur chaque plateau,
- Les pertes thermiques sont négligées,
- Les flux d'entrée et de sortie sont à l'état liquide saturé,
- Pas de réaction chimique dans le processus.

4.3.3. La colonne de distillation discontinue :

La plupart des distillations sont conduites en continue, mais il y a beaucoup de cas où la distillation discontinue est préférée, particulièrement dans les industries agroalimentaires et pharmaceutiques. La distillation discontinue est utilisée quand des petites quantités de produit est fabriquées en pilote pour fournir des petites fractions pour un échantillonnage ou des essais. Les produits fabriqués en petits volumes, tels que les produits pharmaceutiques et les produits chimiques de spécialité, sont souvent purifiés par distillation discontinue.

Dans la distillation discontinue, l'unité est conçue pour que plusieurs produits de nature différente soient séparés en nettoyant l'unité après chaque opération.

La distillation discontinue a connue beaucoup d'importance dans l'industrie pendant ces dernières décennies. Ceci est représenté dans la communauté universitaire par le nombre de travaux apparus sur l'optimisation des colonnes discontinues **[67, 68, 71]**, mais peu d'attention dans la littérature concerne l'étude de son comportement dynamique **[71]**.

Dans la distillation discontinue, un mélange liquide est chargé dans le rebouilleur (**Fig. 4.5**), où il est chauffé jusqu'à son point d'ébullition. Après le début d'ébullition, la vapeur est éliminée puis condensée pour obtenir le distillat. Les composés à plus bas point d'ébullition sont concentrés dans la vapeur, tandis que les composés les plus denses sont concentrés dans le liquide.

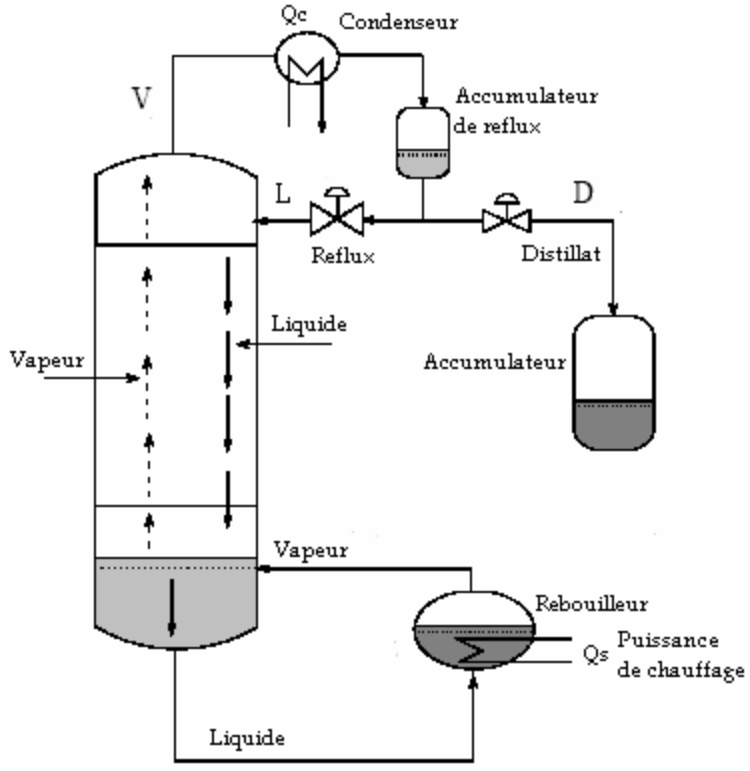


Fig. 4.5 : *Schéma de principe d'une colonne de distillation discontinue*

La colonne de distillation discontinue peut se fonctionner sous différents modes d'opération selon le besoin industriel. On peut saisir les modes suivants **[67]** :

- Reflux ou proportion de reflux constant : dans ce cas la composition du distillat est variable suivant le mélange à séparer,
- Distillat à composition constante : le reflux ou la proportion du reflux est le sujet de la variation,

- Proportion de reflux optimale : dans ce cas, le profil d'entrée est déterminé par la résolution d'un problème d'optimisation, d'habitude en mode off-line,
- Distillation sans reflux : la colonne discontinue peut être conduite sans reflux.

Dans tous ces modes d'opération, il faut assurer toujours un débit d'ébullition (V) fixe. La proportion de reflux est définie comme la proportion entre le flux de reflux (L) et le flux de distillat (D) (la proportion de reflux externe), ou bien comme la proportion entre le flux de reflux (L) et le flux de vapeur (V) (la proportion de reflux interne). Quand un taux de reflux variable est utilisé, il est généralement augmenté pendant l'ébullition de façon à obtenir une composition constante en produit de tête **[67]**.

La distillation discontinue, face aux autres méthodes de distillation présente beaucoup d'avantages, mais aussi quelques inconvénients. Les plus connus sont :

- ***Avantages :*** Les avantages de la distillation discontinue résident dans le fait que :
  - ✓ Plusieurs produits peuvent être obtenues avec la même unité,
  - ✓ Elle est simple à surveiller,
  - ✓ Le mélange peut effectivement contenir des boues ou des solides,
  - ✓ Elle est beaucoup flexible,
  - ✓ Elle permet une opération à simples ressources avec un coût de capital bas par rapport à la colonne continue,
- ***Inconvénients :*** Les inconvénients de la distillation discontinue sont :
  - ☒ Pour un débit de production grand, l'équipement est plus grand,
  - ☒ Elle demande plus d'attention de la part de l'opérateur,
  - ☒ Elle consomme plus d'énergie,
  - ☒ C'est un procédé dynamique, il est plus difficile à modéliser et à commander.

4.4. Modélisation de colonne de la distillation discontinue :

La modélisation des processus est une étape nécessaire pour toute application automatique comme l'analyse du comportement ou la synthèse d'une loi de commande. Beaucoup de littératures ont signalés la difficulté de la modélisation des systèmes thermodynamiques et chimiques à cause de la diversité des phénomènes physiques rencontrés **[9]**.

Le but de cette section est d'exposer brièvement deux méthodes de modélisation d'un procédé de distillation discontinue où l'on trouve des phénomènes thermodynamiques et chimiques. La première méthode est la modélisation dynamique analytique qui traite le système composé en sous système un par un en faisant des bilans énergétiques et massiques.

La deuxième méthode est la modélisation par bond graph, qui modélise les phénomènes physiques par une sous forme graphique selon une méthode systématique que nous avons déjà vue dans le chapitre précédent.

On se limite pour les modèles par les équations algèbro différentielles pour la première méthode et par le modèle bond graph à mots pour la deuxième méthode.

4.4.1. Le modèle analytique :

Avant d'aborder la modélisation de la colonne de distillation, il est nécessaire de rappeler quelques relations thermodynamiques utiles pour la compréhension du modèle.

A. Relations thermodynamiques :

- **Coefficient de partage (*K*) :** À l'équilibre, la concentration de tout composant présent dans la phase liquide peut être reliée à sa concentration dans la phase vapeur par le *coefficient de partage*, appelé aussi *facteur d'équilibre* ou *volatilité absolue* (***K***) :

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \tag{4.1}$$

où K_i est le coefficient de partage, y_i est la fraction molaire du composant *i* dans la phase vapeur (nombre sans dimension) et x_i est la fraction molaire du composant *i* dans la phase liquide (sans dimension).

Les composants les plus volatils dans le mélange ont une valeur de *K* plus élevée, tandis que les composants les moins volatils ont une valeur plus faible pour *K*.

- **Volatilité relative :** Pour la distillation, le facteur clef de la séparation est la *volatilité relative*. Plus la volatilité relative augmente, plus la séparation par distillation sera facile. Elle est définie comme suit :

$$\alpha_{i,j} = \frac{K_i}{K_j} \tag{4.2}$$

où $\alpha_{i,j}$ est *la volatilité relative* du composant *i* par rapport au composant *j*.

Pour un système binaire, la volatilité relative des deux composants (*i et j*) est donnée par (pour les systèmes idéaux **[62]**) :

$$\alpha_{i,j} = \frac{K_i}{K_j} = \frac{y_i\left(1-x_i\right)}{x_i\left(1-y_i\right)} \tag{4.3}$$

B. Modèle dynamique :

Le modèle dynamique présenté pour la colonne de distillation discontinue d'un système binaire (***Fig. 4.6***) est valable sous les hypothèses suivantes **[67-68, 71]** :

1. Colonne de distillation discontinue équipée par des plateaux perforés numérotés du sommet au fond de 1 jusqu'à N,
2. Mélange et équilibre parfait sur tous les plateaux,
3. La rétention vapeur est négligeable,
4. La pression et l'efficacité sur chaque plateau sont constantes,
5. Les flux de vapeur sont constants (le bilan d'énergie est négligé),
6. Condensation totale sans sous refroidissement dans le condenseur,
7. Volatilité relative constante,
8. La rétention molaire est constante dans l'accumulateur du condensât,
9. La rétention molaire du liquide est constante sur tous les plateaux (la dynamique du liquide est négligé).

Avec ces hypothèses, il en résulte les équations algébriques et différentielles suivantes :

- *Rebouilleur ;*

$$\begin{cases} dH_B/dt = L_N - V_B \\ d\left(H_B x_B\right)/dt = L_N x_N - V_B y_B \end{cases} \tag{4.4}$$

- *Plateaux ; pour j=1, N*

$$\begin{cases} 0 = L_{j-1} + V_{j+1} - L_j - V_j \\ H_j dx_j / dt = L_{j-1} x_{j-1} + V_{j+1} y_{j+1} - L_j x_j - V_j y_j \\ V_j = V_{j+1} \end{cases} \quad (4.5)$$

- *Condenseur et accumulateur de reflux ;*

$$\begin{cases} 0 = V_1 - L - D \\ H_C dx_D / dt = V_1 y_1 - L x_D - D x_D \\ R = L / V_1 \end{cases} \quad (4.6)$$

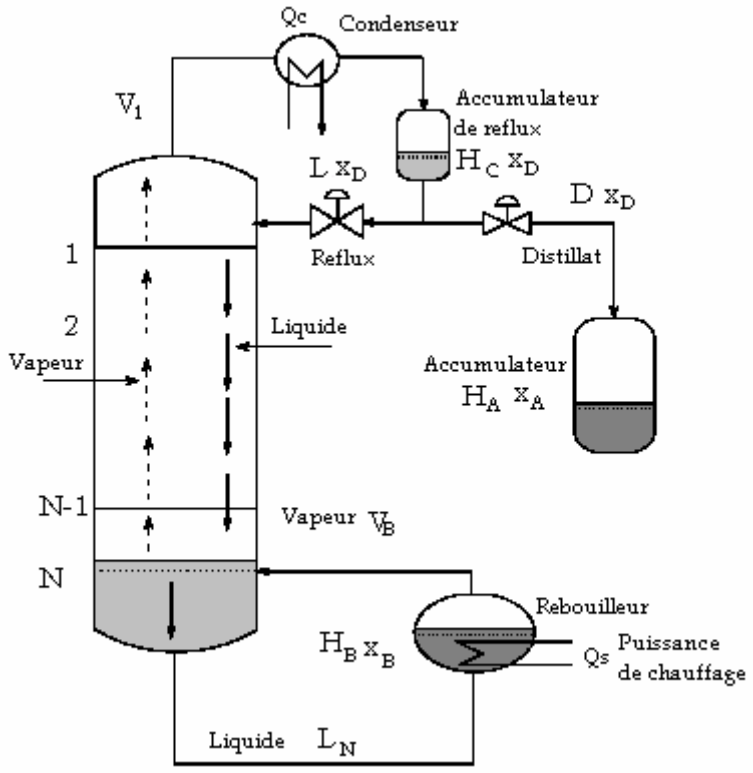


Fig. 4.6 : *Colonne de distillation discontinue*

- *Accumulateur de distillation ;*

$$\begin{cases} dH_A / dt = D \\ d\left(H_A x_A\right) / dt = D x_D \end{cases} \quad (4.7)$$

- *A l'équilibre, j=1, N et B :*

$$y_j = \frac{\alpha x_j}{1 - (\alpha - 1) x_j} \quad (4.8)$$

Ces systèmes d'équations représentent pour chaque sous partie figurée, le bilan matière global et partiel sur le composant le plus volatil, avec ;

$L_j \left(V_j\right)$ est le débit du liquide (vapeur respectivement) à travers les plateaux, exprimé en nombres de moles par unité de temps,

$x_j \left(y_j\right)$, fraction molaire dans la phase liquide (vapeur respectivement) du composant le plus volatil, sans dimension,

H_j correspond aux rétentions dans le liquide et dans la vapeur,

R est la proportion du reflux.

Notons que la proportion du reflux R utilisée ici est la proportion de reflux interne, $R = R_{interne} = L/V_1$ par la proportion externe habituelle, $R = R_{externe} = L/D$. Cela est mieux résolu numériquement, puisque $R_{interne} \in [0,1]$ alors que $R_{externe} \in [0,\infty]$ **[67]**. Il est assumé que le flux de vapeur V_B peut être manipulé directement.

C. Conclusion : Le modèle analytique obtenu de la colonne de distillation discontinue est formé par des équations algébriques et différentielles, qui par conséquent, demandent beaucoup de calculs numériques, malgré les hypothèses de simplification adoptées. Ils existent quelques logiciels destinés pour la simulation et l'optimisation des modèles de processus de distillation comme *SPEEDUP* **[67, 71]** et *gPROMS* **[68]**.

4.4.2. Le modèle bond graph à mots :

Comme nous avons vue précédemment, l'outil bond graph avec ses aspects génériques, permet de modéliser parfaitement les processus rencontrés en génie des procédés, tout en subdivisant le processus en sections ou en sous systèmes, en regardant la fonction de chacun, et en précisant ses entrées et ses sorties.

En se limitant par le modèle bond graph à mots vue la complexité et la diversité des phénomènes figurés dans le procédé de distillation discontinue, alors que le modèle bond graph détaillé peut avoir un sujet de thèse entière, comme la thèse de Brooks **[72]**, qui traite la modélisation d'une colonne de distillation continue en vrai bond graph.

L'appareil pilote choisi pour la modélisation est la colonne de distillation discontinue « UOP3a Batch plate and packed distillation column » **[69]** ou « UOP3B Batch manually plate and packed distillation column » **[70]**. Cette dernière possède le même schéma fonctionnel que la première avec quelques améliorations dans le système d'instrumentation et quelques arrangements techniques.

Le schéma fonctionnel simplifié de la colonne UOP3BM est donné par la figure ***(Fig. 4.7)*** .

Comme nous avons vue pour la modélisation par bond graph, on divise le système en 8 sous systèmes interconnectés, comme suit :

- SS1 : L'alimentation par la puissance électrique,
- SS2 : Le thermoplongeur qui assure le chauffage du liquide (mélange) dans le rebouilleur (sous forme d'une cartouche),
- SS3 : Le rebouilleur, qui contient le mélange à séparer en liquide introduit par une source d'alimentation en fluide,
- SS4 : Les plateaux perforés de la colonne, groupés en un seul bloc avec deux entrées (viennent du rebouilleur et de reflux), et deux sorties (vers le rebouilleur et vers le condenseur),
- SS5 : Le condenseur, avec deux entrées (du plateaux et du système de refroidissement), et deux sorties (vers le système de refroidissement et vers le système du reflux),
- SS6 : Le système de refroidissement, qui travail avec le condenseur,
- SS7 : Le système de reflux, comporte une entrée du condenseur, et deux sorties vers la colonne (plateaux) et vers l'accumulateur de distillat,
- SS8 : L'accumulateur de distillat, qui n'est autre qu'un réservoir de stockage, alimenté par le système de reflux, et peut alimenter le rebouilleur par son contenu à travers une vanne contrôlée en cas de la réutilisation du distillat.

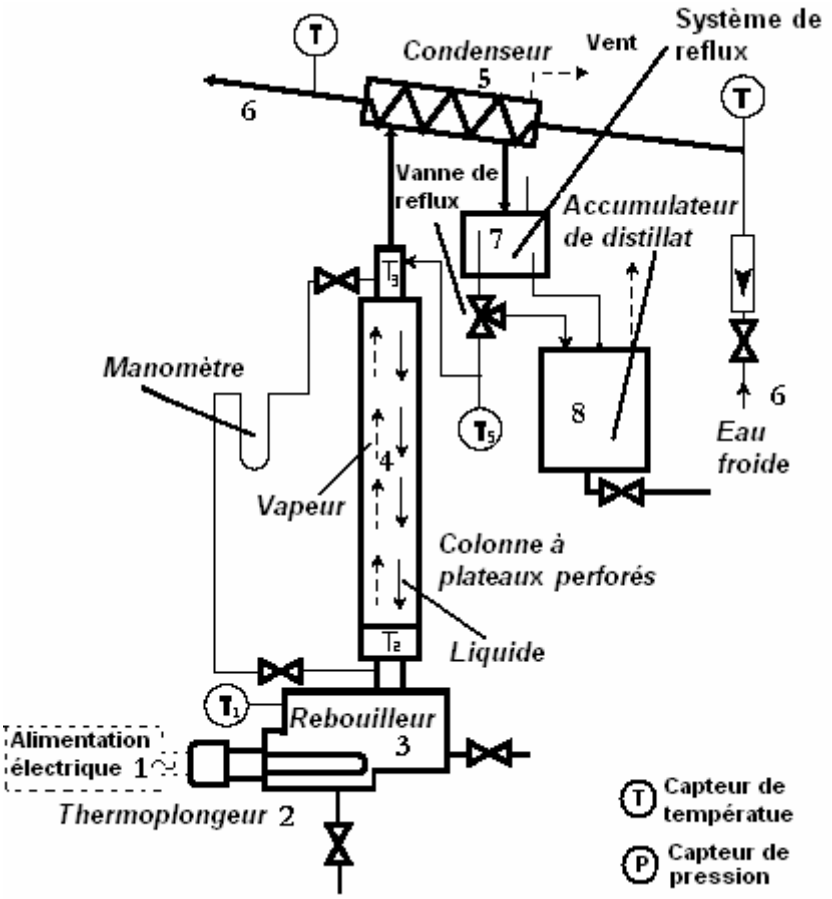


Fig. 4.7 : *Schéma fonctionnel d'une colonne de distillation discontinue pilote Type* UOP3a, UOP3BM **[69, 70]**

Le modèle en bond graph à mots est donné par la figure ***Fig. 4.8.***

On peut dire que, le thermoplongeur met une puissance de chauffage présentée par un lien unique modélise un phénomène de conduction par la paire $(T, \dot{Q})$. Les entrées et les sorties du rebouilleur sont tous modélisées par des multi-liens (sauf qui vient du thermoplongeur), présentant les trois formes de l'énergie présente dans le système (hydraulique, thermique et chimique). Le condenseur échange une puissance thermique avec le système de refroidissement. Les autres liens du système sont tous à énergies couplées (Hy, Th, Ch).

Nous avons omis les systèmes de contrôle et d'instrumentation parce qu'ils sont peu différents dans les deux versions de la colonne (UOP3a et UOP3BM), et que l'on peut les mettre sur le modèle bond graph détaillé sans changer la structure du modèle.

Le rebouilleur peut être vu comme une chaudière avec quelques modifications sur la nature des phénomènes rencontrés tels que l'ajout du phénomène chimique, en plus les débits du courant liquide qui provient du 1er plateau. Les plateaux sont vus comme des petits accumulateurs d'énergie (***Fig. 4.1***) avec des débits de courant vapeur montant et liquide descendant vers respectivement les plateaux supérieurs et inférieurs. On trouve dans le condenseur un phénomène de changement de phase (condensation) causé par l'effet sans contact du système de refroidissement, donc il convient de modéliser ce phénomène par l'élément *C* (***Fig. 3.6***) avec l'ajout des élément *Hexa* (***Fig. 3.14***). L'accumulateur du distillat est un simple réservoir de stockage du fluide.

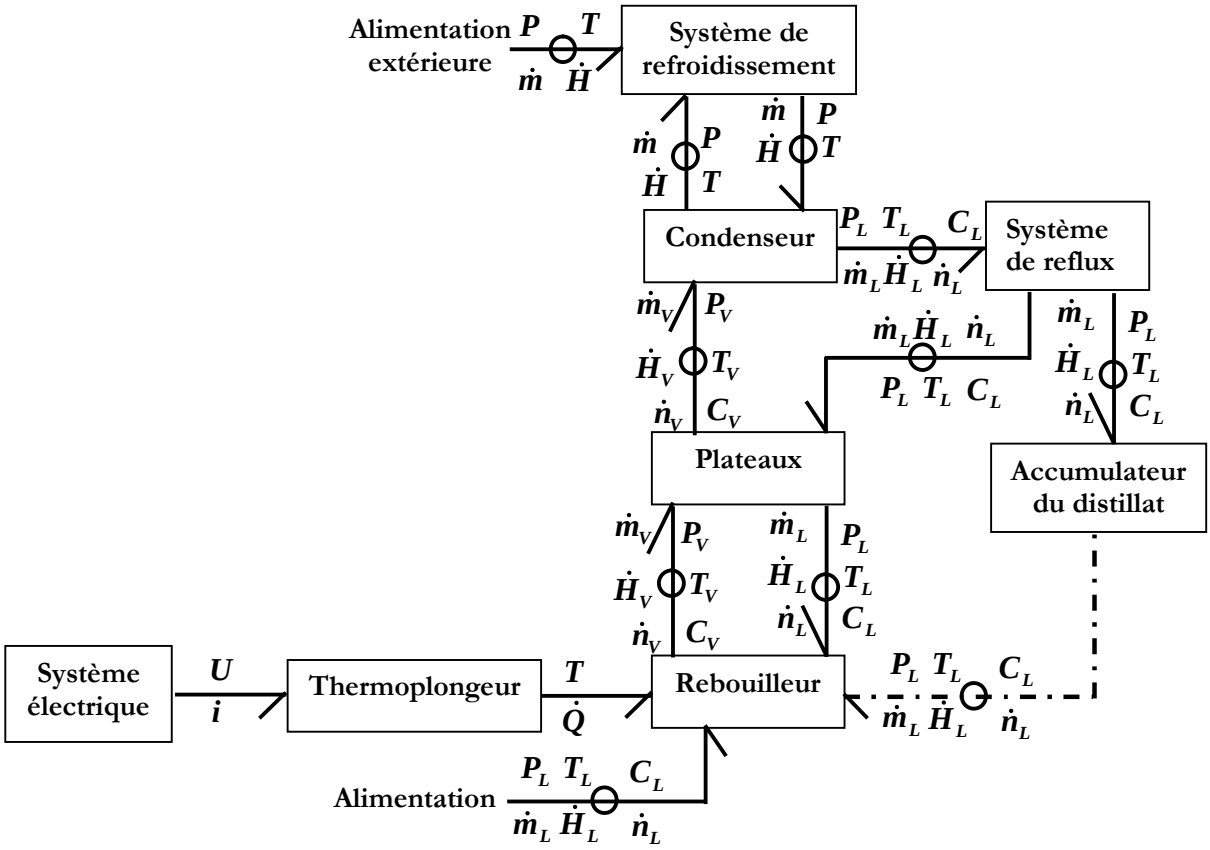


Fig. 4.8 : *Bond graph à mots d'une colonne de distillation discontinue UOP3BM*

Comme il a été illustré par la (***Fig. 4.1***), le plateau de la colonne de distillation, par l'accumulation de certaine quantité du liquide peut représenté par un multi-port *C* associé à une jonction 0 avec les différents flux entrant et sortant de la vapeur et du liquide venant respectivement du plateau inférieur au plateau supérieur et vice versa. La quantité d'énergie dissipée par ce phénomène ainsi que le transfert de la matière entre les deux phases et l'écoulement du liquide à travers le déversoir (***Fig. 4.1***), peuvent être représenté par des éléments R modulés par des sources de flux fictives et modulés par les fractions molaires des constituants du mélange.

4.5. Conclusion :

Par comparaison à la modélisation analytique, la modélisation par bond graph permet de faciliter la compréhension du comportement de la colonne de distillation. En décomposant le processus en plusieurs sous systèmes interconnectés et échangent entre eux de la puissance. Ainsi, que la modélisation par bond graph, permet de déduire les relations de cause à effets à travers la notion de causalité, ce qui facilite supervision du processus. Le chapitre suivant porte sur la conception d'un système de surveillance à base de modèle bond graph multi énergie.

Chapitre 5

CHAPITRE 5 : PROCÉDURES DE LA SURVEILLANCE PAR BOND GRAPH MULTI ÉNERGIE ET APPLICATION

5.1. Introduction :

Ce chapitre vient d'appliquer la théorie et les procédures déjà développées dans les chapitres précédents concernant la modélisation et la surveillance par bond graph multi énergies d'un rebouilleur d'une colonne de distillation discontinue pilote dans le laboratoire de Chimie Industriel de Sétif sous la référence UOP3BM **[70]**.

Après la définition d'un cahier des charges de la surveillance, on définit la représentation d'un système de surveillance par l'approche bond graph comme l'ensemble des relations entre les variables et les paramètres connues sous les contraintes de la structure du modèle bond graph. Puis, à travers l'extension des procédures graphiques issues de la notion de causalité du bond graph mono énergie, on définit les conditions de surveillance et le principe de génération des relations de redondance analytique directement à partir du modèle bond graphs multi énergies découplé. L'application sur le rebouilleur de la colonne pilote permet d'illustrer l'efficacité de la méthode proposée pour la surveillabilité des sources de contrôle de processus.

5.2. Cahier des charges de la surveillance :

Nous avons mentionné plus haut (*dans le chapitre 2*), que l'on distingue plusieurs types de défauts : les défauts processus physique, les défauts capteurs, actionneurs et les défauts du système ou algorithme de commande. Le cahier des charges doit répondre aux trois questions suivantes :

1. **Définition des objectifs.** On précise les composants (équipement, capteurs, actionneurs, contrôleurs, …) et les défaillances associées qui doivent être détectées et/ou localisées.
2. **Définition des performances** attendues en terme de détection du système de surveillance. Pour cela, on caractérise l'efficacité des procédures de diagnostic par quelques critères d'évaluation suivants :
   - *La sensibilité aux défauts :* capacité du système de surveillance à détecter les défauts de faible amplitude. Ce concept est lié à la probabilité de fausse alarme (détection d'une anomalie en fonctionnement normal) et la probabilité de non détection (défaillance non détectée).
   - *La rapidité de détection :* capacité à détecter les défauts dans les meilleurs délais, afin de permettre au système de supervision de réagir rapidement. Cette qualité de détection est caractérisée par un délai moyen qui s'écoule entre l'apparition d'une défaillance et l'alarme générée par le système de surveillance.
   - *La robustesse :* capacité des techniques de surveillance à opérer en présence de bruits de mesure, de perturbations et des erreurs de modélisation, avec le minimum de fausses alarmes.
   - *L'isolabilité :* capacité de retrouver l'origine de la défaillance, c'est à dire identifier la cause de la panne parmi les causes prises en compte par le système de surveillance.
3. **Définition des contraintes.** On doit préciser l'architecture de l'instrumentation optimale selon les critères de coûts et de conditions d'opération.

Dans le cadre de ce travail, nous prenons comme cahier de charges, la détection et la localisation des défaillances des processus thermofluides et chimiques au niveau :

1. des capteurs,
2. des actionneurs,
3. des composants physiques : les fautes types à surveiller sont :
   - Fuite de matière (fuite du fluide dans un réservoir)
   - Défaut de calorifugeage thermique au niveau des composants de stockage d'énergie (chaudière, réservoir, ….)
   - Bouchage des conduites.

On considère que les algorithmes de commande ne sont pas sujets aux défauts (les signaux de commande sont parfaitement calculés et ne présentent par d'erreurs), ainsi que les erreurs de modélisation et les entrées de perturbation sont négligeables et sont de l'ordre de la précision des capteurs devant les incertitudes de mesure. Les procédures de décision ne sont pas aussi développées.

5.3. Représentation bond graph d'un système de surveillance :

5.3.1. Introduction:

Considérons un système de surveillance comme illustré par la figure (***Fig. 5.1***). On distingue essentiellement deux parties : la première produit de la puissance et de l'énergie (le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde produit des signaux (le système d'information : les capteurs et le système de régulation).

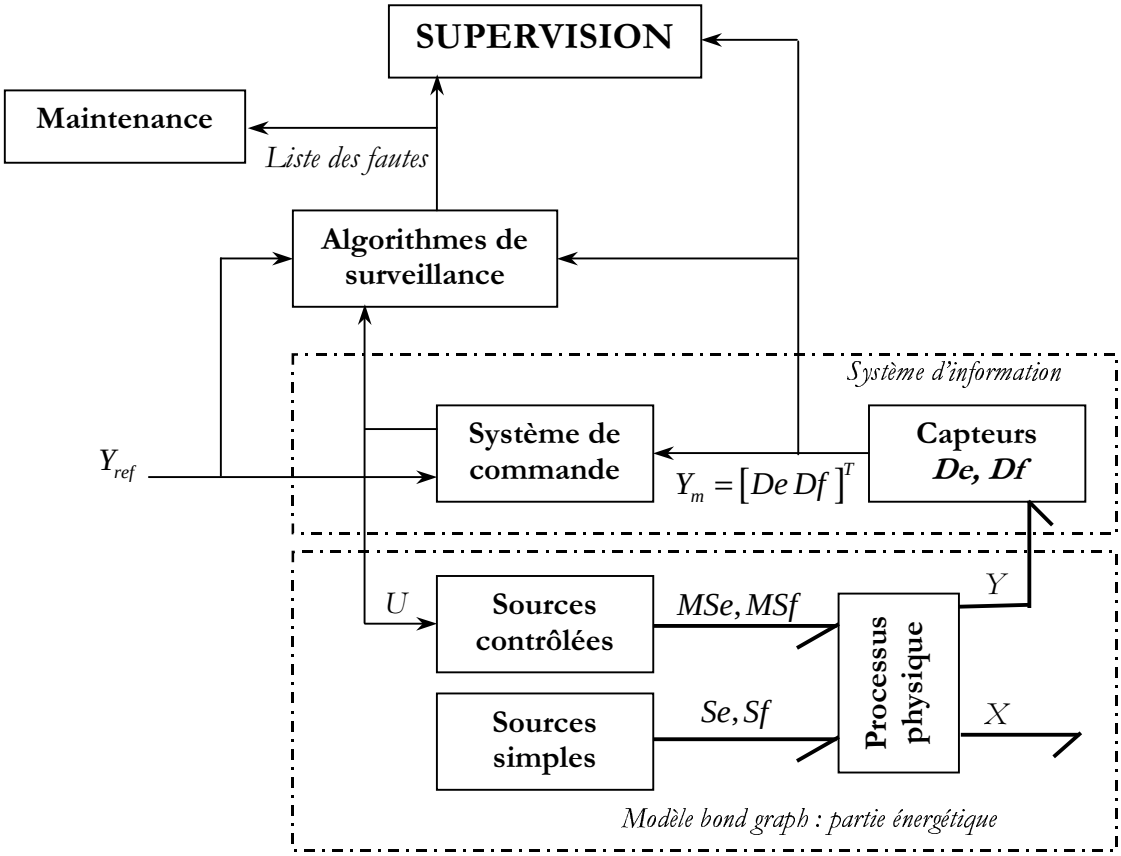


Fig. 5.1 : *Représentation bond graph d'un système de surveillance*

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graph usuels (R, C, I et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, …etc.) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples (Se, Sf) ou modulées (Mse,

Msf), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment alors le système d'information.

Les algorithmes de surveillance reçoivent les informations issues des capteurs (De, Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. La génération des résidus est basée sur les relations de redondance analytique, qui sont fonctions de variables connues du système, suivant l'ensemble de paramètres, de variables et des contraintes du processus. Dans la section suivante, on montre comment sont déduites les contraintes et les variables directement à partir du modèle bond graph.

5.3.2. Les contraintes :

Les contraintes (Φ) peuvent être vues comme des relations qui relient les variables aux paramètres du système. L'ensemble de ces contraintes est constitué dans un processus industriel de contraintes qui décrivent la structure (Φ_S), le comportement (Φ_B), le système de mesure (Φ_M), le système de commande (Φ_C) et les actionneurs (Φ_A).

$$\Phi = \{\Phi_S \quad \Phi_B \quad \Phi_M \quad \Phi_C \quad \Phi_A\} \tag{5.1}$$

Du point de vue de la méthodologie bond graph, les relations de contraintes sont constituées par les équations suivantes **[1, 2]**:

- **Les équations structurelles Φ_S :** Les équations structurelles représentent un ensemble de lois de conservation (de masse, d'énergie), et des équations d'équilibre. Elles sont déduites des équations aux jonctions. Le nombre d'équations Φ_J est égal à la somme des nombres de jonctions *0*, *1*, et les élément de jonctions à 2-ports, *TF* et *GY*.

$$\Phi_S = \{\Phi_{J_0}\} \cup \{\Phi_{J_1}\} \cup \{\Phi_{TF}\} \cup \{\Phi_{GY}\} \tag{5.2}$$

avec $\Phi_S \in \Re^{n_J}$, où n_J est le nombre de jonctions dans le modèle bond graph.

- **Les équations de comportement Φ_B :** Les lois physiques exprimant comment la transformation d'énergie est réalisée représentent le modèle de comportement. Dans le modèle bond graph, elles décrivent le phénomène physique au niveau des éléments bond graph (*R, C, et I*), elles sont appelées " les lois constitutives ".

$$\Phi_B = \{\Phi_I\} \cup \{\Phi_C\} \cup \{\Phi_R\} \tag{5.3}$$
$$\Phi_B \in \Re^{l*n_{ep}+n_{es}}$$

où *l* est le nombre de ports du bond ou le nombre d'énergies modélisées. n_{ep} est le nombre d'éléments bond graph, *R* et *C* multiports et n_{es} est le nombre d'éléments simples *R, C,* et *I*. Le nombre total d'éléments n_e est alors $n_e = n_{ep} + n_{es}$.

Dans le cas d'un modèle bond graph à énergie simple, on a *l=1*, alors que pour les processus thermofluides, nous sommes en présence de deux énergies (hydraulique et thermique), donc (*l=2*). Nous avons pour chaque composant bond graph 4 variables de puissance qui sont les couples ($P, \dot{m}$) et ($T, \dot{H}$). Si les phénomènes chimiques (transformation de matière) sont aussi pris en compte, alors (*l=3*) on ajoute au couples précédents le couple ($\mu, \dot{n}$) (potentiel chimique, flux molaire). On écrit alors les relations de comportement du composant pour chaque type d'énergie.

- **Les équations de mesure Φ_M :** Elles décrivent les mesures qui sont disponibles. Elles expriment la façon dont les capteurs transforment quelques variables d'état (ou autre) du processus en signaux de sortie qui peuvent être utilisés pour les algorithmes de détection et d'isolation des défauts et pour les algorithmes de commande. Les capteurs sont représentés par les détecteurs d'effort (*De*) et de flux (*Df*).

$$\Phi_M = \{\Phi_{De}\} \cup \{\Phi_{Df}\} \cup \{\Phi_{D_{Pu}}\} \tag{5.4}$$
$$\Phi_M \in \Re^{n_S}$$

où n_S est le nombre de capteurs indépendants (non redondants). Les capteurs de puissance (D_{Pu})ou de niveau peuvent être utilisés dans le système d'instrumentation.

- **Les équations de commande Φ_C :** Elles décrivent les algorithmes de commande. Les variables d'entrées sont les grandeurs de consignes Y_{ref} et les variables issues des capteurs $Y_m(De, Df)$. La sortie agit sur l'ensemble d'actionneurs notés *MSe*, source d'effort modulée, *MSf*, source de flux modulée.

$$\Phi_C\left(U, Y_{ref}, De, Df, \omega_{reg}\right) = 0 \tag{5.5}$$
$$\Phi_C \in \Re^{n_C}$$

où n_C est le nombre de contrôleurs, ω_{reg} sont les paramètres du contrôleur (gain, temps d'intégration, …) et Y_{ref} les valeurs de consignes.

- **Les équations des sources contrôlées Φ_A :** Ces équations décrivent les relations des sources d'énergie contrôlées (pompe régulée, source de tension commandée, …). Les signaux d'entrée *U* sont fournis par les contrôleurs et les sorties sont les variables de régulation *MSe* et *MSf* (comme le débit massique fourni par une pompe de débit pour contrôler le niveau dans un réservoir).

$$\Phi_A\left(MSe, MSf, U\right) = 0 \tag{5.6}$$
$$\Phi_A \in \Re^{n_A}$$

où n_A est le nombre de sources contrôlées.

Finalement, le nombre de contraintes à utiliser dans un système de surveillance déduit du modèle bond graph d'un processus donné est égal à $(n_J + n_e + n_S + n_C + n_A)$.

5.3.3. Les variables :

L'ensemble des contraintes Φ s'applique à l'ensemble des variables Z, connues K et inconnues X.

$$Z = K \cup X \tag{5.7}$$

- Les variables inconnues X sont les variables de puissance (effort et flux) supportées par le lien de puissance du bond graph. Le vecteur X contenant toutes les variables de puissance est :

$$X = \{e_1, f_1\} \cup \{e_2, f_2\} .... \cup \{e_{ne}, f_{ne}\} \tag{5.8}$$
$$X \in \Re^{2l*n_{ep}+2n_{es}}$$
où $n_e = n_{ep} + n_{es}$

On rappelle comme indiquer plus haut, que les composants peuvent être multiports. Dans ce cas, $l = 1, 2\ ou\ 3$ selon qu'on modélise, une, deux ou

trois énergies (explicitement visibles sur le modèle bond graph en fonction du type de variables utilisées).

- Le sous ensemble K des variables connues contient les variables de commande U, les variables dont les valeurs sont mesurées par les détecteurs De et Df, les sources contrôlées (MSe, MSf), et les sources (Se, Sf) :

$$K = \{MSe\} \cup \{MSf\} \cup \{Se\} \cup \{Sf\} \cup \{De\} \cup \{Df\} \cup \{U\} \qquad (5.9)$$

$$K \in \Re^{n_K}$$

où $n_K = n_S + n_A + n_C$

Finalement, $Z \in \Re^{n_e + n_K}$

5.3.4. Les paramètres :

$\theta \in \Re^P$ est le vecteur des paramètres. Dans le modèle bond graph, les paramètres sont associés aux caractéristiques des éléments *R, C, I, TF* et *GY*, c'est à dire les coefficients de débits, les valeurs de capacité (qui peuvent être variables), les coefficients d'échange de chaleur,…etc. Ces paramètres peuvent être constants ou variables.

5.4. Procédures graphiques pour la surveillance par bond graph :

L'outil bond graph contient plusieurs propriétés qui peuvent être utilisées en analyse structurelle. Parmi eux, le parcours des chemins causaux peut être utilisé pour vérifier la commandabilité, l'observabilité, la surveillabilité et même l'inversibilité du modèle bond graph **[10]**.

Cette propriété est utilisée pour déduire les relations de redondance analytique employée pour la détection et la localisation des défauts.

5.4.1. Définitions :

Nous rappelons ici quelques définitions et propriétés des chemins causaux, nécessaires pour la surveillance par les modèles bond graph multi énergies.

- **Définition 13 :** Une variable est surveillable si et seulement s'il est possible de détecter et d'isoler les défaillances qui peuvent l'affecter **[2, 3, 16, 18, 19]**.
- **Définition 14 :** Un chemin causal est une série de liaisons qui ont la même affectation de causalité. Selon la causalité, la variable suivie est l'effort ou le flux. Pour changer cette variable, il faut passer par un élément de jonction *GY*, ou par un élément passif (*R, C* ou *I*) **[2, 16, 18, 19]**.
- **Définition 15 :** Un chemin causal généralisé est un chemin causal qui peut traverser les liens de puissance et les liens d'information ou les deux **[2, 16, 19]**.

5.4.2. Conditions de surveillance :

Comme résultats du parcours des chemins causaux, on peut trouver la matrice de transfert qui représente le comportement du système (*chapitre 1*, en plus, on peut détecter les variables et les composants surveillables sans avoir besoin de générer les relations de redondance analytique. Ces résultats sont appliquées premièrement sur les modèles bond graph mono énergie (un seul domaine physique) **[3, 27-29]**, puis étendus aux modèles bond graph multi énergies **[2, 16, 18-19]**.

Proposition 1 : Une condition nécessaire et suffisante pour qu'une défaillance affectant la source S_k soit détectable et isolable est que : pour *k* dans *(1,…n)*, le vecteur $\left[m_{1k} \ldots m_{pk} \right]^T$

n'est proportionnel à aucun vecteur colonne $\left[m_{1i}...m_{pi}\right]^T$ de la matrice de transfert $M(s)(i \neq k)$ ($M(s):\left[m_{ij}\right](i=1...p, j=1...n)$, tel que *p* est le nombre du capteurs D_i et *n* le nombre de sources S_j) **[2, 16, 18-19]**.

Théorème [3]: Les deux colonnes *i* et *j* d'une matrice de transfert obtenue à partir d'un bond graph sont proportionnelles si :

1) Le chemin causal parcouru pour aller de n'importe qu'elle source S_k au capteur D_i contient le chemin causal parcouru pour aller de cette même source au capteur D_j (ou inversement).
2) Les éléments du chemin ($S_k - D_i$) ne figurant pas dans ($S_k - D_j$), n'apparaissent dans aucune boucle causale quant on enlève le chemin ($S_k - D_j$) du bond graph.

Cette procédure est appliquée en mono énergie, puis étendue aux modèles multi énergies par la proposition suivante :

Proposition 2 : Il y a proportionnalité entre les colonnes $\left[m_{1k}...m_{pk}\right]^T$ et $\left[m_{1j}...m_{pj}\right]^T$ dans $M(s)$ si le chemin construit en suivant les liens de puissance ou les liens d'information dans un modèle bond graph linéarisé à énergies couplées pour atteindre le capteur *i*, partant de la source *j*, est inclus dans le chemin suivi pour atteindre le même capteur en partant de la source S_k, $\forall i=1...p, i \neq k$ **[2, 16, 18-19]**.

5.4.3. Génération des relations de redondance analytique :

Les procédures de détection et d'isolation des défauts dans le présent travail sont basées uniquement sur les résidus générés par les relations de redondance analytique. En comparaison avec les méthodes de génération de résidus basées sur les observateurs **[43, 56, 59]**, la méthode basée sur les relations de redondance analytique présente quelques caractéristiques intéressantes :

- elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond-graph image du processus physique,
- ces relations sont déduites directement de la représentation graphique,
- elles peuvent être générées sous forme symbolique et sont donc adaptées à une implémentation informatique.

Le but de cette section est de présenter la méthode de génération des RRAs des processus en génie des procédés sur la base d'une seule représentation : le bond graph à énergies couplées.

Une relation de redondance analytique est une relation entre l'ensemble des variables connues de la forme :

$$f(K)=0 \tag{5.10}$$

où *K* est l'ensemble des variables connues.

En forme bond graph, l'expression de l'équation précédente des RRAs peut s'écrire sous forme :

$$f\left(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, {}_0, U\right)=0 \tag{5.11}$$

Le résidu est alors :

$$r = f\left(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, {}_0, U\right) \tag{5.12}$$

La génération des RRAs sur le bond graph est basée sur le parcours des chemins causaux simples et généralisés sur le modèle graphique, afin d'exprimer les variables

inconnues en fonction des variables connues. Le parcours des chemins causaux n'est qu'un couplage particulier qui respecte la causalité affectée au modèle.

Le point de départ pour la génération des RRAs peut s'appartenir à la structure de jonctions (*0, 1, TF et GY*), donc l'ensemble des équations structurelles Φ^S, aussi bien qu'à l'ensemble des composants *R, C, I* (les équations de comportement Φ^B) reliées à ces jonctions.

Le choix du type de causalité affectée au modèle bond graph est très délicat. En effet, un modèle bond graph à causalité intégrale préférentielle est beaucoup plus adapté pour la simulation numérique du modèle (l'intégration numérique est plus simple que la dérivation), mais impose un problème de conditions initiales, qui peut être évité par le choix d'une causalité dérivée **[10]**. Ce choix nous amène aussi à vérifier d'autres propriétés structurelles telles que l'observabilité, la commandabilité… etc. du modèle bond graph. Un algorithme de génération des résidus par les RRAs à base du modèle bond graph à énergies couplées est proposé dans **[2]**.

Pour un processus physique donné, il est possible de déterminer à l'avance de quels types de défaillances seront sensibles les RRAs générées à l'aide de son modèle bond graph. Pour les processus physiques de génie des procédés, sujets de différents domaines physiques, tels que l'hydraulique, la thermodynamique et la chimie, on peut distinguer à l'aide du modèle bond graph les défaillances physiques de type fuite ou bouchage, par les relations résultantes des équations structurelles des jonctions et les relations des composants qui y sont associées.

Pour le défaut de type fuite, on peut le détecter à l'aide de relation qui lie la jonction *0* avec l'élément associé *C*, sensible au fuite de la matière hydraulique, chimique, et thermique, alors que le défaut de type bouchage peut être associé à la jonction *1* avec la relation de l'élément *R* **[2]**.

A partir des RRAs générées, nous pouvons construire un tableau binaire appelé tableau de signatures. Ses colonnes correspondent aux variables et composants à surveiller (*K*) et leurs lignes aux relations considérées (r_i). Chaque case du tableau indique l'absence ou la présence de la variable dans la relation correspondante (1 si la variable est présente dans la relation, 0 sinon). En cas de défaillance d'une variable, toutes les relations exprimées en fonction de cette variable seront différentes de zéro ($r \neq 0$). Ce qui affecte une signature pour chaque défaillance.

La génération des résidus par le parcours des chemins causaux peut donner lieu à des vecteurs de composants de même signature logique, ce qui provoque un problème d'isolation de défaut. Ce problème peut être résolu si en adoptant une autre méthodologie de placement de capteurs et d'actionneurs.

Dans la section suivante, nous développons l'application de la procédure de détection de défaut par la génération des RRAs à base du modèle bond graph à énergies couplées sur un processus type de génie des procédés : rebouilleur d'une colonne de distillation discontinue pilote UOP3BM.

5.5. Application :

5.5.1. Description du processus :

Le processus considéré pour l'application de la méthode de surveillance est un rebouilleur d'une colonne de distillation discontinue UOP3BM (***Fig. 5.2***). L'appareil est composé d'un thermoplongeur sous forme de cartouche qui assure le chauffage électrique du liquide rentrant dans le rebouilleur à travers ses vannes d'alimentation. Ainsi, que le rebouilleur est connecté à travers une colonne par une série de plateaux perforés qui assurent le transfert de la matière entre les phases. Le système d'instrumentation est composé de capteur de température ($\mathbf{T_1}$), capteur de pression (**P**) et capteur de niveau (**L**).

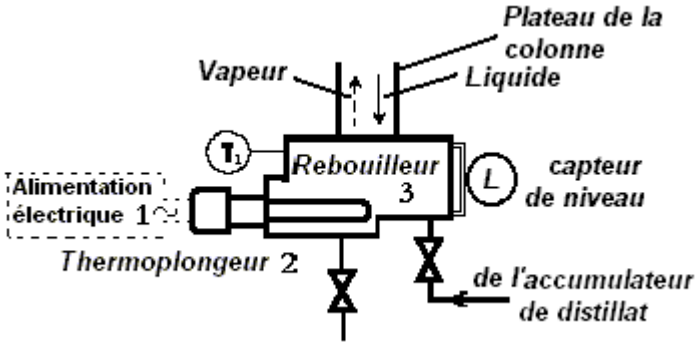


Fig. 5.2 : *Schéma fonctionnel d'un rebouilleur d'une colonne UOP3BM*

5.5.2. Modèle bond graph :

Après une analyse sur le principe de fonctionnement du rebouilleur, on donne le modèle bond graph à mots (***Fig. 5.3***), qui présente l'interconnexion de plusieurs sous systèmes de natures différentes:

- un circuit électrique qui alimente le thermoplongeur en puissance électrique,
- le thermoplongeur qui met une puissance de chauffage au rebouilleur présenté par un lien thermique simple énergie de conduction,
- deux sources d'alimentation en liquide représentées par des multi liens (lien entouré) assureront l'alimentation en matière de mélange, et qui se comportent comme des sources d'énergie hydraulique, thermique et chimique,
- le rebouilleur qui se comporte comme un élément de stockage d'énergie hydraulique, thermique et chimique, connecté par une série de plateaux.

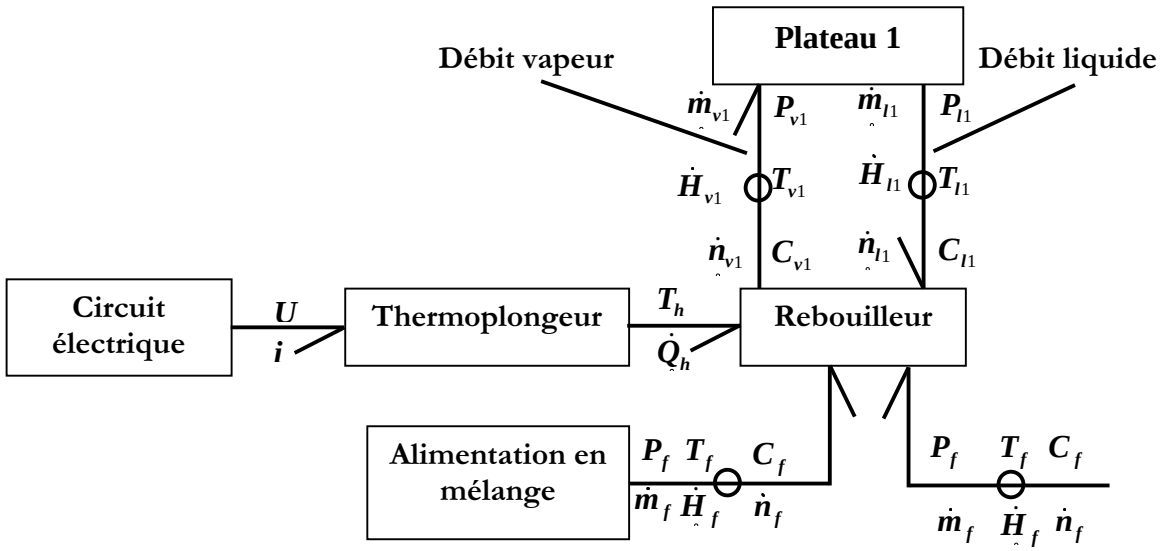


Fig. 5.3 : *Modèle bond graph à mots du rebouilleur d'une colonne UOP3BM*

Le modèle bond graph à mots permet de voir l'interaction entre les sous modèles du système, ainsi il permet de définir l'ensemble des bonds de connexion entre eux. Chaque sous système a un modèle bond graph à part entière. On se limite au modèle du rebouilleur avec ses bonds entrants (sortants) de l'extérieur (vers l'extérieur). On peut modéliser ces bonds par des sources d'effort ou de flux suivant la causalité affectée au modèle du rebouilleur.

Le modèle bond graph multi énergies du rebouilleur est donné par la figure (***Fig. 5.4***) avec les éléments dotés par l'index ' * ' sont des éléments fictifs. Nous avons utilisé des liens en simple et multiple énergie.

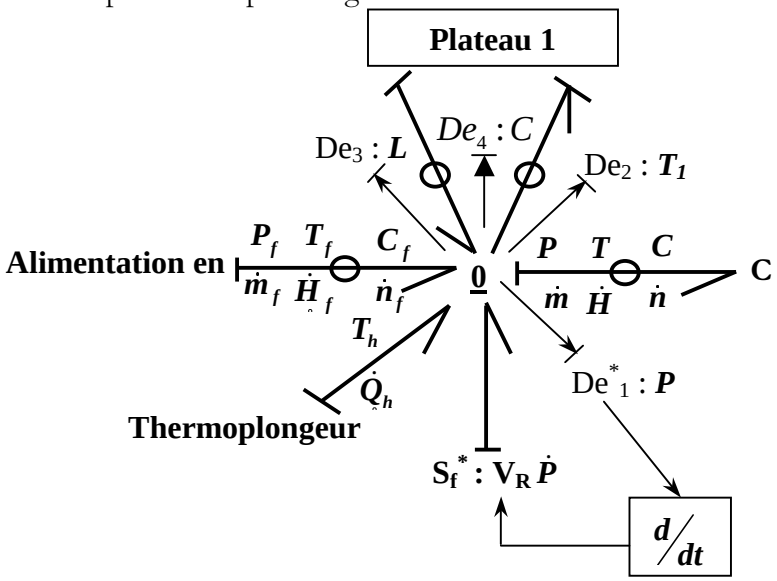


Fig. 5.4 : *Modèle bond graph multi-énergie du rebouilleur de la colonne UOP3BM*

Les variables de puissance choisies pour représenter le modèle sont en pseudo bond graphs pour des raisons discutées au troisième chapitre. Pour l'énergie hydraulique on utilise la paire $(P,\dot{m})$, la thermique $(T,\dot{H})$ pour le phénomène de convection (dans le rebouilleur) et $(T,\dot{Q})$ pour le phénomène de conduction (la puissance fournie par le thermoplongeur) et la chimique $(C,\dot{n})$. L'élément *C* est un élément multiport qui représente le phénomène de stockage de trois formes de l'énergie rencontrée.

Le modèle bond graph découplé du rebouilleur est présenté par la figure (***Fig. 5.5***). Les trois énergies sont vues séparément avec les éléments *C* qui présentent un même élément multi port.

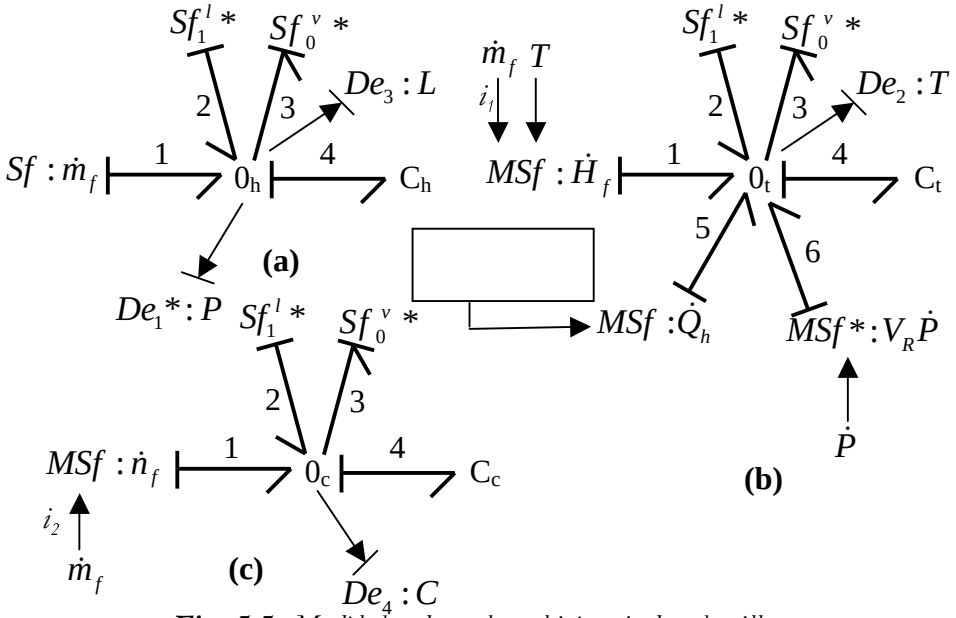


Fig. 5.5 : *Modèle bond graph multi-énergie du rebouilleur de la colonne UOP3BM* ***(a)*** *l'énergie hydraulique,* ***(b)*** *l'énergie thermique et* ***(c)*** *l'énergie chimique*

Dans ce modèle, on a mentionné des éléments par le symbole (*) pour dire que ces éléments sont fictifs. L'ensemble des relations de redondance qui peuvent être déduites par ce modèle sont données comme suit :

- Jonction 0_h : effort commun, on a une redondance d'information due au placement du capteur de niveau De_3 : L, et le capteur De_1 : P. La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{5.13}$$

Avec :

- $f_4 = C_h.s.De_1*$ représente la masse accumulée par l'élément C_h, De_1* est supposé un capteur de pression fictif, s est l'opérateur de Laplace,
- $f_1 = Sf : \dot{m}_f$ est le débit massique du liquide d'entrée,
- $f_2 = Sf_1^l *$ est le débit massique du liquide venant du plateau 1,
- f_3 est le débit de la vapeur vers le plateau 1,

- Jonction 0_t : effort commun donné par le capteur de température De_2 : T. La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 + f_6 + f_5 - f_3 \tag{5.14}$$

Tel que :

- $f_4 = C_t.s.De_2$ représente le flux d'enthalpie accumulé par l'élément C_t, avec De_2 est un capteur de température,
- $f_1 = MSf : \dot{H}_f$ est la source de flux d'enthalpie, modulée par les signaux $\dot{m}_f$ et T selon la relation (3.3),
- $f_2 = Sf_1^l *$ est le débit d'enthalpie du liquide venant du plateau 1,
- f_3 est le débit d'enthalpie de convection par la vapeur vers le plateau 1,
- $f_5 = MSf : \dot{Q}_h$ est une source de flux de chaleur qui représente le thermoplongeur, commandée par un régulateur,
- $f_6 = MSf* : V_R\dot{P}$ est une source de flux fictive, elle représente la puissance thermique des forces de pressurisation.

- Jonction 0_c : effort commun donné par le capteur de concentration $De_4 : C$ (on suppose que le relevé du liquide pour l'analyse est un capteur). La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{5.15}$$

Avec :

- $f_4 = C_c.s.De_4$ représente la concentration des composants de mélange accumulée par l'élément C_c,
- $f_1 = MSf : \dot{n}_f$ est le flux molaire du mélange d'entrée,
- $f_2 = Sf_1^l *$ est le flux molaire du liquide venant du plateau 1,
- f_3 est le flux molaire de la vapeur vers le plateau 1.

5.5.3. Génération des relations de redondance analytique :

Les relations de structure de jonction déjà obtenues peuvent être utilisées comme un support de génération de relations de redondance analytique. On se limite pour la conception du système de surveillance à la détection et la localisation des défauts affectant les capteurs et les actionneurs. On suppose que les flux de vapeur et de liquide sortant et entrant au rebouilleur sont connus. Les RRAs (Relations de Redondance Analytique) générées de façon symbolique sont développées comme suit :

$$RRA_1 = C_h.s.De_1 - \dot{m}_f - Sf_1^I * + f_3 \tag{5.16}$$

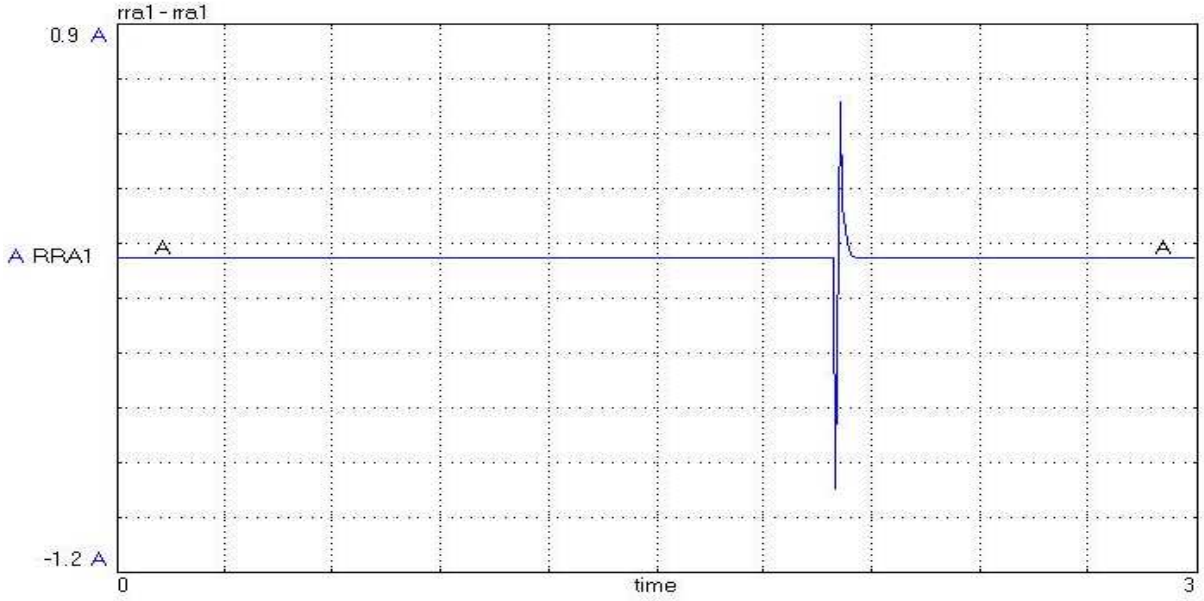
$$RRA_2 = C_t.s.De_2 - \dot{H}_f - Sf_1^I * - \dot{Q}_h - V_R\dot{P} + f_3 \tag{5.17}$$

$$RRA_3 = C_c.s.De_4 - \dot{n}_f - Sf_1^I * + f_3 \tag{5.18}$$

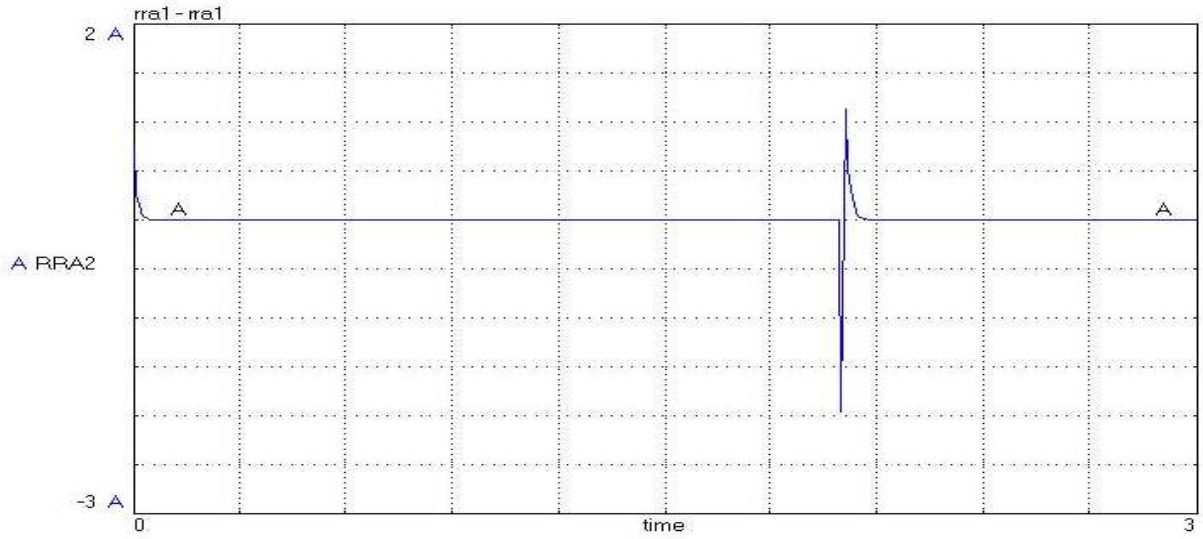
On voit que ces relations sont sensibles à plusieurs composants d'actionneurs et de capteurs. La première relation est sensible à la défaillance du capteur de pression ainsi qu'à la défaillance de la source du fluide $\dot{m}_f$. Pour la deuxième relation, on voit quelle représente une collection d'information sur le capteur de température, la source thermique d'entrée $\dot{H}_f$, la source de convection $\dot{Q}_h$ et l'information sur la puissance de pressurisation $V_R\dot{P}$. La troisième relation donne une information sur l'entrée en composition du mélange $\dot{n}_f$.

A l'aide du logiciel 20-sim Pro. 2.3 **[77]**, on peut construire une base de simulation du modèle bond graph ainsi que l'ensemble des relations de redondance analytique générées. Comme nous avons déjà dit, le bond graph permet une étude et une analyse du modèle de façon qualitative (qui ne dépend pas des valeurs numériques des composants qui le constitue). Pour cela, on prend des valeurs arbitraires unitaires pour la simulation du modèle. On crée à l'aide de l'interface de simulation des coupures et des erreurs sur les composants comme des défaillances. Les figures suivantes montrent l'efficacité de l'approche bond graph pour la détection des défauts générés sur chaque composant à travers la déviation de la relation considérée.

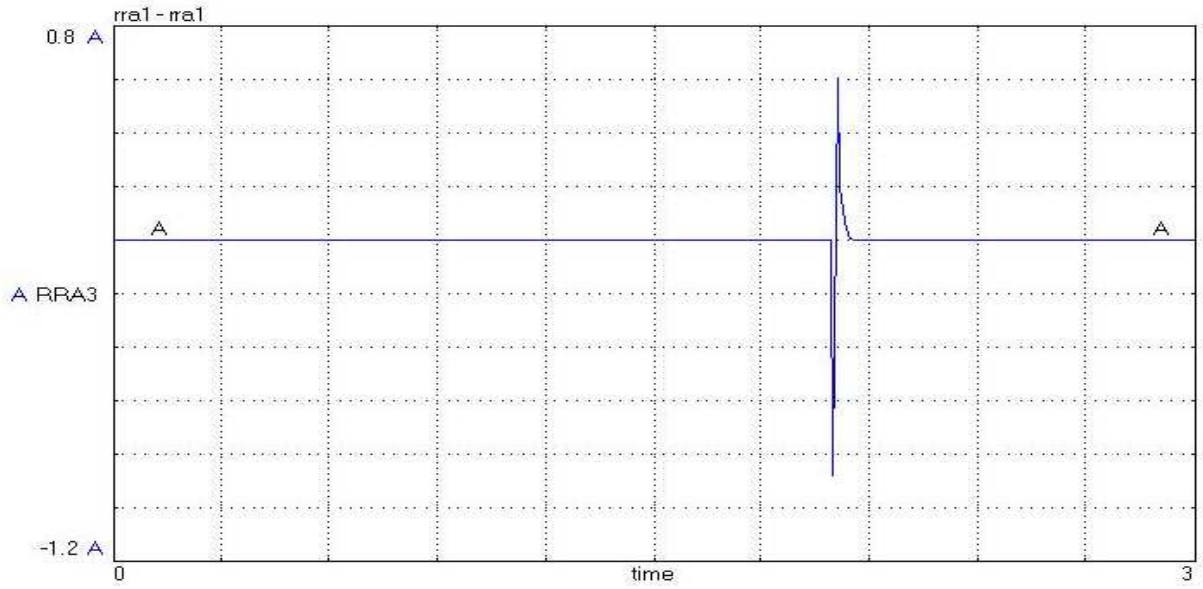
Premièrement, on crée un défaut entre le temps t_1 = 2 (s) et t_2 = 2.01 (s), par l'annulation de la valeur du débit massique fourni par la source $Sf : \dot{m}_f$. On voit que les RRAs générées se réagissent rapidement par leurs déviations à ses valeurs (près de 0), comme le montre la figure (***Fig. 5.6***). La réaction des relations RRA_2 et RRA_3 (***Fig. 5.6 (a) et (b)***) traduit la dépendance du domaine thermique et chimique au domaine hydraulique pour les sources thermo fluides. Le deuxième défaut simulé sur la défaillance du capteur de pression entre le temps t_1 = 2.7 (s) et t_2 = 2.71 (s), on voit sur la figure (***Fig. 5.7***) la réponse du résidu RRA_1.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.6 : *Réponse des RRAs à une défaillance simulée sur la source de fluide*
(a) *RRA*$_1$, ***(b)*** *RRA*$_2$, ***(c)*** *RRA*$_3$

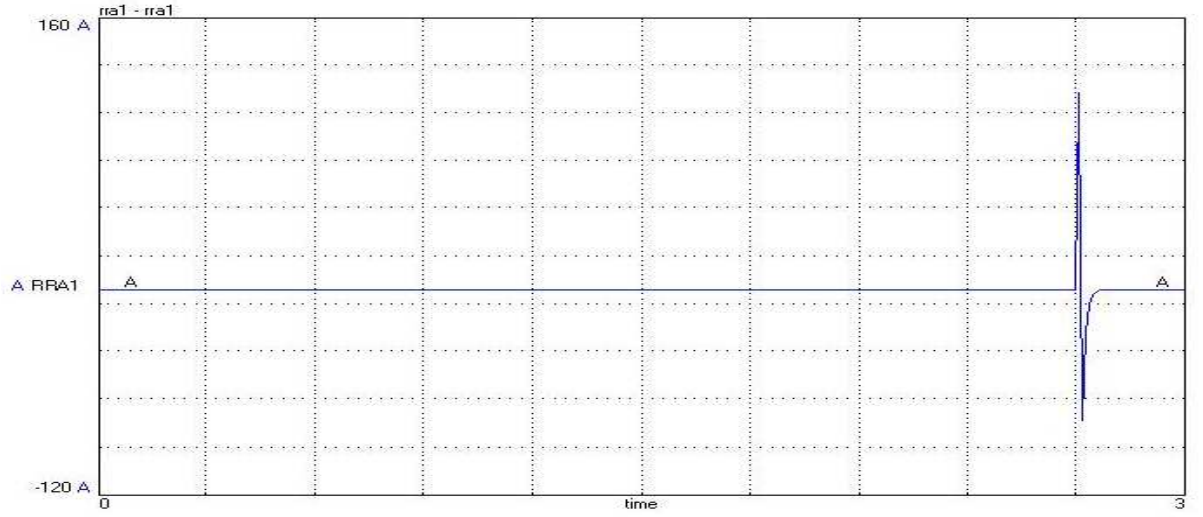


Fig. 5.7 : *Réponse du RRA*$_1$ *à la défaillance simulée du capteur de pression*

Si on veut simuler la réponse à une défaillance de la source de chaleur $\dot{Q}_h$, on crée entre le temps t_1 = 1.5 (s) et t_2 = 1.51 (s) une annulation de leur valeur fournie. Le résidu RRA_2 répond à cette défaillance (***Fig. 5.8***).

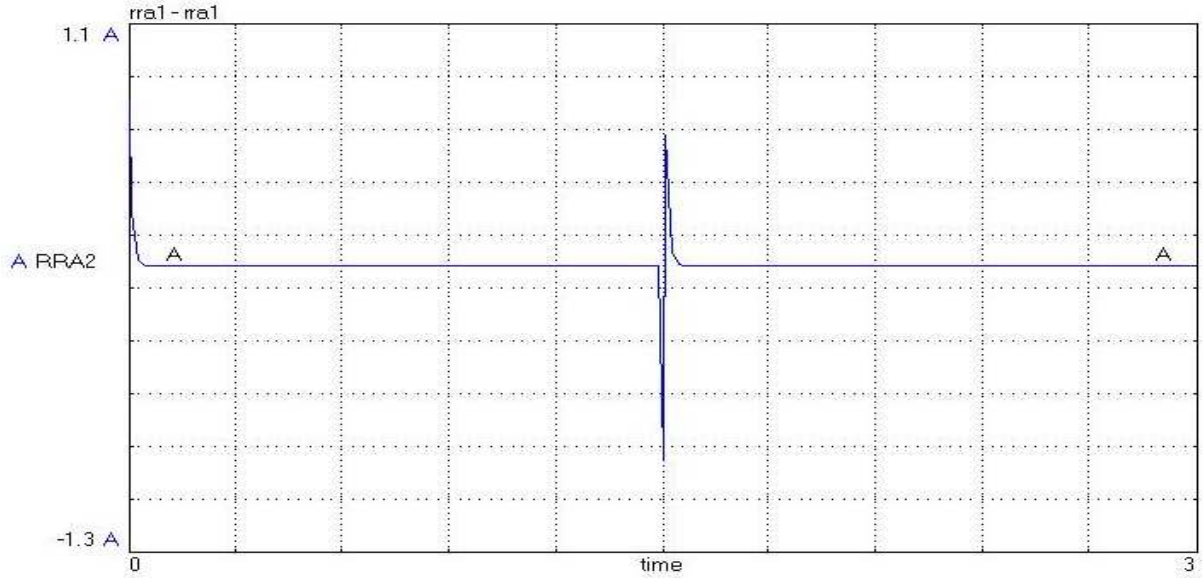


Fig. 5.8 : *Réponse du RRA_2 à la défaillance simulée de la source de chaleur $\dot{Q}_h$*

Le résidu RRA_2 sera sensible à la défaillance du capteur de température. On simule entre le temps t_1 = 1 (s) et t_2 = 1.01 (s) une défaillance totale de ce capteur. La figure (**Fig. 5.9**) montre cette sensibilité.

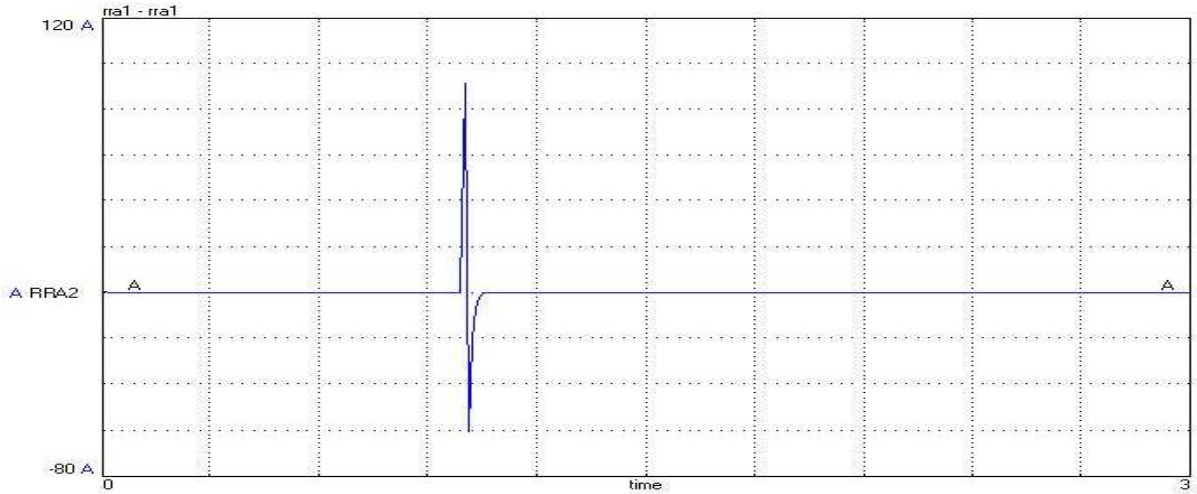


Fig. 5.9 : *Sensibilité du RRA_2 à la défaillance du capteur de température*

La dernière simulation faite sur la fuite de la matière dans le rebouilleur. Cette fuite peut être traduite en diminution du volume de liquide. On crée une diminution en volume entre le temps t_1 = 2.4 (s) et t2 = 2.41 (s) de 25 %. En réponse à cette défaillance, on voit que seul le résidu RRA_2 (***Fig. 5.10***) sera sensible à cette défaillance due à l'apport thermique des forces de pressurisation $MSf*:V_R\dot{P}$.

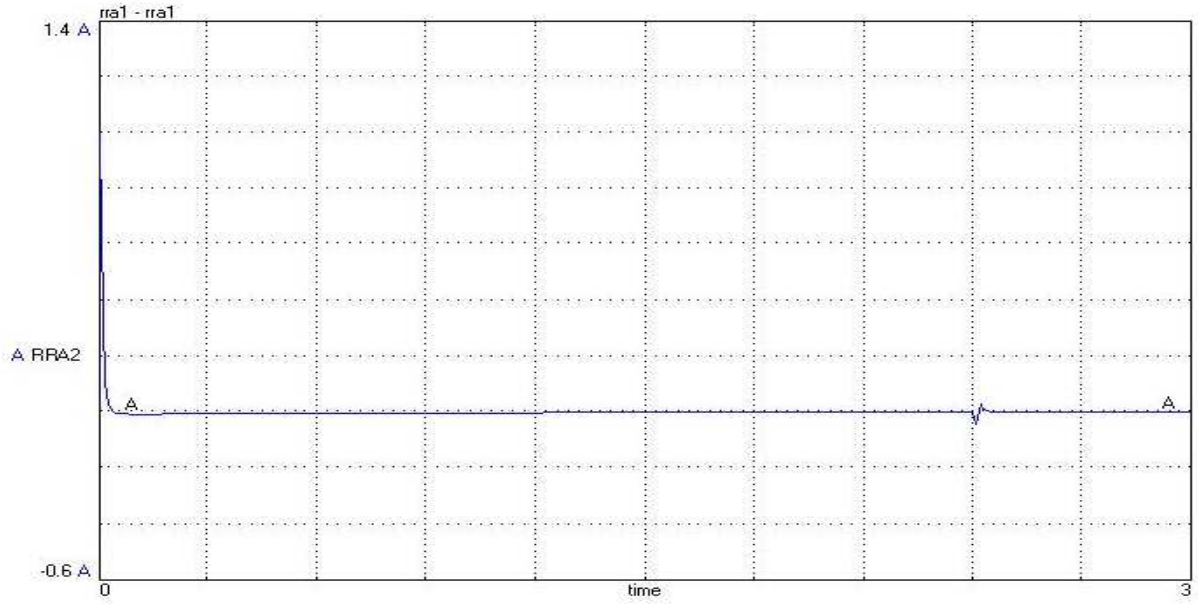


Fig. 5.10 : *Sensibilité du* RRA_2 *à une fuite simulée dans le rebouilleur*

Les figures précédentes montrent bien l'efficacité de la méthodologie proposée par l'outil bond graph pour la conception des générateurs de résidu de la surveillance. Cependant il est impossible de localiser les défaillances simultanées qui affectent quelques composants, comme l'illustre la figure suivante (***Fig. 5.11***), où on génère une défaillance totale sur la source de chaleur $\dot{Q}_h$ et une fuite dans le rebouilleur de 25% au même instant t_1 = 2.4 (s) et t2 = 2.41 (s). On trouvera une proposition pour la localisation par la suite.

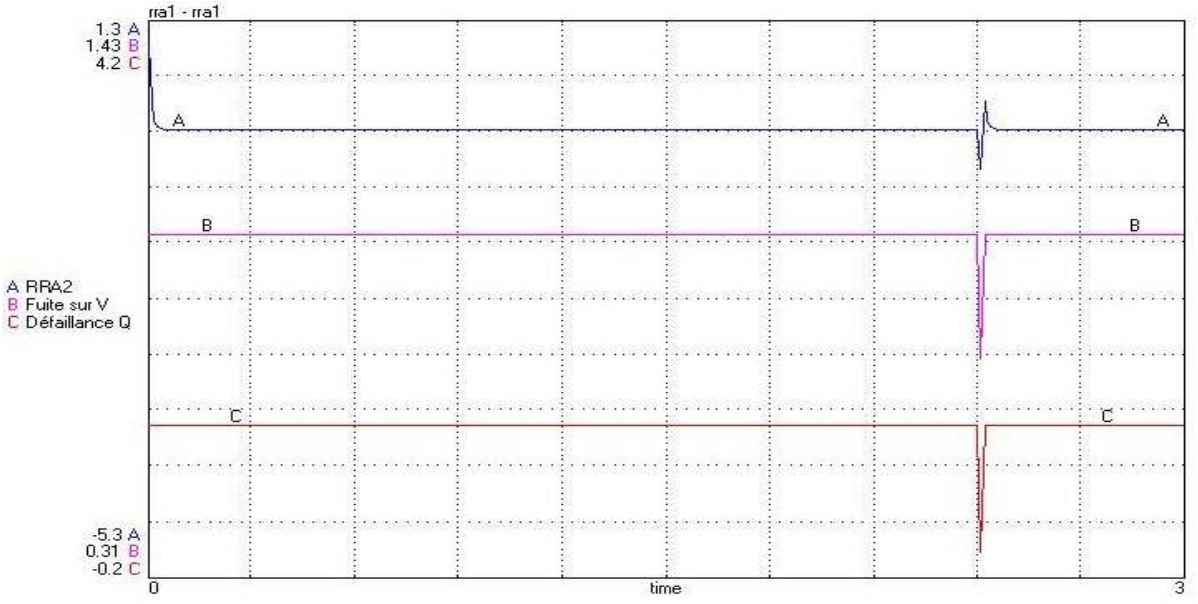


Fig. 5.11 : *Défaillance simultanée de la source* $\dot{Q}_h$ *avec une fuite de 25% dans le rebouilleur.*

5.5.4. Approche graphique de la surveillance :

Les résultats précédents peuvent être trouvés par l'approche graphique, en utilisant le concept des chemins causaux simples et généralisés. Si on suit le chemin causal entre chaque source de contrôle et les capteurs disponibles, on aura :

$$\begin{cases} Sf:\dot{m}_f - 1 - 4 - C - 4 - De_1 : P \\ Sf:\dot{m}_f - i_1 - MSf:\dot{H}_f - 1 - 4 - C - 4 - De_2 : T \\ Sf:\dot{m}_f - i_1 - MSf:\dot{n}_f - 1 - 4 - C - 4 - De_4 : C \end{cases} \quad (5.19)$$

$$MSf:\dot{Q}_h - 5 - 4 - C - De_2 : T \quad (5.20)$$

$$MSf:V\dot{P} - 6 - 4 - C - De_2 : T \quad (5.21)$$

Le système (5.19) justifie la détectabilité de la défaillance de la source de contrôle $Sf:\dot{m}_f$ par les trois relations de redondance analytique obtenues, en suivant un chemin causal simple (domaine hydraulique) et des chemins causaux généralisés (dans les domaines thermique et chimique). Les relations (5.20) et (5.21) illustre le problème de la non isolabilité des sources $MSf:\dot{Q}_h$ et $MSf:V\dot{P}$ en cas d'une défaillance simultanée, à cause du chemin causal commun entre ces sources et le capteur disponible ($De_2:T$). Comme solution à ce problème, on peut ajouté une jonction 1 après une des deux sources avec un détecteur de plus de flux pour former une autre relation de redondance analytique, ou tenter d'une nouvelle structure de positionnement de capteurs. Cette dernière démarche est sujette d'une investigation en cours proposée en tant que mémoire de magister, développée par notre collègue R. Hayoun.

5.5. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons vu deux approches complètement basées sur le bond graph pour la conception d'un système de surveillance à base de modèle.

La première approche consiste à utiliser les relations de structure de jonction pour générer les relations de redondance analytique (indicateurs de défaillance). Des simulations sont faites pour montrer l'efficacité de la méthode pour la détection des défauts. Des problèmes d'ordre plus technique ont été rencontrés pour la localisation de certains défauts peuvent se remédier à l'aide d'une nouvelle architecture d'instrumentation.

La deuxième approche pour la surveillance est purement structurelle. Elle repose sur le parcours des chemins causaux simples et généralisés pour le diagnostic des défauts affectant les sources de contrôle.

Coclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans ce mémoire ont tenté d'apporter une contribution à la problématique générale de la supervision des systèmes industriels en génie des procédés. Ils se sont attaqués à la mise en œuvre d'indicateurs de défaillances au sein des systèmes rencontrés en génie des procédés complexes (en raison de couplage de plusieurs phénomènes), c'est-à-dire prenant en compte les phénomènes de conduction et convection thermiques, ainsi que les phénomènes d'écoulement de la matière.

Bien que des techniques de surveillance sans modèle analytique existent, seules les méthodes de surveillance avec modèle permettent une précision et une efficacité suffisante pour ce type de procédés à risques. Encore faut-il que le modèle décrive de manière satisfaisante le système.

C'est dans cette optique qu'une modélisation par bond graph a été choisie. Celle-ci permet, de par sa modularité, d'intégrer un niveau de précision optimal vis-à-vis du compromis entre véracité (le modèle décrit-il fidèlement le système ?) et efficacité (un modèle trop complexe devient inutilisable). De plus, le caractère graphique de cet outil ouvre la porte à de nombreux résultats structurels issus de la théorie des graphes.

Après une exposition sur la théorie et les caractéristiques de la méthodologie bond graph, nous avons décrit les principales méthodes de surveillance des processus, avec un exemple illustratif sur l'utilisation du bond graph pour la génération des relations de redondance analytique. Une classification descriptive de l'ensemble des phénomènes et composants présents en génie des procédés permettant de définir une bibliothèque de modèles pour la modélisation des processus dans ce secteur. Comme exemple, la colonne de distillation discontinue est prise pour illustrer l'efficacité de l'outil bond graph pour la modélisation ainsi que pour la conception du système de surveillance.

Cette étude permet d'ouvrir un horizon de recherche fructueux dans l'application de cet outil sur les systèmes d'aide à la décision. Cependant, on a rencontré quelques contraintes dans le génie des procédés, notamment sur :

- La représentation des phénomènes présents, caractérisés par le couplage de différents domaines de la physique avec une grande complexité et une non linéarité.
- La difficulté de la mise en œuvre des phénomènes physiques dans le processus.
- La détection, la localisation et le diagnostic des processus à risques, surtout dans les systèmes chimiques réactionnels.
- Ils existent quelques limites de l'outil bond graph pour les modèles à paramètres non localisés ou incertains.

Cette démarche de modélisation est étendue pour être une méthodologie générale d'étude et d'analyse des systèmes complexes d'ordre non parfait, avec les possibilités qu'ils offrent pour la conception des lois de commande en se basant sur les propriétés structurelles et causales du modèle bond graph.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

1. Ould Bouamama B., « Bond Graphs », Cours de 1er année magister en automatique, Module : Identification et Modélisation des processus, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, Avril, 2002.
2. Busson F., « Les bond graphs multi-énergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2002.
3. Tagina M., « Application de la modélisation bond graph à la surveillance des systèmes complexes », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1995.
4. Dauphin-Tanguy G., « Les bond graphs et leurs applications en mécatronique », Les Techniques de l'Ingénieur, Traité : Informatique industrielle S7222, pp. 1-24, France, 1999.
5. Nagy P.A.J., L. Ljung, « System identification using bond graphs », In : Proceedings of The IFAC symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, pp. 61-66, Grenoble, France, July 1-3, 1992.
6. Zanzouri N., M. Tagina, G. Dauphin-Tanguy, « Sur la modélisation des systèmes hybrides par l'approche bond graph », In : Proceedings des Journées Tunisiennes sur l'Electrotechnique et l'Automatique JTEA, Vol. pp. 370-376, Sousse Nord, Tunisie, 21-23 Mars, 2002.
7. Dauphin-Tanguy G., « Les bond graphs », Hermes Science Publications, Paris, France, 2000.
8. Borne P., G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, « Modélisation et identification des processus », Editions Technip, Paris, France, 1992.
9. Thoma J.U., B. Ould Bouamama, « Modelling and simulation in thermal and chemical engineering. Bond graph approach », Springer Verlag, 2000.
10. Mosiek D., « Procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graphs », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1999.
11. Ould Bouamama B., J. Thoma, « Les Bond Graphs » sous la direction de G. Dauphin-Tanguy. Chap. 6 : Procédés thermodynamiques et chimiques. pp. 236-277, Collection IC2 Systèmes Automatisés Informatique Commande et Communication, Edition Hermes, 383 pages, Paris 2000.
12. Sueur C., A. Rahmani, « Les Bond Graphs » sous la direction de G. Dauphin-Tanguy. Chap. 8 : Analyse structurelle et commande des modèles bond graphs. pp. 236-277, Collection IC2 Systèmes Automatisés Informatique Commande et Communication, Edition Hermes, 383 pages, Paris 2000.
13. Iratni A., « Commande et analyse des interactions des systèmes multivariables par bond graphs », Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Algérie, 2003.
14. Ould Bouamama B., E. Cherifi, M. Staroswecki, B. Riera, « Supervision of complex systems using functional, structural and bond graph models », In : 3rd IFAC Workshop online fault detection and supervision in the chemical process industries, Vol. 1, Solaize, France, June 4-5, 1998.
15. Busson F., B. Ould Bouamama, « Monitoring of a steam generator using a bond graph approach », In : IFAC Symposium on power plant and power systems control, pp. 318-323, Brussels, Belgium, April 26-29, 2000.
16. Ould Bouamama B., F. Busson, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswecki, « Analysis of structural properties of thermodynamic bond graph models », In : 4th IFAC Symposium

on fault detection , supervision and safety for technical processes, Vol. 2, pp. 1068-1073, Budapest, Hungary, June 14-16, 2000.

17. Ould Bouamama B., M. Staroswеicki, B. Riera, E. Cherifi, « Multi-modelling of an industrial steam generator », Control Engineering Practice (CEP), N°: 8, pp. 1249-1260, 2000.
18. Ould Bouamama B., M. Staroswеicki, G. Dauphin-Tanguy, A. Khellassi, M. Zelmat, A. Benhalla, « Monitoring ability analysis using bond graph approach. Application to distillation column », In : 4th IFAC Workshop online fault detection and supervision in the chemical process industries, pp. 388-393, Jejudo Island, Korea, June 7-8, 2001.
19. Ould Bouamama B., M. Staroswеicki, G. Dauphin-Tanguy, « Actuator fault detection using a bond graph approach », In : Proceedings of European control conference ECC'2001, pp. 2735-2740, Porto, Portugal, September, 2001.
20. Ould Bouamama B., « Model builder for thermo-fluid systems using a bond graph and functional modelling », In : Proceedings of 13th European simulation symposium ESS'2001, pp. 822-826, Marseille, France, October 18-20, 2001.
21. Ould Bouamama B., « Bond graph approach as analysis tool in thermo-fluid model library conception », Journal of the Franklin institute, N° : 340, pp. 1-23, 2003.
22. Heny C., D. Simanca, M. Delgado, « Pseudo-bond graph model and simulation of a continuous stirred tank reactor », Journal of the Franklin institute, N° : 337, pp. 21-42, 2000.
23. MacKenzie S.A., P.J. Gawthrop, R.W. Ponton, « Systematic modelling of chemical processes », In : The IFAC Symposium on Advanced control of chemical process ADCHEM'91, 1991.
24. Brooks B.A., F.E. Cellier, « Modeling of a distillation column using bond graphs », In : Proceedings of the International conference on bond graph modeling ICBGM'93, pp. 315-320, Arizona, USA, 1993.
25. Pichardo C., M. Delgado, « Modeling and simulation of an industrial flash separator using pseudo-bond graphs », In : Proceedings of Computational engineering in systems application CESA'98, Vol. 1, pp. 552-556, Nabeul-Hammamet, Tunisia, April 1-4, 1998.
26. Pedersen E., « Modelling thermodynamic systems with changing gas mixtures », In : Proceedings of The International conference on bond graph modeling ICBGM'99, San Francisco, USA, January 17-20, 1999.
27. Tagina M., J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswеicki, « The bond graph use for the design and the improvement of instrumentation architecture for system monitoring » In : Proceedings of the IMCE'96, ASME Conference, Atlanta, USA, November, 1996.
28. Tagina M., J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswеicki, « Bond graph models for direct generation of formal fault detection systems », Systems analysis and modelling simulation journal SAMS, Vol. 23, pp. 1-17, 1996.
29. Gragouri A., M. Tagina, G. Dauphin-Tanguy, « La conception d'un système de surveillance pour un robot RTX à partir de son modèle bond graph », In : Proceedings of Journées tunisiennes sur l'électrotechnique et l'automatique JTEA'2002, Vol. 1, pp. 306-313, Sousse nord, Tunisie, 21-23 Mars, 2002.
30. Feenstra P.J., P.J. Mosterman, G. Biswas, P.C. Breedveld, « Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of flow processes », In : Proceedings of The International conference on bond graph modeling and simulation ICBGMS'2001, pp. 77-82, Phoenix Arizona, USA, January 7-11, 2001.
31. Kohda T., M. Yoshida, K. Inoue, « Failure diagnosis procedure based on system behavior model », Source Web: http: // www.aidic.it / italiano / Congressi / ersel'2001 / webpapersersel2001 /107.pdf.
32. Yeh T.-J., « Backstepping control in the physical domain », Journal of the Franklin Institute, N°: 338, pp. 455-479, 2001.

33. Junco S., A. Donaire, G. Garnero, « Speed control of series DC motor : A bond graph based backstepping design », In : Proceedings of the IEEE International conference on systems, man and cybernetics (CD-ROM Proceedings), Hammamet, Tunisia, October 6-9, 2002.
34. Dif I., M. Khemliche, « Modélisation par bond graph d'une suspension active de véhicule », In : Proceedings du Séminaire national sur l'automatique et les signaux SNAS'02 (CD-ROM Proceedings), Annaba, Algérie, 27-28 Octobre, 2002.
35. Jamei M, « Symbiotic evolution-based design of fuzzy inference systems with application to active suspension systems », PhD Thesis in automatic control and systems engineering, University of Sheffield, UK, September, 2002.
36. Borutzky W., « Object-Oriented modeling of mechatronic systems using bond graphs », In : Proceedings of the IASTED International conference applied modelling and simulation, Cairns, Australia, September 1-3,1999.
37. Debuisson B. (sous la direction), « Automatique et statistiques pour le diagnostic », Hermes Science Publications, Paris, France, 2001.
38. Maquin D., J. Ragot, « Diagnostic des systèmes linéaires », Hermes Science Publications, Paris, France, 2000.
39. Zwingelstein G., « Diagnostic des défaillances », Editions Hermes, Paris, France, 1995.
40. Aitouche A., « Surveillance des processus industriels : Méthodes, modèles et outils », Cours de 1er année magister en automatique, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, Avril, 2002.
41. Carpentier T., « Placement de capteurs pour la surveillance des processus complexes », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1999.
42. Hoblos G., « Contribution à l'analyse de la tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2001.
43. Christophe C., « Surveillance des systèmes non linéaires. Application aux machines électriques », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2001.
44. Frank P.M., « Application of fuzzy logic to process supervision and fault detection », In : IFAC/IMACS Symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes SAFEPROCESS'94, Vol. 2, pp. 531-538, Espoo, Finland, June 13-15, 1994.
45. Schneider H., P.M. Frank, « Observer-based supervision and fault detection in robots using nonlinear and fuzzy logic residual evaluation », IEEE Transactions on control, systems technology, Vol. 4, N° : 3, pp. 274-282, May, 1996.
46. Qin S.J., W. Li, « Detection, identification, and reconstruction of faulty sensors with maximized sensitivity », AIChE Journal, Vol. 45, N° : 9, pp. 1963-1976, September, 1999.
47. Dunia R., S.J. Qin, « Subspace approach to multidimensional fault identification and reconstruction », AIChE Journal, Vol. 44, N°: 8, pp. 1813-1831, August, 1998.
48. Qin S.J., W. Li, « Detection and identification of faulty sensors in dynamic processes », AIChE Journal, Vol. 47, N° : 7, pp. 1581-1593, July, 2001.
49. Yoon S., J.F. MacGregor, « Statistical and causal model-based approaches to fault detection and isolation », AIChE Journal, Vol. 46, N°: 9, pp. 1813-1824, September, 2000.
50. Gertler J., W. Li, Y. Huang, T. McAvoy, « Isolation enhanced principal component analysis », AIChE Journal, Vol. 45, N° : 2, pp. 323-334, February, 1999.
51. Debuisson B., « Détection et diagnostic de pannes sur processus », Les Techniques de l'Ingénieur, Traité : Mesures et contrôle R7597, pp. 1-9, France, 1985.
52. Comtet-Varga, G., C. Christophe, V. Cocquempot, M. Starosweicki, and «FDI for the induction motor using eliminating theory», In: Proceedings of the European control conference ECC'99, Karlsurhe, Germany, 1999.

53. Vilain L., B. Petit, J.P. Cassar, « Surveillance du serrage hydraulique d'une cage de laminoir », AGI'96, Forum des doctorants, pp. 87-90, Tours, France, 6-7 Juin, 1996.
54. Raghuraj R., M. Bhushan, R. Rengaswamy, « Locating sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria », AIChE Journal, Vol. 45, N° : 2, pp. 310-322, February, 1999.
55. Chang C.-T., J.-I. Hwrug, « Simplification techniques for EKF computations in fault diagnosis: Model decomposition », AIChE Journal, Vol. 44, N°: 6, pp. 1392-1403, June, 1998.
56. Benloucif M.L., « Model-based fault detection and isolation using the generalized parity space and the unknown input observer techniques », In : Proceedings of the International conference on signals and systems ICSS'94, Vol. VI, pp. 72-75, Algiers, Algeria, September 24-26, 1994.
57. Athamena B., H.A. Abbassi, « Adaptive control and failure detection in dynamic systems », In : Proceedings des Journées tunisiennes sur l'électrotechnique et l'automatique JTEA'2002, Vol. 1, pp. 72-79, Sousse Nord, Tunisie, 21-23 Mars, 2002.
58. Kechida S., N. Debbache, « Conception d'un estimateur pour la surveillance des systèmes », In : Proceedings du Séminaire national sur l'automatique et les signaux SNAS'02 (CD-ROM Proceedings), Annaba, Algérie, 27-28 Octobre, 2002.
59. Souaker F., H. Baba Amer, « Détection automatique des pannes appliquée sur les capteurs associés aux systèmes automatisés », In : Proceedings of the International conference on signals and systems ICSS'94, Vol. III, pp. 129-133, Algiers, Algeria, September 24-26, 1994.
60. Isermann R., « Process fault detection based on modeling and estimation methods : A survey », Automatica, Vol. 20, N° : 4, pp. 387-404, 1984.
61. Athamena B., H.A. Abbassi, « Détection de défauts d'un système en utilisant la méthode d'estimation paramétrique hybride », In : Proceedings des Journées tunisiennes sur l'électrotechnique et l'automatique JTEA'98, Conférence international, Nabeul Hammamet, Tunisie, 6-7 Novembre, 1998.
62. Humphrey J.L., G.E. Keller II, « Procédés de séparation », Editions Dunod, Paris, France, 2001.
63. Creff Y., P. Rouchon, « Colonne à distiller », Chap. 7 du livre collectif " Commande de procédés chimiques " sous la direction de J.P. Corriou, Hermes Science Publications, Paris, France, 2001.
64. Lemarchand H., F. Guyot, L. Jousset, L. Jullien, « Thermodynamique de la chimie », Editions Hermann, Paris, France, 1999.
65. Abida L., M.S. Koutchoukali, A. Beicha, « Modélisation et commande adaptative d'une colonne de distillation », In : Proceedings of the International conference on signals and systems ICSS'94, Vol. VI, pp. 1-5, Algiers, Algeria, September 24-26, 1994.
66. Byrski W., J. Duda, « Modelling of distillation columns for control purposes », International Journal of Systems Sci., Vol. 21, N° : 1, pp. 21-31, 1990.
67. Sørensen E., « Studies on optimal and control of batch distillation columns », Dr. Ing. Thesis, The Norwegian institute of technology, University of Trondheim, Norway, July, 1994.
68. Klingberg A., « Modelling and optimisation of batch distillation », Master thesis, Department of automatic control, Lund institute of technology, Sweden, February, 2000.
69. Armfield Ltd., « Instruction manual for batch plate and packed column UOP3a », Issue 9, Armfield limited, Ringwood, Hampshire, UK, September, 1994.
70. Armfield Ltd., « Distillation columns UOP3 : Instruction manual for UOP3CC and UOP3BM » Issue 5, Armfield limited, Ringwood, Hampshire, UK, December, 2000.

71. Christiansen A.C., « Studies on optimal design and operation of integrated distillation arrangements », Dr. Ing. Thesis, Department of chemical engineering, Norwegian University of science and technology, Norway, September, 1997.
72. Brooks B.A., « Modeling of a distillation column using bond graphs », Master thesis of science with major in electrical engineering, University of Arizona, USA, 1993.
73. Patton R.J., F.J. Uppal, J. Lopez-Toribio, « Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems : A survey », In : 4th IFAC Symposium on fault detection , supervision and safety for technical processes, Vol. 1, pp. 298-311, Budapest, Hungary, June 14-16, 2000.
74. Ould Bouamama B., J.U. Thoma, J.P. Cassar, « Bond graph modelisation of steam condensers », In: Proceedings of The IEEE International conference on systems, man, and cybernetic, Vol. 3, pp. 2490-2494, Olando, USA, October 16-17, 1997.
75. Ould Bouamama B., J.P. Cassar, « Integrated bond graph modelling in process engineering linked with economic system », In: Proceedings of the 14th European simulation multiconference ESM'2000, pp. 23-30, Ghent, Belgium, Mai, 2000.
76. Tkach D, Puttick R., « La technologie objet dans le développement des application », 2ème édition Vuibert - Informatique, Paris, France, 1998.
77. Controllab Products B.V., *20-SIM « Reference Manual »*, version 2.3, Controllab Products B.V., University of Twente, Enschede, Netherlands, 1998.
78. Gawthrop P.J., « Bicausal bond graphs », In : Proceedings of the second international conference on bond graph modelling and simulation (ICBGMS'95), Vol. 27, pp. 83-88, Las Vegas, USA, 1995.

Annexes

Annexe 1 : Apport du bond graph dans l'automatisation des systèmes

L'automatique appartient aux sciences de l'ingénieur qui sont à la fois des sciences de l'analyse, de l'observation, de la description du monde qui nous entoure, et des sciences de la conception, de la création, de la synthèse d'objets artificiels.

Le bond graph par son caractère multi disciplinaire peut réunir différents aspects de l'automatique, qui en plus regroupe plusieurs domaines et spécialité, donc un outil performant de communication inter-disciplinaires.

Cet annexe à pour but de présenter l'apport du bond graph pour l'étude de l'automatisation des systèmes. Automatisation, c'est bien savoir concevoir un modèle performant d'un système donné, comprendre son comportement, contrôler son fonctionnement, maîtriser leurs modes, aider l'opérateur à prendre les bonnes décisions, … etc.

Après leur invention en 1961, plusieurs axes de recherches ont été conduits pour l'intégration du bond graph dans l'étude, la réalisation ainsi que la conduite et la supervision automatique des systèmes, dans plusieurs universités et centres de recherche dans le monde entier. L'apport du bond graph sur les principaux axes de recherche soit pour :

- La modélisation : le bond graph donne à l'automaticien une méthode simple pour la modélisation des systèmes physiques multidisciplinaires, qui repose sur la caractérisation des phénomènes par des composants génériques. Ces composants échangent la puissance entre eux avec une conservation de l'énergie.
- L'analyse structurelle : la structure du modèle bond graph, leur caractère graphique ainsi que leur mise en causalité permet de déduire des méthodes systématiques pour l'analyse structurelle du système considéré, comme l'étude de la commandabilité, l'observabilité, la surveillabilité, le diagnostic,… etc. et aussi de déduire l'ensemble de modes du système.
- La conception des lois de commande : plusieurs travaux de recherche ont été initiés pour l'utilisation du bond graph pour la conception des lois de commande. Les premiers travaux reposent sur le passage aux autres formes de représentation (matrices d'état, fonctions de transfert, schéma bloc, représentation vectorielle), pour appliquer les lois de commande conventionnelles (PID, LQR/LQG, …) puis il y a certains travaux qui sont apparus et qui utilisent directement le bond graph pour le calcul des lois de commande. Certains travaux s'inspirent de la structure graphique et causale du bond graph pour la mise en œuvre de la loi (comme dans le cas du travail de Yeh **[32]** pour l'émulation physique de la commande Backstepping ou Junco et al. **[33]**, qui utilise la notion de bicausalité pour contrôler un moteur à courant continu par la commande Backstepping). Autres approches de commande prend un sens physique à travers l'utilisation d'un modèle bond graph comme dans le cas de la logique floue et la programmation évolutionnaire **[35]**.
- Estimation et identification : par le concept du bond graph bicausal introduit par Gawthrop en 1995 **[78]**, le modèle bond graph permet de déduire l'ensemble des paramètres et variables inconnues dans le modèle, ainsi que l'on peut décrire le modèle inverse du système.

- Simulation : la caractère orienté objet de la représentation bond graph permet d'implanter des programmes et logiciels de simulation de façon simple et utile pour tous les domaines physiques. Ainsi que le caractère qualitatif du modèle bond graph facilite son étude et sa simulation, alors que le modèle quantitatif permet également de simuler le comportement réel du système. Un autre avantage du bond graph pour la simulation est qu'un seul modèle peut simuler plusieurs systèmes physiques de natures diverses, c'est le célèbre concept : la Réutilisation de l'approche orienté objet.
- La supervision : l'approche bond graph permet également la conception des systèmes de surveillance à l'aide de sa structure graphique et causale. Soit par la génération des relations de redondance analytique par les méthodes directes et indirectes (passage à d'autres formes de représentation pour appliquer les méthodes de surveillance à base de modèle), ou par le parcours graphique des chemins causaux simples et généralisés. Le choix et le placement des capteurs et d'actionneurs est un problème très délicat pour la conception des systèmes de surveillance. Ils existent des solutions graphiques en bond graph mono énergie **[10]** qui peuvent être étendues en multi-énergie. Avec l'ajout de l'incertitude des paramètres aux valeurs des composants bond-graph, les problèmes de la détection et la localisation des fautes sont résolus, et même la tolérance aux fautes peut être introduite, permettant de donner une autre approche d'aide à la décision.

Annexe 2 : Fonctions thermodynamiques

Unités : h en kJ/kg, T en C, P en bar, volume massique en m^3/kg.

- Enthalpie spécifique de la vapeur en fonction de la pression :
  $h_v(P) = -0.74P^2 + 17.21P + 2680$

- Enthalpie spécifique du liquide en fonction de la pression :
  $h_l(P) = -0.0243P^4 + 0.8487P^3 - 11.9P^2 - 99.97P + 347$

- Volume massique de la vapeur en fonction de la pression :
  $v_v(P) = -5.3\times10^{-5}P^5 + 0.00207P^4 - 0.032P^3 + 0.2498P^2 - 1.03P + 2.166$

- Volume massique du liquide en fonction de la pression :
  $v_l(P) = -3.59\times10^{-7}P^3 + 1.2456\times10^{-5}P^2 + 1.039\times10^{-3}$

- Température en fonction de la pression :
  $T(P) = -0.459P^2 + 12.7243P + 99.005$

- Chaleur latente de la vapeur en fonction de la température :
  $L_V(T) = -3.4\times10^{-8}T^4 + 4.421\times10^{-8}T^3 - 1.545\times10^{-3}T^2 - 2.214T + 2497$

- Enthalpie de la vapeur en fonction de la température :
  $h_V(T) = 1.1248T + 2267.5$

- Enthalpie du liquide en fonction de la température :
  $h_V(T) = 4.337T - 1.2025\times10^3$