

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Automatique

Par

Melle : KARA Fouzia

Thème

**Surveillance d'un Condenseur d'une Colonne de Distillation par les
Méthodes Analytique et Graphique**

Soutenu le 18 / 05 / 2008

Devant le Jury

M^r. S. BELKHIAT	M.C	Université de Sétif	Président
M^r. A. LAMAMRA	M.C	Université de Sétif	Rapporteur
M^r. M. KHEMLICHE	M.C	Université de Sétif	Examineur
M^r. L. ABED	C.C	Université de Sétif	Examineur

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Automatique au département d'électrotechnique de l'université Ferhat Abbas de Sétif.

Mes remerciements vont tout d'abord, à Dieu le tout puissant le m'ayant donné courage, patience et la force pour réaliser ce travail.

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur **M^r. A. LAMAMRA** ; pour la confiance qu'il m'a prodiguée pour la direction et tout l'aide qu'il m'a apporté durant toute la durée de ce travail de recherche.

Je remercie vivement **M^r L. ABED**, pour sa constante disponibilité, pour l'aide et les nombreux conseils et encouragements qu'il m'a toujours prodigués, pour m'avoir fait bénéficier de sa rigueur scientifique, de ses critiques objectives et de ses conseils avisés.

Je remercie à **M^r C. MOUATS** et son équipe de laboratoire de chimie Moléculaire, de contrôle de l'environnement et de mesures Physico-chimiques (*département de chimie de l'université MENTOURI de Constantine*) de m'avoir accueilli et m'avoir aidé à effectuer avec eux les essais expérimentaux qui sont à la base de mon mémoire.

Je tiens à remercier également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et leurs commentaires constructifs.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis et collègues surtout ceux qui m'ont apportés un soutien moral, patience, une amitié inoubliable et précieuse et son dévouement qui fut particulièrement indispensable.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

Table des matières

<i>Introduction Générale</i>	1
<i>Chapitre 01 :</i>	
<i>NOTION SUR LA MODELISATION ET L'IDENTIFICATION</i>	
1.1. Introduction	4
1.1.1. Définition de la modélisation	4
1.1.2. L'importance de la modélisation	4
1.2. Modèle de processus	5
1.2.1. Notion de processus	5
1.2.2. Nature mathématique des systèmes.....	6
1.2.3. Notion de modèle	7
1.2.3.1. Modèle de connaissance	7
1.2.3.2. Modèles de représentation	7
1.2.3.2.1. Modèles de règles	7
1.2.3.2.2. Modèles de fichiers	8
1.2.3.2.3. Modèles entrées-sorties	8
1.2.3.2.4. Modèles d'état	8
1.2.3.2.5. Modèles graphiques	8
1.2.4. Choix du modèle d'un processus	9
1.2.4.1. Modèle à temps continu	10
1.2.4.2. Modèle à temps discontinu ou discret	10
1.2.4.3. Modèle linéaire	10
1.2.4.4. Modèle non linéaire	11
1.2.5. Etapes de la modélisation	11
1.3. Identification	11
1.3.1. Principes de l'identification	11
1.3.2. Identification des processus	12
1.3.2.1. Choix de la méthode de recherche du modèle	13
1.3.2.2. Bases d'identification des systèmes	14
1.3.2.2.1. Acquisition des E/S sous un protocole d'expérimentation	14
1.3.2.2.2. Choix ou estimation de la complexité du modèle	14
1.3.2.2.3. Estimation des paramètres du modèle.....	14

1.3.2.2.4. Validation du modèle	14
1.3.3. Algorithme des moindres carrés récursifs	14
1.3.3.1. Principe des MCR	14
1.3.3.2. Les avantages des algorithmes récursifs	15
1.3.4. Choix de la séquence d'entrée pour l'identification	15
1.3.5. Représentation des Sortie/Entrée du modèle	16
1.3.5.1. Représentation des systèmes dynamiques linéaires	16
1.3.5.2. Représentation du modèle pour des systèmes dynamiques.....	16
1.3.5.3. Structures de modèles (des sorties-entrées)	16
1.3.5.3.1. Structure 1	17
1.3.5.3.2. Structure 2	17
1.3.5.3.3. Structure 3	17
1.3.5.3.4. Structure 4	18
1.3.6. Choix du critère d'équivalence	18
1.3.6.1. Distance entre les sorties du système et de son modèle: Erreur sur la sortie	18
1.3.6.2. Distance entre les entrées du système et de son modèle : Erreur sur l'entrée.....	18
1.3.6.3. Erreur généralisée	19
1.3.7. Critères et choix de l'ordre du modèle	19
1.4. Représentation d'état des systèmes	20
1.4.1. Introduction	20
1.4.2. Notion de système	21
1.4.3. Signification pratique de la notion d'état	21
1.4.4. Représentation d'un système	22
1.4.4.1. Représentation externe	22
1.4.4.2. Représentation interne	22
1.4.5. Connaissance d'un système	23
1.4.5.1. Commandabilité	23
1.4.5.2. Observabilité	23
1.4.5.3. Structure de KALMAN	23
1.4.6. Forme de représentation de base	24
1.4.6.1. Forme compagne commandable	24
1.4.6.2. Forme compagne observable	25
1.4.6.3. Forme modale	25
1.4.7. Pluralité des représentations d'état	26

1.5. Processus linéaires stationnaires	27
1.5.1. Processus continus linéaires stationnaires	27
1.5.1.1. Notion de fonction et matrice de transfert	27
1.5.2. Processus discret linéaires stationnaires	30
1.6. Conclusion	31

Chapitre 02:

DESCRIPTION DE LA COLONNE DE DISTILLATION

2.1. Introduction	32
2.2. Historique	32
2.3. La distillation.....	32
2.3.1. Principe général de la distillation	32
2.3.2. Type de distillation.....	33
2.3.2.1. La distillation continue.....	33
2.3.2.2. La distillation discontinue	33
2.4. Description d'une colonne de distillation.....	34
2.4.1. La virole	34
2.4.2. Les fonds	34
2.4.3. Ballon de tête et Ballon de fond	35
2.4.4. Les contacteurs liquide-vapeur.....	35
2.4.5. Les plateaux.....	36
2.4.6. Les garnissages.....	36
2.5. Les appareils d'échange thermique	37
2.5.1. Le rebouilleur	37
2.5.1.1. Rebouilleur type Kettle	37
2.5.1.2. Rebouilleur à thermosiphon vertical	37
2.5.1.3. Rebouilleur once-through	37
2.5.1.4. Rebouilleur par four	37
2.5.2. Le condenseur	37
2.5.2.1. Condensation totale	38
2.5.2.2. Condensation partielle.....	38
2.6. Les différents types de colonnes de distillation	38
2.6.1. Le Séparateur Flash.....	39
2.6.2. La colonne de distillation continue	40

2.6.2.1. La nature de l'alimentation	40
2.6.2.1.1. Colonne binaire	40
2.6.2.1.2. Colonne multi-composants	40
2.6.2.2. La conception interne de la colonne.....	40
2.6.2.2.1. Colonne à plateaux	40
2.6.2.2.2. Colonne à garnissage	41
2.6.3. La colonne de distillation discontinue	42
2.7. Caractéristiques d'une colonne de distillation	43
2.7.1. Puissance de la colonne	43
2.7.2. Débit	43
2.7.3. Retenue de la colonne (Volume de rétention).....	44
2.7.4. Efficacité	44
2.7.5. Finesse.....	44
2.7.6. Pertes de charge	44
2.8. Avantages d'une colonne à plateaux	44
2.9. Inconvénient	44
2.10. Conclusion	45

Chapitre 03:

ELEMENTS BOND GRAPHS ET MODELISATION

3.1. Introduction	47
3.2. Éléments bond graph.....	47
3.2.1. Représentation de l'outil Bond-graph	47
3.2.1.1. Représentation des transferts de puissance	47
3.2.1.2. Les variables mises en jeu	48
Variables de puissance	48
Variables d'énergie	48
3.2.2. Les éléments bond-graphs.....	49
3.2.2.1. Éléments passifs	49
L'élément <i>R</i>	50
L'élément <i>C</i>	51
L'élément <i>I</i> (<i>inertie</i>)	52
3.2.2.2. Éléments actifs (les sources)	53
3.2.2.3. Détecteurs	53

3.2.2.4. Eléments des jonctions	54
A. Jonction 0	54
B. Jonction 1	55
C. Transformateur <i>TF</i>	55
D. Gyrateur <i>GY</i> (transducteur <i>TD</i>)	55
3.2.3. Notion de causalité	56
3.2.3.1. Analyse de la causalité	56
3.2.3.2. Procédure d'affectation de la causalité.....	57
3.2.4. Matrice de transfert	58
3.2.5. Fonction de transfert.....	59
3.2.6. Equation d'état	59
3.2.6.1. Etablissement de l'équation d'état	59
3.2.6.2. Propriétés.....	59
3.2.7. Procédure (méthode systématique)	60
3.2.8. Variables de puissance en génie des procédés	60
3.2.8.1. Représentation par bond-graph à multiports	60
3.2.8.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond-graph.....	60
3.2.8.3. Les variables d'énergie en pseudo bond-graph	61
3.1.8.4. L'équation de Carnot.....	62
3.3. Modélisation par bond graph.....	62
3.3.1. Organigramme de modélisation	62
3.3.2. Niveaux de modélisation.....	62
3.3.2.1. Le niveau technologique	63
3.3.2.2. Le niveau physique.....	63
3.3.2.3. Le niveau mathématique	63
3.3.2.4. Le niveau algorithmique.....	64
3.3.3. Principe de la thermodynamique.....	64
3.3.4. Bond-graphs des systèmes thermiques.....	65
3.3.4.1. Phénomène de conduction.....	65
3.3.4.2. Entropie	66
3.3.4.3. Enthalpie.....	66
3.3.5. Modélisation de quelques phénomènes par bond graph.....	66
3.3.5.1. Présentation des classes de problèmes et choix des variables de puissance	66
3.3.5.1.1. Phénomènes de convection	66

3.3.5.1.2. Mélange eau-vapeur	67
3.3.5.1.2.1. Fluide à température normale.....	67
3.3.5.1.2.2. Mélange à température saturée.....	67
3.3.5.1.2.3. Variable de flux d'un accumulateur de vapeur.....	67
3.3.5.2. Eléments multiports de base en génie des procédés.....	68
3.3.5.2.1. Multiport R thermodynamique	68
3.3.5.2.2. Multiport C thermodynamique.....	69
3.3.5.3. Multiport RS	69
3.3.5.4. Source thermo-fluide.....	70
3.3.6. Bond-graph des systèmes chimiques.....	70
3.3.6.1. Potentiel ou tension chimique	70
3.3.6.2. Propriété de la tension chimique	71
3.3.6.3. Equations constitutives pour les gaz et les liquides	72
3.3.6.4. Equilibre chimique, thermique et hydraulique.....	73
3.3.6.5. Echange de masse entre deux substances.....	74
3.3.6.6. Bond-graph d'une réaction chimique.....	75
3.4. Changement de phase de la vapeur	76
3.4.1. Le condenseur	76
3.4.2. Présentation du condenseur.....	77
3.4.3. Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation.....	77
3.4.4. Phénomène de condensation	78
3.5. Modélisation du condenseur par bond-graph.....	79
3.5.1. Schéma de principe	79
3.5.2. Bond-graph à mots	79
3.5.3. Modèle bond-graph	80
3.6. Application.....	81
3.6.1. Application sur un modèle bond graph	82
3.6.1.1. Variation de la température en fonction du temps pour la phase vapeur	82
3.6.1.2. Variation de la température en fonction du temps pour la phase liquide, c'est-à-dire l'eau de refroidissement.....	84
3.6.1.3. Variation de la température par rapport au débit massique la vapeur.....	85
3.6.1.4. Variation de la température par rapport au débit massique de l'eau de refroidissement.....	85
3.6.2. Application sur un modèle paramétrique	86

3.6.3. Comparaison entre le modèle paramétrique et le modèle bond graph	87
3.7. Conclusion.....	88

Chapitre 04:

LA SURVEILLANCE

4.1. Introduction	89
4.2. Terminologies de base.....	89
4.3. Diagnostic des systèmes : concepts généraux.....	90
4.4. Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision	91
4.4.1. Classification des méthodes de surveillance	91
4.4.2. Méthodes de surveillance	93
4.4.2.1. Les approches de la surveillance sans modèle analytique	93
4.4.2.1.1. Analyse fréquentielle (Filtrage)	94
4.4.2.1.2. Redondance matérielle	94
4.4.2.1.3. Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs)	94
4.4.2.1.4. Réseaux de neurones artificiels (RNA).....	94
4.4.2.1.5. Systèmes d'Inférence Flous	95
4.4.2.2. Les approches de la surveillance à base de modèle analytique.....	96
4.4.2.2.1. Espace de parité.....	98
4.4.2.2.2. Observateurs	99
4.4.2.2.3. Estimation paramétrique	101
4.4.2.2.4. Graphes causaux	101
4.5. Génération des RRAs par les approches classiques	102
4.6. Etat de l'art sur la surveillance des systèmes par bond graph	102
4.6.1. Intérêt des modèles bond graphs couplés pour le diagnostic	102
4.6.2. Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic	103
4.6.3. Diagnostic par Bond graph quantitatif	104
4.6.3.1. Connaissance de la structure du modèle	104
4.6.3.2. Représentation matricielle	105
4.6.3.3. Parcours des chemins causaux	106
4.6.3.4. Placement de capteurs pour la surveillabilité des sources	106
4.6.3.5. Surveillance des composants	107
4.6.3.6. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph vapeur	108

4.7. Algorithme de placement de capteurs	108
4.7.1. Contraintes pour la surveillance des composants	108
4.8. Description du processus	110
4.9. Relations de redondance analytique des résidus	113
4.10. Application	116
4.10.1. Essais sur le processus et résultats	116
4.10.1.1. Défaillance sur les détecteurs	116
4.10. Conclusion.....	125
<i>Conclusions Générales et Perspectives</i>	126

Liste des figures

Figure 1.1 : Représentation générale d'un processus	5
Figure 1.2 : Nature mathématique des systèmes	6
Figure 1.3 : Représentation par schéma-blocs	9
Figure 1.4 : Graphe de fluence	9
Figure 1.5 : Etapes de déroulement de l'identification d'un processus	12
Figure 1.6 : Identification à partir du comportement E/S	13
Figure 1.7 : Identification de type paramétrique	13
Figure 1.8 : Schéma électrique de la structure 1	17
Figure 1.9 : Schéma électrique de la structure 2	17
Figure 1.10 : Schéma électrique de la structure 3	17
Figure 1.11 : Schéma électrique de la structure 4	18
Figure 1.12 : Ecart entre les sorties du processus et de son modèle	18
Figure 1.13 : Erreur sur les entrées du processus et de son modèle	19
Figure 1.14 : Erreur généralisée	19
Figure 1.15 : Schéma bloc de la structure de KALMAN	24
Figure 1.16 : Diagramme bloc de simulation commandable	25
Figure 1.17 : Diagramme bloc de simulation observable	25
Figure 1.18 : Diagramme bloc de simulation modale	26
Figure 1.19 : Filtre linéaire	27
Figure 1.20 : Système linéaire multivariable m entrées et r sorties	28
Figure 2.1 : Colonne de distillation	34
Figure 2.2 : Contact liquide vapeur	35
Figure 2.3 : Type de plateaux d'après l'écoulement des phases	36
Figure 2.4 : Condensation totale	38
Figure 2.5 : Condensation partielle	38
Figure 2.6 : Schéma simplifié d'un séparateur Flash	39
Figure 2.7 : Schéma d'une colonne de distillation continue	41
Figure 2.8 : Schéma d'une colonne de distillation discontinue	42
Figure 2.9 : Débit molaire dans la colonne	43
Figure 3.1 : Situation du modèle bond graph	47
Figure 3.2 : Construction générale d'un Bond-graph	48
Figure 3.3 : Représentation générale d'un bond	48

Figure 3.4 : Tétraèdre de Paynter	50
Figure 3.5 : Carrousel de Thoma.....	50
Figure 3.6 : Elément R	50
Figure 3.7 : Elément C	51
Figure 3.8 : Elément I	52
Figure 3.9 : Représentation graphique des sources Se, Sf	53
Figure 3.10 : Représentation graphique des détecteurs De, Df	53
Figure 3.11 : Représentation de la jonction 0.....	54
Figure 3.12 : Représentation de la jonction 1.....	55
Figure 3.13 : Représentation de la jonction TF	55
Figure 3.14 : Représentation de la jonction GY	55
Figure 3.15 : Causalités en bond-graph et le schéma bloc	56
Figure 3.16 : Exemple de non unicité de la causalité entre les éléments $R1$ et $R2$, (a) ou (b)	57
Figure 3.17 : Causalité unique.....	57
Figure 3.18 : Représentations des bond-graphs	60
Figure 3.19 : Les étapes de modélisation par bond-graph.....	62
Figure 3.20 : Modélisation technologique.....	63
Figure 3.21 : Choix des variables de puissance pour le phénomène de conduction	65
Figure 3.22 : Modèle bond graph d'un accumulateur avec \dot{H} comme variable de flux.....	68
Figure 3.23 : Multiport R	69
Figure 3.24 : Accumulateur d'énergie comme multiport thermodynamique.....	69
Figure 3.25 : Représentation d'une source thermofluide	70
Figure 3.26 : Bond graph d'un système chimique avec une phase à masse variable	71
Figure 3.27 : Equilibre thermique, hydraulique et chimique entre deux cylindres contenant des substances différentes.....	73
Figure 3.28 : Communication de deux substances sous l'action de deux pistons à travers une membrane	74
Figure 3.29 : Modèle bond graph d'un procédé de transfert de masse à travers une membrane ..	74
Figure 3.30 : Modèle bond graph des phénomènes de transformation d'une réaction	75
Figure 3.31 : Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation	78
Figure 3.32 : Modèle en pseudo-bond-graph simplifié du procédé de condensation	78
Figure 3.33 : Schéma de principe.....	79
Figure 3.34 : Bond-graph à mots du condenseur	80
Figure 3.35 : Modèle bond graph du condenseur d'une colonne de distillation	81
Figure 3.36 : Variation de la température à l'entrée du condenseur	83

Figure 3.37 : Variation de la température au sein du Condenseur	83
Figure 3.38 : Variation de température du vapeur à la sortie du condenseur.....	83
Figure 3.39 : Variation de la température d'eau à l'entrée du condenseur	84
Figure 3.40 : Variation de la température de l'eau au sein du condenseur	84
Figure 3.41 : Variation de la température de l'eau à la sortie	84
Figure 3.42 : Température de distillât en fonction du débit massique de la vapeur.....	85
Figure 3.43 : Température de distillât en fonction du débit massique de l'eau de refroidissement	85
Figure 3.44 : Variation de température du modèle paramétrique	86
Figure 3.45 : Variation de température de la vapeur et de l'eau	87
Figure 3.46 : Variation de température de la phase vapeur et de phase liquide (eau)	87
Figure 4.1 : Modules d'une procédure de surveillance	91
Figure 4.2 : Etape du diagnostic à base du modèle analytique	96
Figure 4.3 : Forme de calcul et d'évaluation des résidus	97
Figure 4.4 : Méthodes utilisées en diagnostic à base de modèles analytiques	98
Figure 4.5 : Approche de l'espace de parité dans un format entrée-sortie	99
Figure 4.6 : Schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidu.....	100
Figure 4.7 : Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts	101
Figure 4.8 : Représentation vectorielle d'un modèle bond graph	105
Figure 4.9 : Modèle bond graph d'un condenseur	110
Figure 4.10 : Sensibilité du $RA1$ et $RA2$ à la défaillance du capteur Df_1	117
Figure 4.11 : Défaillance dans le résidu $RA3$ et fonctionnement normal du résidu $RA4$	117
Figure 4.12 : Fonctionnement normal du résidu $RA5$ et $RA6$	118
Figure 4.13 : Défaillance dans le résidu $RA1$ et fonctionnement normal du résidu $RA2$ du capteur Df_3	118
Figure 4.14 : Défaillance dans le résidu $RA3$ et fonctionnement normal du résidu $RA4$	119
Figure 4.15 : Défaillance dans le résidu $RA5$ et fonctionnement normal du résidu $RA6$	119
Figure 4.16 : Fonctionnement normal du résidu $RA1$ et $RA2$ du capteur Df_4	120
Figure 4.17 : Défaillance dans le résidu $RA3$ et fonctionnement normal du résidu $RA4$	120
Figure 4.18 : Défaillance dans le résidu $RA5$ et fonctionnement normal du résidu $RA6$	120
Figure 4.19 : Sensibilité du $RA1$ et $RA2$ à la défaillance du capteur De_3	121
Figure 4.20 : Fonctionnement normal du résidu $RA3$ et $RA4$	121
Figure 4.21 : Défaillance dans le résidu $RA3$ et fonctionnement normal du résidu $RA4$	122
Figure 4.22 : Fonctionnement normal du résidu $RA1$ et $RA2$ du capteur De_4	122
Figure 4.23 : Fonctionnement normal du résidu $RA3$ et défaillance dans le résidu $RA4$	123
Figure 4.24 : Fonctionnement normal du résidu $RA5$ et défaillance dans le résidu $RA6$	123
Figure 4.25 : Fonctionnement normal du résidu $RA1$ et $RA2$ du capteur De_6	124
Figure 4.26 : Fonctionnement normal du résidu $RA3$ et défaillance dans le résidu $RA4$	124
Figure 4.27 : Fonctionnement normal du résidu $RA5$ et défaillance dans le résidu $RA6$	124

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Signification des variables de puissance et d'énergie pour divers domaines physiques	49
Tableau 3.2 : Eléments du langage bond-graph	54
Tableau 3.3 : règles d'affectation de causalité	58
Tableau 3.4 : Variables de puissance en génie des procédés	56
Tableau 3.5 : Variables d'énergie en génie des procédés	56
Tableau 3.6 : caractéristiques	82
Tableau 3.7 : Les valeurs d'entrée/sortie de la température de Méthanol	86
Tableau 4.1 : Matrice de signature de défaillances	113
Tableau 4.2 : Matrice de signatures de défaillances	114
Tableau 4.3 : Matrice de signatures de défaillances	115
Tableau 4.4 : Matrice des Matrice de ignatures de défaillances	116
Tableau 4.5 : Résultats de placement des capteurs	116

Introduction Générale

La modélisation est une étape nécessaire à l'analyse, la synthèse, la surveillance et le contrôle des processus industriels. La modélisation des systèmes en génie des procédés reste encore un domaine ouvert à cause de leur complexité. Le génie des procédés se base sur les principes fondamentaux de la conservation de la matière, de l'énergie et de la quantité de mouvement, ainsi que leur couplage pour la représentation des transferts de chaleur et de matière. Le Bond Graph par sa caractéristique pluridisciplinaire répond à ce besoin d'être un outil commun entre les différents domaines (processus thermiques, les thermofluides et les processus de changement de phase). Lorsque les phénomènes de transfert de chaleur et de changement de température sont pris en compte, la modélisation s'implique dans une démarche d'analyse de processus pour obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur son comportement et ses performances, ceci en toute abstraction du système réel. Cette technique prend différentes formes telle que la modélisation physique, modélisation mathématique ou modélisation graphique. La complexité des systèmes modernes a orienté la recherche vers l'utilisation des méthodes les mieux adaptées afin d'obtenir le modèle le plus proche du système réel. La modélisation par l'outil Bond-Graph répond particulièrement bien à ce sujet par les caractéristiques suivantes :

- Une approche énergétique qui permet une décomposition du système étudié en sous-systèmes qui échangent de la puissance, et qui structurent la procédure de modélisation.
- Une terminologie unifiée pour tous les domaines physiques, fondée sur la notion d'analogie entre phénomènes.
- Une représentation graphique pour visualiser les transferts de puissance, mais aussi pour fixer la causalité (*cause à effets*).
- Une souplesse inhérente qui permet de faire évoluer le modèle en ajoutant des phénomènes précédemment négligés (*éléments Bond-Graph*).
- Une écriture systématique des équations mathématiques issues du modèle Bond-Graph, sous forme d'équations différentielles.
- Un support pour une analyse structurelle des propriétés du modèle.

Ce travail comporte en la modélisation d'un système de changement de phases. Il s'inscrit dans un modèle bond graph utilisé pour décrire le système considéré. Les travaux de recherche sur la surveillance ont mobilisé, ces dernières années, une large communauté de chercheurs dans des domaines différents. Les premiers travaux sur la surveillance proviennent des recherches dans le domaine médical par une application de systèmes experts en intelligence artificielle.

La surveillance des systèmes “à structure rigide” (mécanique, électrique) a connu d’énormes progrès dans les vingt dernières années. Par contre, la surveillance et le contrôle des systèmes thermodynamiques restent des domaines ouverts du fait de la difficulté de modélisation de ces systèmes fortement non linéaires, et l’impossibilité de mesurer directement un grand nombre de variables bien que ces types de processus soient présents dans de très nombreuses industries à risque (nucléaires, chimiques...).

Le travail développé ici concerne deux volets de modélisation de la colonne à distiller. La première est semi-physique et elle concerne la modélisation par bond graph de la colonne, par contre la seconde concerne la recherche d’un modèle mathématique par la technique d’identification paramétrique de cette même colonne.

Une comparaison entre les deux modèles a été prise en compte afin de faire ressortir la différence physique entre les deux procédés de modélisation du système thermodynamique qui est la colonne à distiller.

Les systèmes thermodynamiques sont régis par l’interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de natures différentes et associent des composantes technologiques qui mettent en œuvre des lois issues de disciplines différentes (mécanique, thermique, chimique,...). C’est pour quoi leur modélisation en vue de leur surveillance nécessite une approche unifiée.

L’outil Bond-Graph, à vocation pluridisciplinaire apparaît le mieux adapté pour la connaissance des systèmes physiques est aussi un excellent support pour l’étude de la surveillance des modèles. Il permet par sa nature graphique à l’aide d’un langage unique, de mettre en évidence la nature des échanges de puissance dans le système, tels que les phénomènes de stockage, de transformation et de dissipation d’énergie. Outre son utilisation pour l’analyse structurelle et la simulation, la modélisation par Bond Graph apporte à la surveillance un outil permettant sur la seule analyse de sa structure graphique et causale de mettre en évidence ses propriétés de surveillabilité. La mise en œuvre sur Symboles 2000 du système de surveillance permet de détecter les principales pannes définies dans le cahier des charges. Les essais ont montré la précision du modèle et l’efficacité du système de surveillance.

Ce travail rentre dans la catégorie de la conception d’un système de surveillance pour un processus en génie des procédés par Bond Graph. A travers ce travail, notre objectif principal est de proposer une méthode graphique permettant une compréhension des différents phénomènes physiques concernés pour modéliser et simuler un condenseur d’une

colonne de distillation par l'outil Bond-Graph avec une comparaison par un modèle paramétrique d'une part et la surveillance qui se produisent ce condenseur d'autre part. La première étude a été effectuée par deux méthodes : modélisation par bond graph et identification paramétrique sous l'environnement MATLAB, les paramètres de cette méthode sont obtenus par une expérience élaboré dans le laboratoire de chimie de l'université de Constantine, les résultats obtenus sont comparés.

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire sera structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre passera en revue les notions sur la modélisation et l'identification. On présente un rappel historique sur les différents systèmes peuvent être modélisés, les niveaux de la modélisation, les divers modèles utilisés et d'identification paramétrique. On présente l'objet des méthodes paramétriques consistant à identifier les paramètres de modèle de structures variées (*fonction de transfert, équations différentielles ou d'état*).

Le deuxième chapitre, sera consacré à la description de la colonne de distillation, son principe de fonctionnement et les différents types en insistant sur les colonnes et l'écoulement du liquide et de la vapeur autour de ces derniers.

Le troisième chapitre, sera consacré à une généralité sur l'outil bond-graphs et la modélisation par bond-graph d'une colonne de distillation, et sa simulation à l'aide du logiciel SYMBOLS, dans ce dernier point nous avons simulé les trois phénomènes (*chimique, thermique, hydraulique*) caractérisant un condenseur.

Le quatrième chapitre, sera destiné à l'utilisation des outils Bond Graph dans la surveillance d'un condenseur d'une colonne de distillation. Nous illustrons la description des processus et la représentation de la méthodologie de placement de capteurs sur le modèle Bond Graph pour montrer comment surveiller un condenseur d'une colonne, avec un minimum des capteurs par génération de relations de redondance analytique ainsi que leurs propriétés de détection et de localisation des défaillances à l'aide du logiciel SYMBOLS.

Enfin, on termine par une conclusion, mettant en exergue l'importance et l'intérêt de la modélisation et la surveillance par bond graph.

NOTION SUR LA MODELISATION ET L'IDENTIFICATION

1

Table des matières

1.1. Introduction	4
1.1.1. Définition de la modélisation	4
1.1.2. L'importance de la modélisation	4
1.2. Modèle de processus	5
1.2.1. Notion de processus	5
1.2.2. Nature mathématique des systèmes.....	6
1.2.3. Notion de modèle	7
1.2.3.1. Modèle de connaissance	7
1.2.3.2. Modèles de représentation	7
1.2.3.2.1. Modèles de règles	7
1.2.3.2.2. Modèles de fichiers	8
1.2.3.2.3. Modèles entrées-sorties	8
1.2.3.2.4. Modèles d'état	8
1.2.3.2.5. Modèles graphiques	8
1.2.4. Choix du modèle d'un processus	9
1.2.4.1. Modèle à temps continu	10
1.2.4.2. Modèle à temps discontinu ou discret	10
1.2.4.3. Modèle linéaire	10
1.2.4.4. Modèle non linéaire	11
1.2.5. Etapes de la modélisation	11
1.3. Identification	11
1.3.1. Principes de l'identification	11
1.3.2. Identification des processus	12
1.3.2.1. Choix de la méthode de recherche du modèle	13
1.3.2.2. Bases d'identification des systèmes	14
1.3.2.2.1. Acquisition des E/S sous un protocole d'expérimentation	14
1.3.2.2.2. Choix ou estimation de la complexité du modèle	14
1.3.2.2.3. Estimation des paramètres du modèle	14

1.3.2.2.4. Validation du modèle	14
1.3.3. Algorithme des moindres carrés récursifs	14
1.3.3.1. Principe des MCR	14
1.3.3.2. Les avantages des algorithmes récursifs	15
1.3.4. Choix de la séquence d'entrée pour l'identification	15
1.3.5. Représentation des Sortie/Entrée du modèle	16
1.3.5.1. Représentation des systèmes dynamiques linéaires	16
1.3.5.2. Représentation du modèle pour des systèmes dynamiques.....	16
1.3.5.3. Structures de modèles (des sorties-entrées)	16
1.3.5.3.1. Structure 1	17
1.3.5.3.2. Structure 2	17
1.3.5.3.3. Structure 3	17
1.3.5.3.4. Structure 4	18
1.3.6. Choix du critère d'équivalence	18
1.3.6.1. Distance entre les sorties du système et de son modèle: Erreur sur la sortie	18
1.3.6.2. Distance entre les entrées du système et de son modèle : Erreur sur l'entrée.....	18
1.3.6.3. Erreur généralisée	19
1.3.7. Critères et choix de l'ordre du modèle	19
1.4. Représentation d'état des systèmes	20
1.4.1. Introduction	20
1.4.2. Notion de système	21
1.4.3. Signification pratique de la notion d'état	21
1.4.4. Représentation d'un système	22
1.4.4.1. Représentation externe	22
1.4.4.2. Représentation interne	22
1.4.5. Connaissance d'un système	23
1.4.5.1. Commandabilité	23
1.4.5.2. Observabilité	23
1.4.5.3. Structure de KALMAN	23
1.4.6. Forme de représentation de base	24
1.4.6.1. Forme compagne commandable	24
1.4.6.2. Forme compagne observable	25
1.4.6.3. Forme modale	25
1.4.7. Pluralité des représentations d'état	26
1.5. Processus linéaires stationnaires	27
1.5.1. Processus continus linéaires stationnaires	27
1.5.1.1. Notion de fonction et matrice de transfert	27
1.5.2. Processus discret linéaires stationnaires	30
1.6. Conclusion	31

1.1. Introduction

Le problème primordial d'un technologue, automaticien ou tout autre spécialiste, en présence d'un processus à commander ou d'un système économique à gérer est d'obtenir une description précise et convenable ainsi que des prévisions conformes à l'observation réelle.

L'ensemble des équations mathématiques décrivant ces systèmes permet de prédire leur comportement futur. Cet ensemble est appelé modèle mathématique. La représentation mathématique est un résultat de la modélisation [11]. Nous allons décrire dans ce premier chapitre les modèles de processus qui présentent les grandes classes de modélisation utilisées en automatique, leurs différents modèles et les interactions entre les différentes représentations.

1.1.1. Définition de la modélisation

En termes simples, la modélisation est une procédure qui permet, à partir de faits expérimentaux et/ou des lois fondamentales, de construire un modèle. La conception du modèle d'un système est une représentation du système réel ou imaginaire dans le but d'analyser, de prédire son comportement dans différentes situations et de déterminer les lois de commande ou de diagnostic qui permettent de définir l'état de passage du système, d'un point de fonctionnement à un autre ou d'un comportement à un autre. Si pour la construction du modèle du système, il y a un autre système physique, sur lequel il est possible d'effectuer des expériences de façon économique, alors un tel moyen d'étude des systèmes réels est appelé modélisation physique. Par modèle mathématique, il faut entendre une formule, une équation ou un système d'équations, avec une éventuelle approximation suffisante pour décrire un phénomène ou pour condenser l'information fournie par un ensemble de données.

La modélisation consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans des systèmes technologiques par une représentation mathématique. Cette discipline se situe au cœur du métier de l'ingénierie des procédés. Vouloir substituer la complexité physique par plusieurs équations mathématiques n'est pas une opération sans risque tant que les deux domaines sont distincts.

1.1.2. L'importance de la modélisation

Il est inutile d'insister sur l'importance de la modélisation tant la science a eu toujours pour objectif principal l'obtention de modèles. En effet, afin d'automatiser, de simuler un processus quelconque ou tout simplement de prévoir l'évolution de ce processus, nous devons d'abord décrire les phénomènes (*chimique, physique, économique, etc...*) par un modèle convenable, c'est à dire trouver un système d'équations (algébriques ou différentielles) dont la résolution fournit des résultats les plus proches possible du système réel. Il est intéressant de noter que la modélisation exige dans les projets de l'automatisation d'une unité de 50 à 80 % du

temps nécessaire à l'étude. Les vieilles techniques de la régulation classique restent encore très utilisées dans les industries complexes [16].

1.2. Modèle de processus

1.2.1. Notion de processus

L'objectif de ce chapitre est les notions de base de la modélisation et l'identification des processus. Un *processus* est un *système dynamique*, c'est-à-dire un système évolutif pour lequel le temps joue un rôle fondamental. Dans le cas général (figure 1.1), un processus est un système traversé par des flux d'information, d'énergie et de matière tout en étant soumis à des perturbations ayant l'une des trois formes précitées.

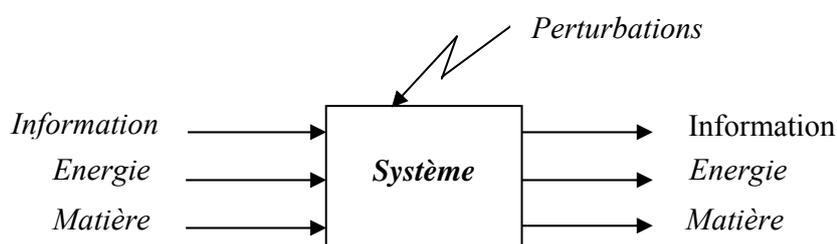


Figure 1.1 : Représentation générale d'un processus.

Il y a diverses variables pouvant être mises en évidence sur un système :

- Des *entrées de commande*, qui permettent d'agir sur l'évolution du processus ;
- Des *entrées de perturbation*, en général non contrôlable par l'utilisateur et qui agissent également sur le processus ;
- Des *sorties*, variables mesurables ou au moins détectables, qui caractérisent l'action du processus sur son environnement ;
- Des *variables d'états*, qui sont des variables internes du système, dont l'action sur l'environnement n'est pas nécessairement directement perceptible mais dont l'évolution régit celle du processus.

L'étude, la commande et la surveillance d'un processus s'effectuent à partir d'un *modèle* de processus. Il existe plusieurs types de modèles, principalement les *modèles de connaissance* d'une part, et les *modèles de représentation* ou de *conduite* d'autre part. On peut remarquer que le modélisateur est, en fait, une partie intégrante du modèle avec qui il se trouve en interaction étroite [4] :

- La nature du modèle dépend des objectifs de son concepteur ;
- Le modèle adopté modifie la perception et la compréhension que le modélisateur a du processus.

La modélisation, étape préliminaire de l'analyse d'un système quelconque, indépendamment de sa nature physique, de sa composition et de son degré de complexité comporte donc les étapes suivantes :

- Identification des variables pertinentes pour la caractérisation de chaque élément constituant le système ;
- Caractérisation des relations entre ces variables ;
- Représentation mathématique des interactions entre les éléments à travers la représentation mathématique des interactions entre les variables ;
- Etablissement d'un système de relations entre les variables caractérisant le système comme un tout ;
- Etablissement d'un système de relations entre les variables d'entrée et les variables de sortie.

1.2.2. Nature mathématique des systèmes

Jusqu'ici, aucune précision n'a été donnée sur le type de modèle mathématique utilisé dans le processus de modélisation. La modélisation dépend ainsi de la nature physique du système mais aussi des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire. Les systèmes dynamiques ont des comportements qui peuvent être décrits par des équations différentielles, dans le cas de modèles en temps continu, ou par des équations récurrentes dans le cas de modèles en temps discret. Ces équations peuvent être ordinaires dans le cas de systèmes à paramètres localisés dans l'espace ou à dérivées partielles pour les systèmes à paramètres repartis. La figure 1.2 donne un aperçu sommaire d'une classification des modèles mathématiques associés à différents types de systèmes [3].

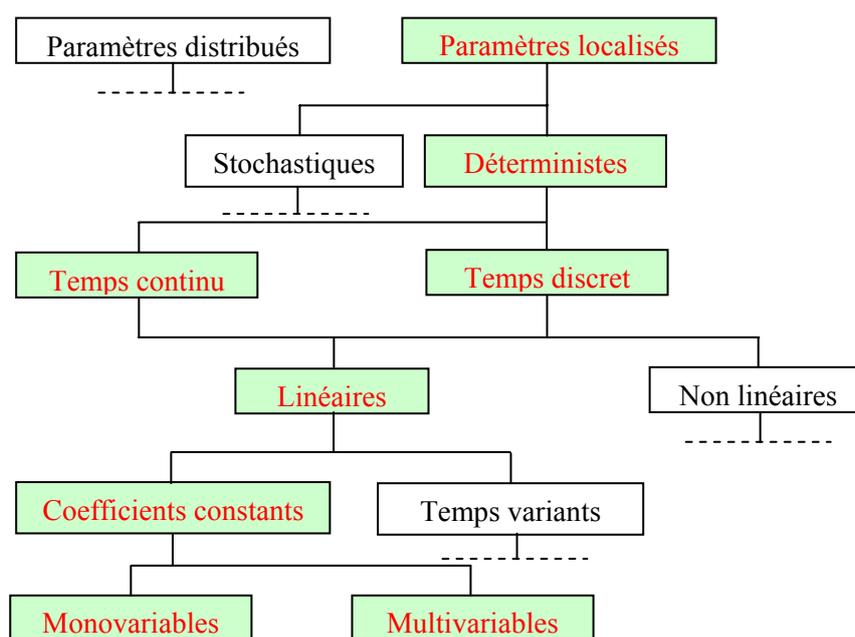


Figure 1.2 : Nature mathématique des systèmes

1.2.3. Notion de modèle

Un *modèle* est une représentation abstraite et simplifiée, d'une entité (phénomène, processus, système, etc.) du monde réel en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. *Modèle* est théoriquement synonyme de reproduction, mais avec une connotation pratique : un modèle, est une approximation du comportement du système qu'on veut reproduire.

Pratiquement, un modèle permet de simplifier la complexité d'un phénomène en éliminant les détails qui n'influencent pas son comportement de manière significative. Il reflète ce que le concepteur croit important pour la compréhension et la prédiction du phénomène modélisé. Les limites du phénomène modélisé dépendent des objectifs du modèle.

La modélisation d'un phénomène peut s'effectuer selon des degrés de connaissance divers. Il est souhaitable que ce degré de connaissance soit le plus élevé possible, mais la complexité de la réalité physique permet au mieux d'obtenir un modèle approximatif.

1.2.3.1. Modèle de connaissance

Un modèle de connaissance est un modèle dont les caractéristiques et les équations ont été établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique, de la chimie, de la biologie, de l'économie, ... Donc ce type de modèle est très riche du point de vue informationnel. Les paramètres d'un tel modèle ont alors une interprétation physique directe (*température, pression, courant, accélération, force...*). Ils sont en général difficiles à déterminer et sont de mise en œuvre complexe. Ils sont obtenus à partir des lois de la physique et apportent une connaissance complète sur les variables internes du système.

1.2.3.2. Modèles de représentation

Ces modèles n'ont aucun pouvoir explicatif de la structure physique des phénomènes étudiés. Leur structure n'est qu'une relation mathématique qui va relier localement les mesures des différentes variables du processus. Les paramètres de tels modèles peuvent n'avoir aucun sens physique particulier connu. Un modèle de représentation peut se représenter sous l'un des types suivants :

1.2.3.2.1. Modèles de règles

Ce type de modèle correspond à une description par règles de conduite :

‘‘ Si *condition* alors *action* ‘‘

Ces règles sont issues de l'observation du système en fonctionnement. Ce genre de modèles se prête assez bien à une exploitation mettant en œuvre les techniques décisionnelles de l'intelligence artificielle et de la logique floue.

1.2.3.2.2. Modèles de fichiers

Ils sont constitués d'informations, sous forme de tableaux de données, reliant l'évolution des sorties du processus à l'évolution des entrées pour diverses classes d'entrées.

Ces modèles constituent le plus souvent le point de départ en vue de l'élaboration de modèles plus évolués. C'est le niveau "*Système Source*".

1.2.3.2.3. Modèles entrées-sorties

Pour ce type de modèles, les entrées-sorties du processus sont liées par un ensemble de relations mathématiques. C'est le niveau "*Système Générateur*". L'ensemble de relations en question peut être composé :

- De relations algébriques;
- D'équations différentielles;
- De relations récurrentes.

A ces relations de type "*Egalité*", peuvent s'ajouter des relations de type "*Inégalité*" ou "*Inclusion*" pour tenir compte des contraintes et d'éventuelles saturations. Dans le cas des processus linéaires stationnaires continus, les relations "entrées-sorties" peuvent être définies par des "*Matrices de Transfert*". Généralement, le modèle "*entrées-sorties*" est appelé représentation ou modèle "*Boîte Noire*".

1.2.3.2.4. Modèles d'état

Un modèle d'état est caractérisé par un ensemble de variables regroupées dans le vecteur d'état, dont la connaissance à l'instant $t_0 \in \mathfrak{R}$, associée à la connaissance de l'évolution des entrées $u \in \mathfrak{R}$ permet, à partir du modèle, de prévoir l'évolution de $x(t)$. Donc le choix de modèle dépend de l'utilisation prévue pour celui-ci, compte tenu de la précision et la limite de complexité admissible. On utilisera donc les "*modèles linéaires à temps discontinu*" [5], [17].

Leur représentation est donnée par :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + VF_K \\ Y_K = Cx_k + Du_k + WF_k \end{cases} \quad \dots 1.1$$

1.2.3.2.5. Modèles graphiques

Les modèles graphiques constituent un mode de représentation qui est, en général, très facile à manipuler et possédant des propriétés remarquables susceptibles d'aider à la modélisation et parfois de permettre de la valider. Les principaux types de modèles graphiques sont :

- **Les schémas fonctionnels** : Ce mode de description appelé également représentation par schéma-blocs, correspond à une description directe des divers éléments du processus étudié, (figure 1.3), faisant ou non intervenir les diverses relations mathématiques mises en œuvre.

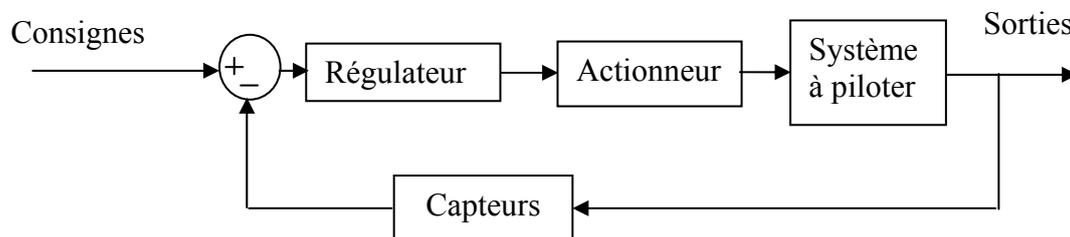


Figure 1.3 : Représentation par schéma-blocs

- **Les graphes de fluence** : Ils correspondent à une représentation proche de celle des schémas fonctionnels (figure 1.4). L'intérêt des graphes de fluence apparaît principalement au niveau de la modélisation des systèmes linéaires, c'est à dire pour lesquels, il est possible d'appliquer le théorème de superposition.

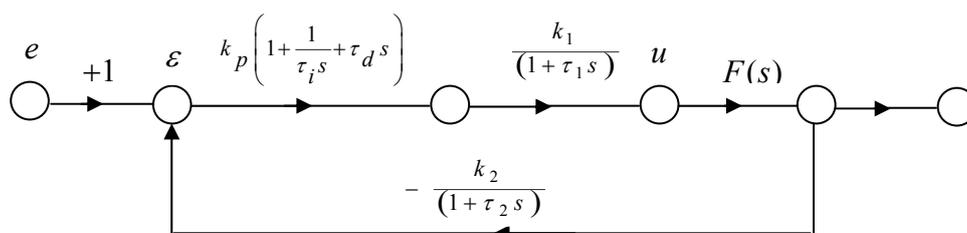


Figure 1.4 : Graphe de fluence

- **Les réseaux de Petri et le Grafcet** : Ces représentations sont particulièrement adaptées aux processus à événements discrets dont le nombre d'états est fini. Très importants, principalement dans la caractérisation des systèmes logiques, des systèmes de fabrication automatisée et des ateliers flexibles, ces modes de représentation sont développés dans un volume spécifique de cette collection.

- **Les bond-graphs** : Ils permettent une description des systèmes physiques très bien adaptée à la modélisation des transferts de puissance, avec un langage unique quelque soit le domaine physique concerné.

1.2.4. Choix du modèle d'un processus

Le choix du modèle a donc une influence capitale sur les solutions obtenues. Les systèmes non-communs sont mieux modélisés par un ensemble de modèles indépendants. Selon les modèles employés, la démarche de modélisation n'est pas la même. Donc la modélisation est une procédure qui permet, à partir de faits expérimentaux et (ou des lois fondamentales), de construire un modèle. La conception d'un modèle d'un système est une représentation du

système réel ou imaginaire. La détermination d'un modèle mathématique d'un processus nécessite en général diverses hypothèses simplificatrices afin de limiter sa complexité. Dans chaque application, il apparaît nécessaire de faire un compromis entre la finesse et la précision du modèle à mettre en œuvre d'une part, et la limite de complexité admissible, compte tenu des objectifs fixés, d'autre part [11]. On voit que les modèles utilisés dans les divers cas envisagés peuvent être très différents :

1.2.4.1. Modèle à temps continu

Dans ce type de modèles, le temps est une variable qui évolue continûment sur un intervalle $\tau = [t_0, t_0 + T_e] \subset \mathfrak{R}$ prenant en croissant toutes les valeurs situées dans cette intervalle avec $x \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^l$, $t \in \tau$, $v \in \mathfrak{R}^{n_v}$. On a le modèle d'état de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t, v) \\ y = h(x, u, t, v) \end{cases} \quad \dots 1.2$$

Avec

$$f: \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^l \times \tau \times \mathfrak{R}^{n_v} \rightarrow \mathfrak{R}^n$$

$$h: \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^l \times \tau \times \mathfrak{R}^{n_v} \rightarrow \mathfrak{R}^m$$

1.2.4.2. Modèle à temps discontinu ou discret

Ce type de modèle est utilisé soit lorsque le processus étudié a naturellement un mode d'évolution séquentiel, soit lorsqu'on a adopté une représentation du processus qui correspond à une observation des variables d'état ou de sortie à des instants discrets t_k du temps avec $k \in Z$. On a dans ce cas une représentation dite échantillonnée, particulièrement bien adaptée aux divers types de calculs à effectuer dans les problèmes de commande de processus par ordinateur numérique : $x_k = x(t_k)$. Il vient une description de la forme :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k, k, v_k) \\ y_k = h(x_k, u_k, k, v_k) \end{cases} \quad \dots 1.3$$

1.2.4.3. Modèle linéaire

Un tel modèle caractérise un processus susceptible d'être décrit par une équation différentielle ordinaire ou une équation récurrente à coefficients constants (*stationnaires*) ou une fonction du temps (*non stationnaires*) ou par un ensemble d'équations de ce type. La propriété fondamentale des systèmes linéaires s'exprime par le principe de superposition : si $y_1(t)$ et $y_2(t)$ représentent respectivement l'évolution des sorties du processus pour les entrées $u_1(t)$ et $u_2(t)$ sur un horizon et pour un état initial donné :

$$\begin{cases} u(t) = \alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t) \\ y(t) = \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t) \end{cases} \dots 1.4$$

Les systèmes linéaires stationnaires admettent une représentation entrée-sortie par fonction ou matrice de transfert, en S ou en Z selon qu'il s'agit d'un modèle continu ou discret.

1.2.4.4. Modèle non linéaire

Dans ce type de modèle, le théorème de superposition n'est plus valable. Ce qui nous obligera à utiliser une méthode de linéarisation : Méthode de séparation, Méthode du *Jacobien*...etc.

1.2.5. Etapes de la modélisation

La première étape du processus de modélisation consiste à faire une hypothèse sur la structure du système (modèle), c'est à dire à choisir un type de relation mathématique F liant entrées et sorties. Les paramètres structuraux, pour l'instant inconnu, seront déterminés numériquement dans l'étape suivante, dite d'identification. Dans ce choix de structure, on peut être guidé par :

- Une analyse physique conventionnelle du processus.
- L'expérience et le résultat qualitatif de tests simples.
- Des contraintes de calcul ou des contraintes économiques, qui amènent à rechercher une structure.

Cette étape, essentiellement qualitative, n'est éclairée et validée que par le reste de la procédure. C'est souvent la plus difficile, elle fait appel à l'expérience et relève autant du métier que de la méthodologie [11].

1.3. Identification

1.3.1. Principes de l'identification

Identifier un système c'est déterminer les paramètres d'un modèle mathématique appartenant à une classe de modèles donnée et qui, soumis aux mêmes sollicitations que le système initial, génère la même réponse que celui-ci. L'identification a le plus souvent pour objectif la détermination de modèle de conduite, utilisable pour simuler, commander, réguler ou surveiller un *processus*. Les méthodes présentées dans ce chapitre, seront essentiellement de type paramétrique, avec une structure connue [5].

Il s'agit donc de déduire d'une expérience, les valeurs numériques des paramètres du modèle candidat. Ce problème est généralement résolu à l'aide des trois ensembles suivants:

- *L'ensemble des données*: Cet ensemble doit être riche en données sur les entrées et les sorties afin de fournir le maximum d'information.
- *L'ensemble des modèles*: Le choix d'un modèle candidat peut se faire à partir des lois physiques régissant le processus dont les paramètres sont peu connus ou mal connus [*Boîtes grises*] ou bien à partir de l'expérience sans connaissances préalables [*Boîtes noires*].
- *L'ensemble des algorithmes d'identification*: Ces algorithmes permettent à partir de l'ensemble des données de déterminer les paramètres du modèle candidat.

Le choix d'un élément dans chacun de ces trois ensembles mène automatiquement à une opération d'identification d'un processus qui se déroule en trois étapes :

Etape 1: Liée au choix du modèle, elle consiste en l'estimation structurelle.

Etape 2: Liée à la structure du modèle, elle consiste en l'estimation paramétrique.

Etape 3: Elle consiste en la validation du modèle [1].

L'algorithme donné par la figure 1.5, englobe toutes les étapes dont on a besoin pour réaliser l'identification.

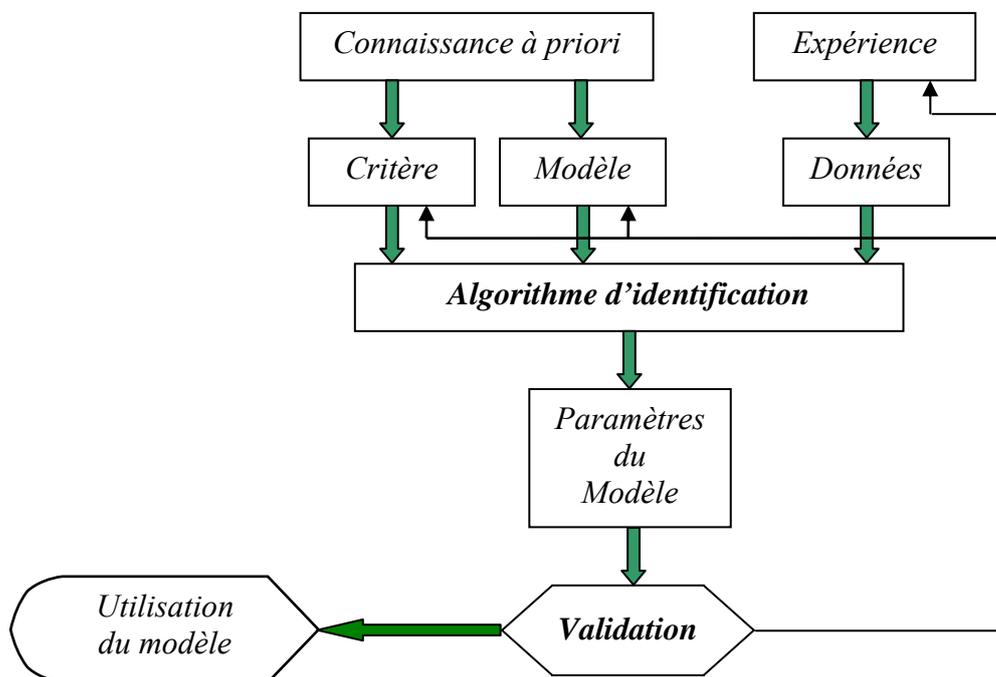


Figure 1.5 : Etapes de déroulement de l'identification d'un processus

1.3.2. Identification des processus

L'identification est une opération déterminant les caractéristiques d'un système dont la connaissance est nécessaire pour la conception et la mise en œuvre d'un système performant de régulation.

1.3.2.1. Choix de la méthode de recherche du modèle [5], [17]

On peut classer les méthodes de recherche de modèles en deux classes distinctes :

- Recherche de modèles en Boucle ouverte: Cette classe de recherche, où les paramètres sont obtenus en une seule fois, est donnée par le schéma de la figure 1.6.

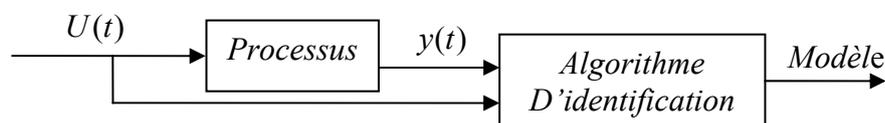


Figure 1.6 : Identification à partir du comportement E/S.

- Recherche de modèles en Boucle fermée: Pour ce genre de recherche, on utilise l'erreur entre le processus et le modèle pour améliorer le modèle afin qu'il soit le plus proche possible du processus. Ce qui nous contraignons à utiliser un système bouclé. La figure 1.7 illustre bien ce type de recherche.

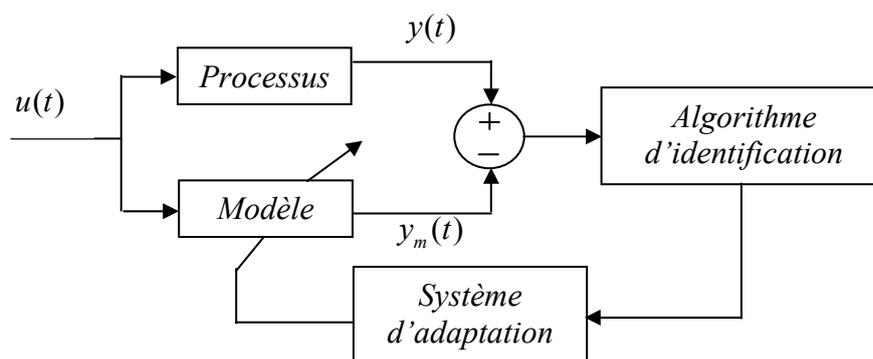


Figure 1.7 : Identification de type paramétrique.

L'identification est une technique expérimentale qui s'appuie sur l'utilisation de processus et d'algorithmes issus d'étude théorique. Plus souvent, les méthodes d'identification correspondent à l'un des schémas des figures 1.6 et 1.7 citées plus haut. Le principe de l'identification est toujours le même, à savoir que l'on construit l'erreur entre la sortie mesurée $y(t)$ à l'instant t et la sortie prédite par le modèle $\hat{y}(t)$ et l'on utilise cette erreur à chaque instant pour modifier les paramètres du modèle à travers un algorithme d'estimation paramétrique.

Remarques :

1. Pour la mise en œuvre expérimentale, il faut attendre que le système soit effectivement en régime permanent d'une part et d'autre part, appliquer des échelons aussi grands que possibles sans sortir du domaine de linéarité du processus. Pour déterminer ce domaine de linéarité, il suffit d'exciter le processus par des échelons de différentes amplitudes A et de tracer la caractéristique statique après établissement du régime permanent.

2. Dans certains cas, on peut être contraint, par des conditions de fonctionnement du processus, à ramener l'entrée à sa valeur initiale bien avant l'achèvement de la réponse indicielle. Dans cette situation, on cherchera à se rapprocher d'une excitation en impulsion en faisant diminuer la durée d'application τ du signal.

1.3.2.2. Bases d'identification des systèmes

Pour réussir une opération d'identification, il faut s'assurer que les étapes suivantes se sont bien déroulées [12]:

1.3.2.2.1. Acquisition des E/S sous un protocole d'expérimentation

Il s'agit de choisir un signal d'excitation avec une densité spectrale homogène couvrant l'ensemble de la bande passante du procédé à identifier.

1.3.2.2.2. Choix ou estimation de la complexité du modèle

Le problème typique rencontré dans le cas des modèles paramétriques est le choix de l'ordre de polynômes de la fonction de transfert pouvant caractériser le modèle ou la taille de la représentation d'état et les indices d'observabilité associés à chaque sortie (cas multivariable).

1.3.2.2.3. Estimation des paramètres du modèle

Une erreur d'estimation paramétrique (*biais*) peut être introduite par le bruit de mesure. Il faut donc, à chaque fois, faire une hypothèse sur la structure du bruit, choisir un algorithme d'estimation approprié et faire passer un test de validation au modèle obtenu.

On distingue deux types d'algorithmes d'estimation paramétrique qui sont :

- Algorithmes par paquets (*hors ligne*), qui traitent un ensemble de données E/S obtenues sur un horizon de temps suffisamment grand;
- Algorithmes récursifs (*en ligne*) qui traitent les paires de données E/S à chaque instant et produisent ainsi une estimation paramétrique au fur et à mesure de l'acquisition des données.

1.3.2.2.4. Validation du modèle

Les procédures de validation les plus courantes sont de type statique. L'objectif est de montrer que la sortie du modèle excité par le même signal que le procédé reproduit les variations de la sortie causées par les variations de la commande en s'affranchissant de l'effet du bruit de mesure.

1.3.3. Algorithme des moindres carrés récursifs [13]

1.3.3.1. Principe des MCR

C'est un algorithme à gain d'adaptation décroissant, il en fait, de moins en moins, de points aux nouvelles erreurs de prédiction, donc aux nouvelles mesures.

On suppose que la sortie du système est donnée par :

$$y(t) = \theta^{*t} \phi(t) \quad \dots 1.5$$

Où : θ^* le vecteur des paramètres à estimer et $\phi(t)$ le vecteur redresseur dont l'élément.

Ces deux vecteurs sont deux signaux connus (mesurables) à l'instant t . Soit $\hat{\theta}$ l'estimé de θ , il est possible de faire une prédiction \hat{y} du signal y comme suit :

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}' \phi(t) \quad \dots 1.6$$

Avec l'erreur de reproduction qui est donnée par:

$$e(t+1) = \phi^T(t) [\theta^*(t) - \hat{\theta}(t)] \quad \dots 1.7$$

La forme de l'algorithme d'adaptation paramétrique des MCR est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t)\phi(t)e(t+1) \\ F^{-1}(t+1) = F^{-1}(t) + \phi(t)\phi^T(t) \\ F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi^T(t)F(t)}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} \\ e(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\theta}^T(t)\phi(t)}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} \end{array} \right. \quad \dots 1.8$$

Où $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta^*$ est l'estimation paramétrique.

1.3.3.2. Les avantages des algorithmes récursifs [12]

- Une estimation en ligne du modèle peut être obtenue au fur et à mesure que le système évolue ;
- Utilisation d'une taille mémoire réduite ;
- Le modèle estimé en ligne contient toutes les informations contenues dans les données E/S passées ;
- Ils peuvent être aussi utilisés pour l'identification "hors ligne" ;
- Avec les modifications mineures des algorithmes, il devient possible de suivre les évolutions des systèmes lentement variables dans le temps ;
- Ils peuvent être utilisés dans des techniques de diagnostic.

1.3.4. Choix de la séquence d'entrée pour l'identification

L'application d'une entrée constante à un processus ne permet pas de distinguer plus d'un modèle, car ils auront le même gain statique. Donc pour mettre en évidence la différence entre les modèles, il faut appliquer un signal de p -sinusoïdes de fréquences distinctes [13] :

$$u(t) = \sum_{l=1}^p \sin \omega_l T_e t \quad \dots 1.9$$

$$y(t) = -\sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(t-d-i) \quad \dots 1.10$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} p \geq \frac{n+m}{2}, & \text{si } n+m = \text{pair} \\ p \leq \frac{n+m+1}{2}, & \text{si } n+m = \text{impair} \end{cases}$$

Ce choix n'est pas nécessaire, le système étant intégré dans son environnement et l'identification se fait en ligne.

1.3.5. Représentation des Sortie/Entrée du modèle

1.3.5.1. Représentation des systèmes dynamiques linéaires

Les méthodes de représentation des systèmes dynamiques discrets au moyen des équations différentielles ou équations aux différences, sont les plus utilisées, et ont le but de trouver une relation qui relie l'entrée du système à sa sortie.

1.3.5.2. Représentation du modèle pour des systèmes dynamiques linéaires

L'identification des systèmes dynamiques linéaires, dont la structure peut être inconnue, consiste à réaliser un ensemble d'équations linéaires représentant son comportement dynamique.

Le modèle d'équation a la forme suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^m b_j u(k-j) \quad \dots 1.11$$

1.3.5.3. Structures de modèles (des sorties-entrées)

On présente quatre structures permettant de représenter des systèmes physiques linéaires ayant une entrée (déterministe) $u(t)$, une entrée stochastique $e(t)$ et une sortie $y(t)$. Ces structures ont pour caractéristique remarquable de modéliser, avec une dynamique appropriée, l'influence du bruit/des perturbations agissant sur le système [1].

L'ensemble des effets des bruits et perturbations est représenté par le signal stochastique $e(t)$, de type bruit blanc, de distribution normale. On peut distinguer structures de modèles de représentation de "procédé + perturbation", en posant :

$$A(q^{-1}) = 1 + \sum_{k=1}^{n_A} a_k q^{-k} \quad \dots 1.12$$

$$B(q^{-1}) = 1 + \sum_{k=1}^{n_B} b_k q^{-k} \quad \dots 1.13$$

$$C(q^{-1}) = 1 + \sum_{k=1}^{n_C} c_k q^{-k} \quad \dots 1.14$$

1.3.5.3.1. Structure 1

Cette structure correspond à un modèle de la forme suivante avec son schéma électrique :

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad \dots 1.15$$

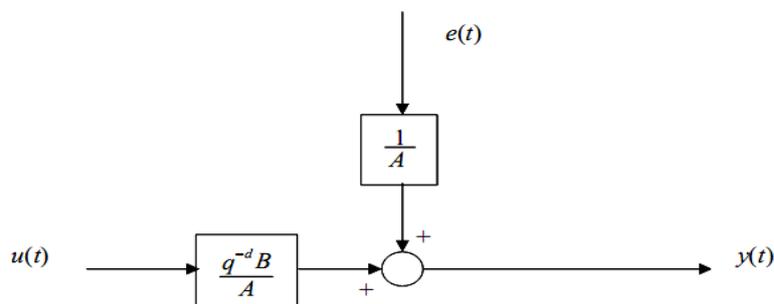


Figure 1.8 : Schéma électrique de la structure 1

1.3.5.3.2. Structure 2

Cette structure correspond à un modèle de la forme suivante avec son schéma électrique :

$$y(t) = \frac{q^{-d}B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(t) + W(t) \quad \dots 1.16$$

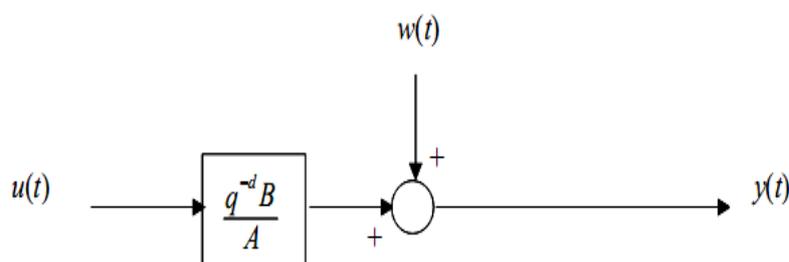


Figure 1.9 : Schéma électrique de la structure 2

1.3.5.3.3. Structure 3

Cette structure correspond à un modèle de la forme suivante avec son schéma électrique :

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad \dots 1.17$$

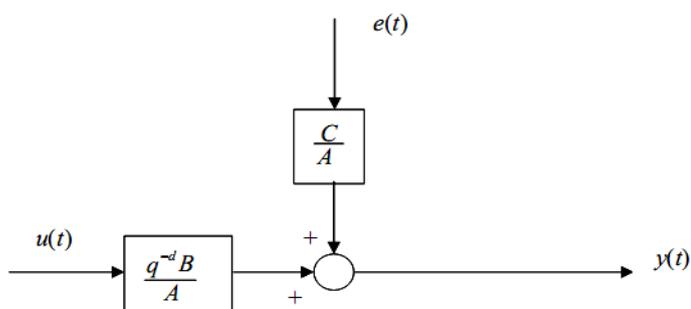


Figure 1.10 : Schéma électrique de la structure 3

1.3.5.3.4. Structure 4

Cette structure correspond à un modèle de la forme suivante avec son schéma électrique :

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + \frac{1}{C(q^{-1})}e(t) \quad \dots 1.18$$

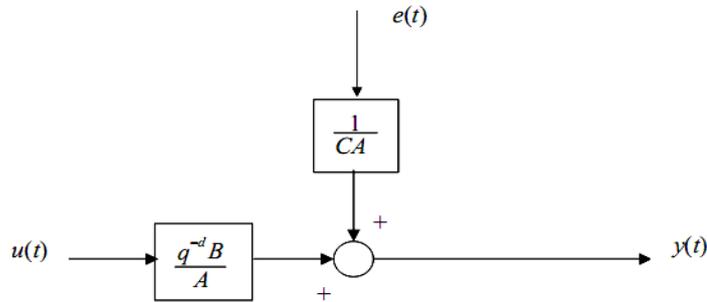


Figure 1.11 : Schéma électrique de la structure 4

1.3.6. Choix du critère d'équivalence

Il n'est tout le temps aisé d'explicitier mathématiquement le critère d'équivalence permettant de mesurer la distance entre un système et son modèle. Ainsi, dans une méthode pratique d'identification, le critère d'équivalence est basé sur l'écart des réponses indicielles, elles-mêmes caractérisées par des points particuliers et des tangentes ou asymptotes en ces points. Toutefois, dans de nombreuses méthodes d'identification, le critère d'équivalence est bien explicité: on est amené à minimiser une fonction de distance. Si l'on minimise une fonctionnelle de distance entre le système et son modèle, on peut définir trois cas possibles:

1.3.6.1. Distance entre les sorties du système et de son modèle: Erreur sur la sortie

Il s'agit du type d'erreur le plus naturel pour comparer à chaque instant un processus et son modèle. Ce type d'erreur est donné par la figure 1.12.

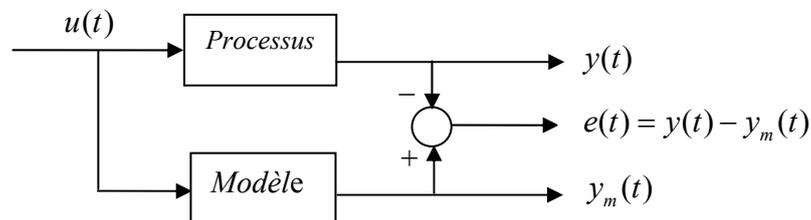


Figure 1.12 : Ecart entre les sorties du processus et de son modèle

1.3.6.2. Distance entre les entrées du système et de son modèle : Erreur sur l'entrée

Cette erreur est donnée par le schéma de la figure 1.13.

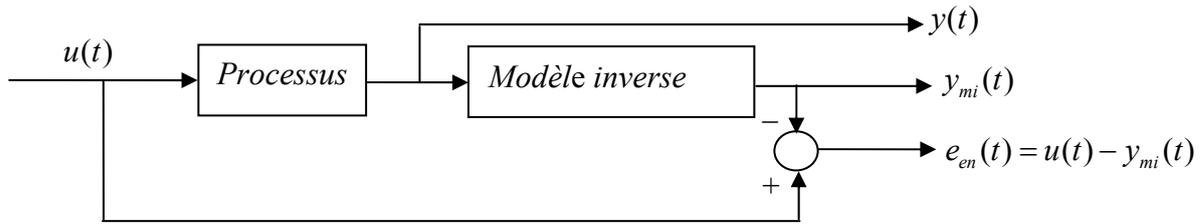


Figure 1.13 : Erreur sur les entrées du processus et de son modèle.

Par le schéma de cette figure, on définit le modèle inverse du système à identifier

1.3.6.3. Erreur généralisée

Ce type d'erreur est donné par le schéma synoptique de la figure 1.14 [1].

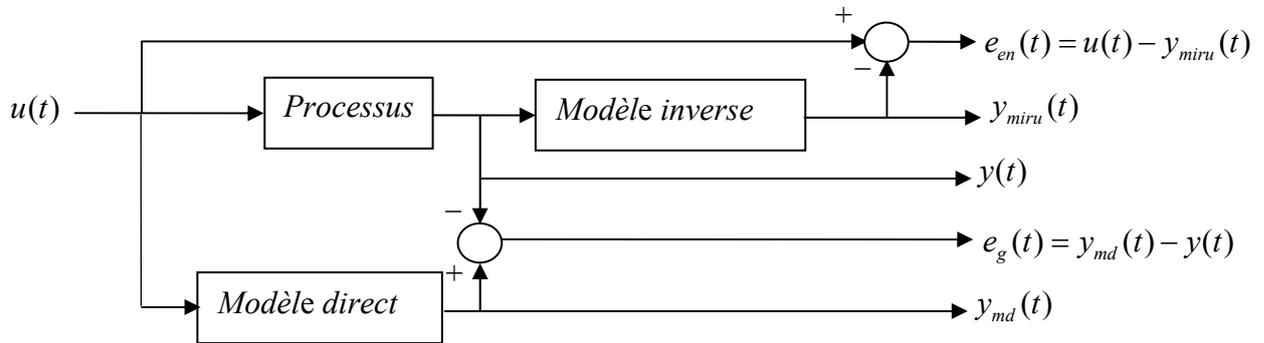


Figure 1.14 : Erreur généralisée.

On peut donner l'erreur ici sous la forme :

$$e_g(t) = \alpha e_{en}(t) + \beta e_s(t) \quad \dots 1.19$$

Les coefficients α et β sont des coefficients de mise en forme.

1.3.7. Critères et choix de l'ordre du modèle

La plupart des méthodes d'identification s'attèlent sur la recherche de la valeur des paramètres du modèle en minimisant une fonctionnelle d'erreur (*fonction coût ou critère*).

Cette recherche de minimum peut être la base de la méthode ou bien une vérification de la validation du modèle à posteriori. Soit N , le nombre de points de mesure, et $\varepsilon(k, \theta)$ l'écart entre la $k^{ième}$ mesure sur le système et la $k^{ième}$ mesure sur le modèle défini par le vecteur des paramètres θ . Une estimation optimale de ce vecteur est donnée par l'expression :

$$\hat{\theta}_N = \arg_{\theta} [\min V_N(\theta)] \quad \dots 1.20$$

Avec :

$$V_N(\theta) = \sum_{k=1}^N l(k, \varepsilon(k, \theta)) \quad \dots 1.21$$

Où $l(., .)$ est une fonction de cet écart.

En pratique, cette fonction est choisie sous forme quadratique. Soit:

$$\begin{cases} \varphi(k) > 0 \\ I(k, \varepsilon(k, \theta)) = \varphi(k) \cdot \varepsilon^2(k, \theta) \end{cases} \quad \dots 1.22$$

Lors du choix d'un modèle particulier, la question qui vient hanter pas une recette pour répondre à cette question car l'ordre du système ou celui du signal le représentant, n'a pas une existence réelle du point de vue philosophique. Toutefois, la recherche d'un ordre suffisant du modèle, permettra de traduire au mieux le comportement du système observé.

Seulement, cet ordre ne doit pas être trop grand pour éviter d'avoir un volume important de calcul. A cet effet, quelques critères ont été mis au point afin de permettre le choix d'un ordre optimal à posteriori.

Aikake [1969-1973] a proposé deux critères conduisant sensiblement aux mêmes résultats:

Soit d la dimension du vecteur θ des paramètres du modèle à déterminer et n l'ordre du modèle.

- ✓ Critère de l'erreur de prédiction finale [E.P.F]:

$$V_N^{E.P.F}(n) = V_N \left(\hat{\theta}_N^n \right)^{\frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}}} \quad \dots 1.23$$

- ✓ Critère d'Information d'Aikake [I.A]:

$$V_N^{A.I}(n) = \log V_N(\theta_N^n) + 2 \frac{d}{N} \quad \dots 1.24$$

Cette évolution permet de déterminer l'ordre optimal.

1.4. Représentation d'état des systèmes

1.4.1. Introduction

La représentation d'état d'un système permet de cerner au plus près le comportement de celui-ci. Elle est indispensable pour l'étude des systèmes multivariables. En monovariante, un avantage de la représentation d'état réside dans la possibilité d'une description plus complète (*interne*) des systèmes. Dans ces conditions on peut mettre en évidence l'amplitude de certaines variables internes, des oscillations internes, Cette description peut mettre en exergue la relation des variables interne et les variables externes, contrairement à la fonction de transfert qui ne s'intéresse qu'aux variables externes et qui ne rend pas compte du comportement du système. On se confronte, souvent, à des problèmes complexes qui, d'une part, sont liés à la nature des

systèmes considérés. D'autre part, les objectifs fixés sont de plus en plus ambitieux, faisant intervenir plusieurs paramètres et des fonctions assez complexes.

1.4.2. Notion de système

Un système est une combinaison de constituants et / ou d'une unité de commande permettant de former un ensemble cohérent destiné à une ou plusieurs tâches données.

Un système linéaire est un système qui satisfait le principe de superposition, c.-à-d. :

$$\text{Si } y_1(t) = f(u_1) \text{ et } y_2(t) = f(u_2) \text{ alors : } \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t) = f(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2)$$

Physiquement, un système linéaire est régi par des équations différentielles, à coefficients constants et d'ordre fini, tel que : [SLA]

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i}{dt^i} y(t) = \sum_{i=0}^m b_i \frac{d^i}{dt^i} u(t) \quad \dots 1.25$$

Dans le cas continu, et dans le cas discret il sera décrit par :

$$\sum_{i=0}^n a_i y(i-k) = \sum_{i=0}^m b_i u(i-k) \quad \dots 1.26$$

Un système linéaire est invariant (stationnaire) si les relations entre l'entrée $u(t)$ et la sortie $y(t)$ sont indépendantes du temps, il est variant dans le cas contraire [11]. On observe :

- Le système MIMO : multi-entrées, multi-sorties.
- Le système SIMO : mono-entrée, multi-sorties.
- Le système MISO : multi-entrées, mono-sortie.
- Le système SISO : mono-entrée, mono-sortie.

1.4.3. Signification pratique de la notion d'état

La représentation d'état constitue une étape intéressante pour la modélisation :

- La représentation d'état permet de mettre en évidence les informations internes du processus ;
- La représentation d'état n'est pas unique ;
- Le choix d'un vecteur de phase conduit à une représentation d'état sous forme compagne ;
- La représentation d'état peut faire intervenir un transfert direct entrée-sortie lorsque la fonction de transfert présente un numérateur et un dénominateur de même degré ;
- La représentation d'état met en évidence les problèmes liés à la simplification d'un pôle par un zéro de la fonction de transfert (non observabilité, non commandabilité).

1.4.4. Représentation d'un système

On distingue deux types de représentation :

1.4.4.1. Représentation externe

Cette représentation (dite aussi représentation *boîte noire*) utilise directement la relation entrée-sortie de deux manières connues :

- L'équation différentielle :

$$F(y, y', \dots, y^{(n)}, u, u', \dots, u^{(n)}) = 0 \quad \dots 1.27$$

- La fonction de transfert :

$$F(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \quad \dots 1.28$$

1.4.4.2. Représentation interne

Elle est appelée aussi '*Représentation d'état*', mettant en évidence l'évolution des états du système [4], [9], [10].

Ces modèles sont caractérisés par un ensemble de variables, en nombre minimum, regroupées dans un vecteur $x \in \mathfrak{R}^n$ appelé vecteur d'état. La connaissance de l'état à l'instant $t_0 \in \mathfrak{R}$ associé à la connaissance de l'évolution du vecteur entré $u \in \mathfrak{R}^r$ sur l'intervalle d'observation $[t_0, T]$ permet, à partir du modèle, de prévoir l'évolution de l'état à l'instant $t \in [t_0, T]$. Dans l'hypothèse déterministe (implique que l'entrée précède la sortie), il existe une fonction de transition d'état $\varphi(t, t_0, x(t_0), u[t_0, t])$ telle que :

$$x(t) = \varphi(t, t_0, x(t_0), u[t_0, t]) \quad 1.29$$

Avec le vecteur de sortie :

$$y(t) = \psi(t, t_0, x(t), u[t, t_0]) \quad \dots 1.30$$

Dans le cas du système linéaire, les équations 1.29 et 1.30 peuvent se mettre sous la forme [6]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad \dots 1.31$$

Avec : $x \in \mathfrak{R}^n$, $y \in \mathfrak{R}^m$, $u \in \mathfrak{R}^r$, $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B \in \mathfrak{R}^{n \times r}$ et $C \in \mathfrak{R}^{m \times n}$

Si le système est invariant, les matrices A , B , C et D ne dépendent plus de t . De manière identique, on peut décrire la représentation récurrente par:

$$\begin{cases} x_{k+1} = f[x_k, u_k, k] \\ y_k = g[x_k, u_k, k] \end{cases} \quad \dots 1.32$$

Qui donne dans le cas linéaire : [6]

$$\begin{cases} x_{k+1} = A x_k + B u_k \\ y_k = C x_k + D u_k \end{cases} \quad \dots 1.33$$

Remarque : contrairement à la représentation externe, la représentation d'état n'est pas unique.

Remarques 1 : L'intérêt de la notion d'état et de la représentation d'état qui en découle réside principalement dans le nombre minimal de variables indépendantes à considérer pour connaître le comportement interne du système.

Remarques 2 : La représentation d'état n'est pas unique. Cela signifie que pour un même système physique, le choix du vecteur d'état n'est pas unique puisqu'il dépend de la base dans laquelle il est exprimé.

1.4.5. Connaissance d'un système

Le choix des variables d'état s'effectue d'une façon à avoir une interprétation physique mettant en évidence les propriétés du système et assurant la commandation et l'observation [10], [14], [15].

1.4.5.1. Commandabilité

La commandabilité négocie la possibilité de commander l'état à partir de l'entrée. Elle est définie par l'expression suivante :

$$C = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad \dots 1.34$$

Un système linéaire d'écrit par l'équation (1.33) est commandable, s'il existe une commande $u(t)$ faisant le passage du vecteur d'état à partir d'un point initial à un point final en un temps fini.

1.4.5.2. Observabilité

L'observabilité étudie la possibilité d'estimer l'état à partir de la sortie. Elle est définie par l'expression suivante :

$$O = [C \quad CA \quad \dots \quad CA^{n-1}]^T \quad \dots 1.35$$

Un système linéaire d'écrit par l'équation (1.33) est observable si la connaissance de la sortie et l'entrée suffira pour déterminer l'état du système en un temps fini.

1.4.5.3. Structure de KALMAN

Tout système linéaire et stationnaire peut être représenté par la structure de Kalman donnée par la relation suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \tilde{x}'_{co} \\ \tilde{x}'_{c\bar{o}} \\ \tilde{x}'_{\bar{c}o} \\ \tilde{x}'_{\bar{c}\bar{o}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{co} & 0 & \tilde{A}_{13} & 0 \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{c\bar{o}} & \tilde{A}_{23} & \tilde{A}_{24} \\ 0 & 0 & \tilde{A}_{\bar{c}o} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{A}_{43} & \tilde{A}_{\bar{c}\bar{o}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{co} \\ \tilde{x}_{c\bar{o}} \\ \tilde{x}_{\bar{c}o} \\ \tilde{x}_{\bar{c}\bar{o}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_{co} \\ \tilde{B}_{c\bar{o}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ \tilde{y} = [\tilde{C}_{co} \quad 0 \quad \tilde{C}_{\bar{c}o} \quad 0] \tilde{x} + D u \end{cases} \quad \dots 1.36$$

Cette structure met en évidence les parties commandables et les parties observables. Elle peut être schématisée par la figure 1.15.

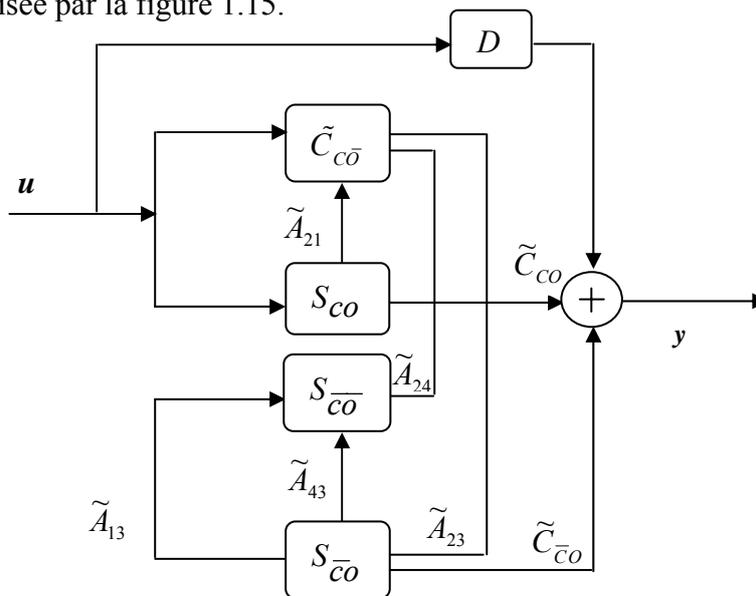


Figure 1.15 : Schéma bloc de la structure de KALMAN.

1.4.6. Forme de représentation de base

Un des objectifs des méthodes de représentation d'état est de systématiser l'obtention des formes compagnes dites aussi canonique [4], [14]. Soit l'équation différentielle :

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_1y' + a_0y = b_{n-1}u^{(n-1)} + \dots + b_1u' + b_0u \quad \dots 1.37$$

Associée à la fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_0}{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0} \quad \dots 1.38$$

1.4.6.1. Forme compagne commandable

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, & B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \\ C = [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad \dots \quad b_{n-1}], & D = [0] \end{cases} \quad \dots 1.39$$

Sous cette forme, la matrice A est inversible, ce qui assure la commandabilité du système.

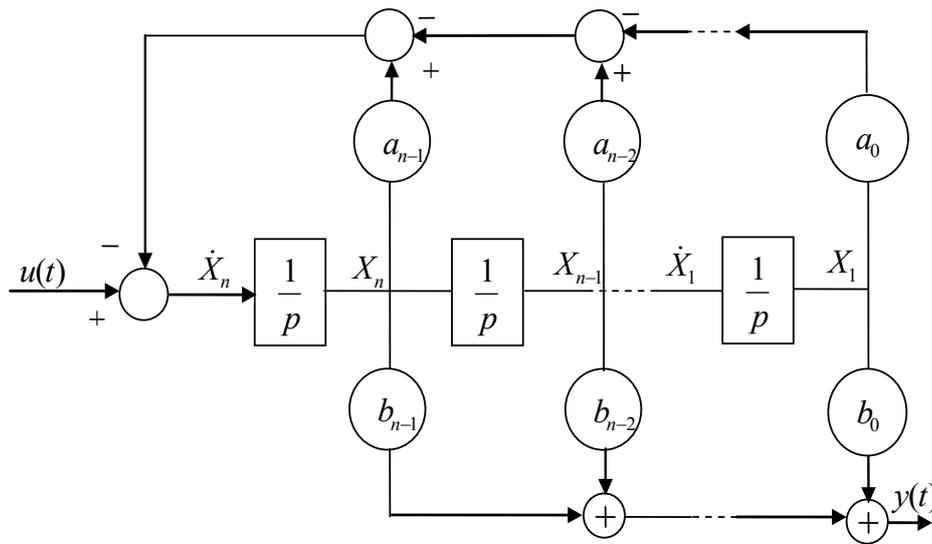


Figure 1.16 : Diagramme bloc de simulation commandable.

1.4.6.2. Forme compagne observable

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix}; & B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ \dots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} \\ C = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]; & D = [0] \end{array} \right. \quad \dots 1.40$$

La matrice A est de rang n d'où l'observabilité du système donné sous cette forme. Le schéma de la figure 1.17 le montre clairement.

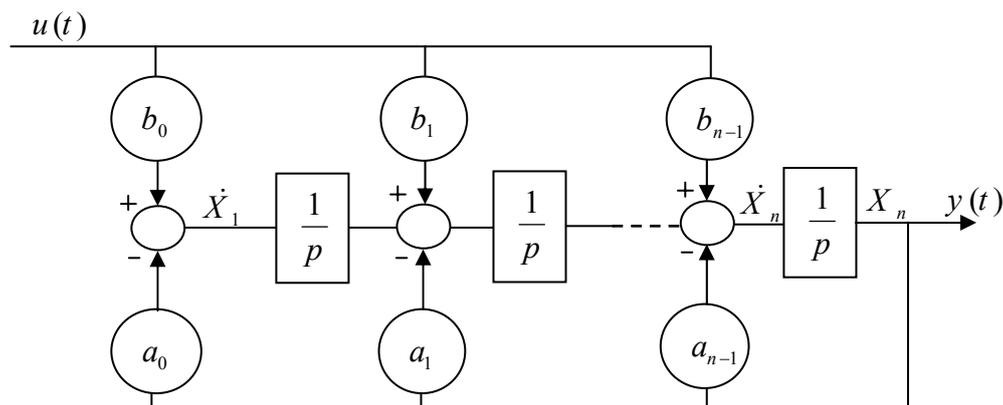


Figure 1.17 : Diagramme bloc de simulation observable.

1.4.6.3. Forme modale

Dans le cas où la fonction de transfert présente des pôles distincts on a la représentation suivante :

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \lambda_n \end{bmatrix}; & B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \\ C = [\alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_n]; & D = [0] \end{cases} \quad \dots 1.41$$

Avec :

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i(t) \quad \dots 1.42$$

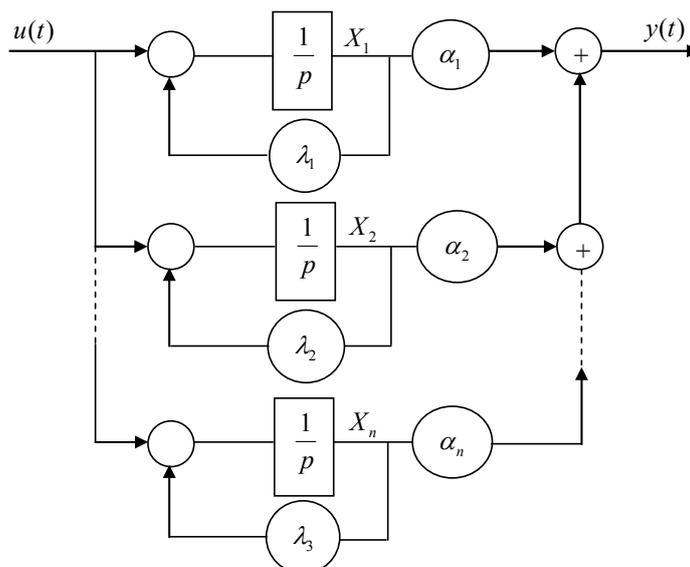


Figure 1.18 : Diagramme bloc de simulation modale.

Cette forme fait intervenir une matrice diagonale ce qui assure la commandabilité et l'observabilité du système. Dans le cas le plus général, les pôles peuvent être multiples et la matrice sera constituée de blocs de *JORDAN*.

1.4.7. Pluralité des représentations d'état

Les variables d'état sont un outil mathématique destiné à faciliter la représentation d'un système en vue de son analyse, sa synthèse, sa commande ou sa surveillance [8]. Parfois, on est amené à changer de variables d'état afin de mieux mettre en évidence les propriétés du système. Ce passage se fait par le biais d'un changement de base. Le nouveau système s'écrit :

$$\begin{cases} \tilde{x}' = T^{-1}AT \tilde{x} + T^{-1}Bu \\ y = CT \tilde{x} + Du \end{cases} \quad \dots 1.43$$

Avec : $x = T\tilde{x}$, T étant une matrice ($n \times n$) régulière.

Les matrices de la structure interne du système deviennent :

$$\tilde{A} = T^{-1}AT, \tilde{B} = T^{-1}B, \tilde{C} = CT \text{ et } \tilde{D} = D \quad \dots 1.44$$

Remarque : Quelque soit le vecteur d'état adopté, la matrice de transfert du système reste la même et s'écrit :

$$F(p) = C (PI_n - A)^{-1} B + D \quad \dots 1.45$$

1.5. Processus linéaires stationnaires

Les systèmes multientrées-multisorties (**MIMO**) sont des systèmes à plusieurs entrées (u_1, u_2, \dots, u_m) et plusieurs sorties (y_1, y_2, \dots, y_r). Ces systèmes ne se réduisent pas à la mise en parallèle de systèmes (mono-entrée, mono-sortie) mais se caractérisent par des phénomènes de couplage, ou d'interaction, dans la mesure où l'application d'un signal sur une entrée entraîne en général une variation de plusieurs ou de toutes les sorties.

Il y a deux types de processus qui sont :

1.5.1. Processus continus linéaires stationnaires

1.5.1.1. Notion de fonction et matrice de transfert

- *Fonction de transfert*

C'est une représentation mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire invariant. Elle est utilisée dans l'analyse des systèmes continus **SISO** (*single-input single-output*), en traitement du signal, en théorie des communications, et en automatique. La transformée de Laplace du produit de convolution de deux variables est égale au produit des transformées de Laplace de ces variables qui permet de caractériser l'effet du filtre sur le signal à partir de la connaissance de sa réponse impulsionnelle.

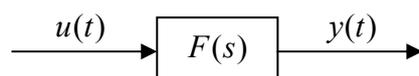


Figure 1.19 : Filtre linéaire.

Dans sa forme la plus simple pour les signaux à temps continu, la fonction est souvent écrite sous la forme suivante:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \dots 1.46$$

Où $F(s)$ est le symbole de la fonction de transfert, $Y(s)$ la fonction de sortie, et $U(s)$ la fonction d'entrée. Pour les systèmes discrets, cette fonction s'écrit de façon similaire. Comme pour les systèmes monoentrée-monosortie continu, trois types de représentation sont possibles :

- *La matrice de transfert*

C'est en général le modèle de base dont on dispose lorsque le système est trop complexe pour être mis complètement en équations en utilisant les lois de la physique et que l'on procède à

une identification globale entrées-sorties. Elles sont utilisées pour représenter les caractéristiques entrées-sorties des systèmes multivariables avec les nombres des entrées et des sorties est supérieurs à deux. . Nous présentons en premier lieu le cas général **MIMO** (*Multi Input Multi Output*) pour revenir ensuite au cas particulier très important des modèles **SISO** [3].

Soit le système multivariable dont le modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), & x(t_0) = 0 \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad \dots 1.47$$

D'un point de vue technique, tout ensemble d'éléments, de composants, dispositifs, associés, dans un but spécifié, constitue un système, simple ou complexe soit-il [4].

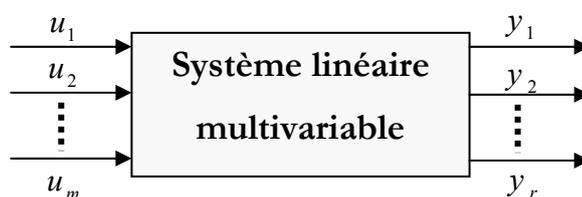


Figure 1.20 : Système linéaire multivariable m entrées et r sorties

$$\begin{cases} U = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_m]^T \\ Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_r]^T \end{cases} \quad \dots 1.48$$

Avec : U le vecteur des entrées, et Y le vecteur des sorties.

Du fait de la linéarité de l'opérateur de Laplace, il est possible de l'appliquer aux équations.

Pour des conditions initiales nulles, $x_0 = 0$ on obtient la relation entrées-sorties suivante :

$$Y(s) = [(sI - A)^{-1}B + D]U(s) = F(s)U(s) \quad \dots 1.49$$

La matrice $F(s)$ est appelée matrice de transfert liant l'entrée à la sortie.

Où :

$$Y(s) = F(s)U(s) \quad \dots 1.50$$

Avec :

$$F(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{r1}(s) & \dots & G_{rm}(s) \end{bmatrix} \quad \dots 1.51$$

Remarques :

- La notion de matrice de transfert n'est définie que pour des conditions initiales nulles.
- Le concept de matrice de transfert permet de représenter le comportement dynamique du système de manière algébrique.
- La matrice de transfert est une caractéristique du système indépendante de l'amplitude et de la nature de l'entrée du système.
- C'est un modèle entrée-sortie qui ne contient aucune information sur la structure physique du système.

- **La matrice de réponse impulsionnelle :**

Soit le modèle LTI strictement propre possédant m entrées et r sorties.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t), & x(t_0) = 0 \\ y(t) = C x(t) + D u(t) \end{cases} \quad \dots 1.52$$

Où :

$$g(t) = C e^{At} B \quad \dots 1.53$$

A chaque instant t , $g(t)$ est une matrice de dimension $r \times m$. L'élément (i, j) donne la relation entre la $j^{\text{ème}}$ entrée et la $i^{\text{ème}}$ sortie à l'instant t .

- **Equations différentielles entrées-sorties**

Une autre forme pour le modèle dynamique d'un système consiste à écrire les équations liant les variables d'entrée et leurs dérivées aux variables en excluant toutes les autres variables. Dans le cas général, le modèle prend la forme d'un système d'équations différentielles entrées-sorties.

$$\begin{cases} f_1(y_1, \dots, y_1^{n_1}, y_r, \dots, y_r^{n_r}) = g_1(u_1, \dots, u_1^{n_1}, u_m, \dots, u_m^{n_m}) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_s(y_1, \dots, y_1^{n_1}, y_r, \dots, y_r^{n_r}) = g_s(u_1, \dots, u_1^{n_1}, u_m, \dots, u_m^{n_m}) \end{cases} \quad \dots 1.54$$

Du fait de la difficulté à les manipuler mathématiquement, ces modèles sont très peu utilisés, excepté dans des cas particuliers tels que les modèles LTI où l'on obtient un système d'équations différentielles linéaires à coefficients constants.

- **Le cas particulier des systèmes SISO**

Le cas particulier des systèmes possédant une seule entrée et une seule sortie (**SISO**) est très important non seulement puisqu'il fût historiquement le premier à être traité de manière intensive et extensive mais également parce qu'il possède de nombreuses propriétés que l'on ne

retrouve pas dans le cas **MIMO**. Dans le cas de modèles externes, la simplification de la représentation permet de développer des méthodes graphiques et algébriques qui sont difficilement généralisables au cas matriciel.

La fonction de transfert

Soit un système LTI mono-entrée $u(t)$, mono-sortie $y(t)$. Il peut alors être décrit par l'équation différentielle à coefficients constants.

$$a_n y^{(n)}(t) + \dots + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_1 u^{(1)}(t) + b_0 u(t) \quad \dots 1.55$$

Sous l'hypothèse des conditions initiales nulles, le rapport entre la transformée de Laplace du signal de sortie et la transformée de Laplace du signal d'entrée d'un système LTI est la fonction de transfert de ce système.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad \dots 1.56$$

1.5.2. Processus discret linéaires stationnaires

Les méthodes développées précédemment s'appliquaient aux systèmes continus. Elles sont transposables aux systèmes discrets. Les représentations discrètes d'un système physique continu sont moins naturelles que les représentations continues mais elles apparaissent néanmoins lorsqu'on considère un système continu échantillonné, par exemple.

Les représentations continues rappelées en figure 1.11 sont alors remplacées par : [7]

- Une matrice de transfert $F(z)$;
- Un ensemble de r équations récurrentes de la forme :

$$F(y_{ik}, y_{ik-1}, \dots, y_{ik-r}, u_{jk}, u_{jk-1}, \dots) = 0, \quad \forall i, j$$

Où y_{ik} représente la valeur de la sortie y_i à l'instant kT et y_{ik-r} la valeur de cette même sortie à l'instant $(k-r)T$, T étant la période d'échantillonnage ;

- Une représentation d'état discrète:

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_k \\ Y_k = CX_k + DU_k \end{cases} \quad \dots 1.57$$

Les représentations discrètes ont l'avantage de prendre en compte facilement des termes de retard pur (multiples de la période d'échantillonnage) qui, en particulier dans le cas d'une représentation d'état, sont simplement représentés par des variables d'états [7].

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a rappelé les principaux concepts des outils de modélisation communs à plusieurs disciplines qui présentent les grandes classes de la modélisation. Ensuite, on a rassemblé les étapes essentielles utilisées en l'identification des procédés. L'estimation de la structure des modèles à partir des données est représentée ainsi que les techniques de minimisation des critères de performances. L'identification des systèmes a connu un développement considérable sur les applications des techniques existantes. Elle consiste à déterminer un ensemble d'équations ou bien un modèle décrivant le mieux possible le procédé. Seulement, en pratique la plupart des systèmes physiques sont complexes et de structures inconnues, d'où la nécessité d'utiliser des approches à apprentissage (*logique floue, réseaux de neurones, ...*) qui répond à ce genre de problèmes. La représentation d'état des systèmes, permettant la représentation par fonction et matrice de transfert et l'analyse des systèmes multivariés. Nous avons également précisé l'intérêt de ces notions dans un objectif de représentation basée sur la non interaction entrée-sortie, à travers un rapide historique des principales contributions apportées par la communauté scientifique. On conclue qu'un système multientrées-multisorties n'est pas comme un système monovarié avec des calculs plus compliqués, mais que ce sont deux choses totalement différentes.

- L'une, traite de la représentation des systèmes multidimensionnels, et plus exactement comment passer d'une représentation initiale, de type externe (*équations différentielles couplées, ou matrice de transfert*), à une représentation de type interne (*modèle d'état*). L'obtention d'un modèle d'état s'avère en effet indispensable, tant au niveau de la simulation que, plus encore, au niveau de la commande ou de la surveillance. Contrairement à ce qui se passe dans le cas des systèmes monovariés, le passage d'une représentation externe à une représentation d'état n'est pas forcément simple, et l'on verra que ces difficultés sont liées à la notion " *d'ordre* " des systèmes multivariés.

- L'autre, traite de la conduite et la surveillance des systèmes multidimensionnels. La conduite et la surveillance d'un système multientrées-multisorties doivent être envisagées d'une manière globale. Après un bref rappel, plus historique que pratique, des premières méthodes mise en œuvre, dans le domaine fréquentiel, l'accent est mis sur les techniques actuelles qui utilisent les méthodes d'état.

Références Bibliographiques

- [1] L. Abed, Cours de 1^{ère} année Magistère, *méthodes d'identification récursive*, U.F.A. Setif, 2002.
- [2] L. Abed, *Identification des Processus*, Université Farhat Abbas – SETIF, 8 Octobre, 2003.
- [3] D. Arzelier, *Représentation et analyse des systèmes linéaires*, Notes de cours, Version 5.0, LAAS-CNRS, 07 Avenue du colonel Roche, 31077 Toulouse cedex 04, France, arzelier@laas.fr.
- [4] P. Borne, *Modélisation et identification des processus*, Tome1. Edition technip-1992
- [5] P. Borne, G. Dauphin, *Modélisation et identification des processus*, T2, Edition Technip, Paris, 1992.
- [6] A. Crosnier, G. Abba, B. Jouvencel, R. Zapata, *Ingénierie de la commande des systèmes*, technique de base, Ellipses Edition Marketing S. A, Paris cedex 15, 2001.
- [7] A. Fossard, *Systèmes multientrées-multisorties*, techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle, R 7220, 1999.
- [8] J.C. Gille, M. Clique, *Système linéaire : équation d'état*, Eyrolles, Paris 1984.
- [9] J.C. Gille, M. Clique, *Représentation d'un système*, Eyrolles, Paris 1975.
- [10] J.C. Gille, M. Clique, *Connaissance d'un système*, Eyrolles, Paris 1984.
- [11] R. Jaques, Technique de l'ingénieur, *modélisation et identification des processus*, S1, édition 1971.
- [12] D. Lando, A-B. Voda, *Identification des systèmes*, Hermes, Paris, 2001.
- [13] R. Lozano, D. Taoutaou, *Identification et commande adaptatif*, HERMES, Paris 2001.
- [14] B. Pradin, *Automatique linéaire : système à temps discret*, INSA, TOULOUSE 1996.
- [15] P. Silarry, *Automatique de base*, Ellipses, Paris 1992. Et Berti, ALGER 1993.
- [16] J. Thoma, B. Ould-Bouamama, *Modélisation et simulation des processus thermodynamique et technologique : application des bond-graph en génie des procédés*, juillet 1998.
- [17] M. Rivoire, J-L. FERRIER, *Cours d'automatique: Commande par ordinateur Identification*, Tome 3, CHIHAB, EYROLLES 1993.

DESCRIPTION DE LA COLONNE DE DISTILLATION

2

Table des matières

2.1. Introduction	32
2.2. Historique	32
2.3. La distillation.....	32
2.3.1. Principe général de la distillation	32
2.3.2. Type de distillation.....	33
2.3.2.1. La distillation continue.....	33
2.3.2.2. La distillation discontinue	33
2.4. Description d'une colonne de distillation.....	34
2.4.1. La virole	34
2.4.2. Les fonds	34
2.4.3. Ballon de tête et Ballon de fond	35
2.4.4. Les contacteurs liquide-vapeur.....	35
2.4.5. Les plateaux.....	36
2.4.6. Les garnissages.....	36
2.5. Les appareils d'échange thermique	37
2.5.1. Le rebouilleur	37
2.5.1.1. Rebouilleur type Kettle	37
2.5.1.2. Rebouilleur à thermosiphon vertical	37
2.5.1.3. Rebouilleur once-through	37
2.5.1.4. Rebouilleur par four	37
2.5.2. Le condenseur	37
2.5.2.1. Condensation totale	38
2.5.2.2. Condensation partielle.....	38
2.6. Les différents types de colonnes de distillation	38
2.6.1. Le Séparateur Flash.....	39
2.6.2. La colonne de distillation continue	40
2.6.2.1. La nature de l'alimentation	40
2.6.2.1.1. Colonne binaire	40

2.6.2.1.2. Colonne multi-composants	40
2.6.2.2. La conception interne de la colonne.....	40
2.6.2.2.1. Colonne à plateaux	40
2.6.2.2.2. Colonne à garnissage	41
2.6.3. La colonne de distillation discontinue	42
2.7. Caractéristiques d'une colonne de distillation	43
2.7.1. Puissance de la colonne	43
2.7.2. Débit	43
2.7.3. Retenue de la colonne (Volume de rétention).....	44
2.7.4. Efficacité	44
2.7.5. Finesse.....	44
2.7.6. Pertes de charge	44
2.8. Avantages d'une colonne à plateaux	44
2.9. Inconvénient	44
2.10. Conclusion	45

2.1. Introduction

La fonction essentielle d'une colonne de distillation est de séparer une alimentation complexe en produits de compositions différentes ou de purifier les produits intermédiaires ou finaux. La possibilité de distillation repose sur la différence de volatilité existant entre les différents composants chimiques. Si l'on considère un simple ballon contenant un mélange de deux constituants (*mélange binaire*) et que l'on chauffe le contenu de ce ballon, il s'établit un équilibre régi par la thermodynamique entre le liquide et la vapeur qui sont alors constitués de deux composants différents : la vapeur qui est plus riche en composant le plus volatil (*léger*) et le liquide qui est plus riche en composant le moins volatil (*lourd*). En première approximation, le composant le plus volatil est celui qui possède la masse molaire la plus faible. Notons que dans le cas d'un mélange multi-composants comme un mélange d'hydrocarbures, la prévision des volatilités relatives peut être plus délicate, mais peut être réalisée par la plupart des codes thermodynamiques actuels.

On constate que l'on réalise alors par cet équilibre une opération de séparation appelée *flash*, qui peut être vue comme l'opération qui se passe au niveau de chaque plateau d'une colonne de distillation. Lorsque la séparation par un simple flash est insuffisante, on procède donc à une séparation dans une colonne de distillation, qui permettra une meilleure séparation grâce à la succession des plateaux empilés [5].

2.2. Historique

Les premières unités de distillation apparurent il y a environ 150 ans. L'appareil de *Cellier-Blumenthal* comporte deux types de plateaux. La partie basse de la colonne renferme un empilement de disques en forme de calottes sphériques dont la concavité est tournée alternativement vers le haut et le bas; Les disques ayant la concavité vers le bas sont perforés de façon à accroître l'aire de contact des phases liquide et vapeur. La partie supérieure de la colonne est équipée de plateaux munis d'une calotte unique. Au début du vingtième siècle, si les plateaux à calotte unique sont encore le type le plus courant, on voit apparaître les plateaux à tunnels rectangulaires de *Savalle*, les plateaux à calottes multiples d'*Egrot* et les plateaux perforés de *Siemens*. La phase de développement des connaissances en distillation a commencé dans les années trente et s'approche maintenant de la maturité [2].

2.3. La distillation

2.3.1. Principe général de la distillation

La distillation consiste à séparer des liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. L'appareillage vraiment spécifique de la distillation est une colonne verticale appelée

colonne à distiller. Celle-ci est garnie de plateaux et de garnitures diverses qui permettent un contact intime entre les phases de vapeur et de liquide qui y circulent. Dans cette colonne, il y a un équilibre thermodynamique entre les deux phases, en fonction de la température et des compositions respectives. On chauffe le mélange et suivant les températures d'ébullition des différents produits, le produit dont la température d'ébullition, la plus faible, est évacué en haut de la colonne, alors que les autres restent dans la partie basse du système. Le chauffage est appliqué en bas de la colonne : bouilleur [2], [8].

2.3.2. Type de distillation

2.3.2.1. La distillation continue

En distillation continue, le système est en équilibre massique et thermique permanent. Le mélange à traiter est introduit sur le plateau d'alimentation de la colonne. Les composés les plus volatils se vaporisent à partir du liquide contenu dans la colonne et atteignent le plateau supérieur.

En montant, les vapeurs s'enrichissent en composés volatils. La phase vapeur ainsi enrichie est collectée en haut de la colonne, puis condensée pour fournir un distillat léger.

La phase liquide tombe en cascade vers le bas, s'enrichit en éléments lourds et perd ses éléments légers. Plus le nombre de plateaux ou la hauteur de la colonne est important, meilleure est la séparation. Le but étant de trouver un compromis entre le rendement et le coût de l'opération. Il est très difficile de donner une estimation du coût de ce procédé du fait de la variété des produits traités. Il faut noter qu'avec cette technique il est difficile de séparer des produits dont l'écart de températures d'ébullition est inférieur à 1 degré. En ce qui concerne les rejets générés par ce procédé, la partie non récupérable est généralement incinérée dans un centre de traitement cependant dans le cas où elle est fortement aqueuse, elle est envoyée dans un réseau de traitement biologique.

2.3.2.2. La distillation discontinue

En distillation discontinue, le chauffage est appliqué dans un réservoir en fond de colonne (*bouilleur*), où le mélange est introduit. Les produits les plus légers sont recueillis en premier dans le condenseur qui se trouve en tête de colonne. Lors du passage des différents composés légers, la température en tête de colonne s'accroît.

En fin d'opération, il ne reste plus que le résidu lourd en bas de colonne. C'est pareil que pour la distillation continue, il est très difficile de donner une estimation du coût de ce procédé du fait de la variété des produits traités.

De même, en ce qui concerne les rejets générés par ce procédé, la partie non récupérable est généralement incinérée dans un centre de traitement cependant dans le cas où elle est fortement aqueuse, elle est envoyée dans un réseau de traitement biologique [3].

2.4. Description d'une colonne de distillation

L'ensemble de l'installation d'une colonne qui est représenté par la figure 2.1 se compose de : [8], [9]

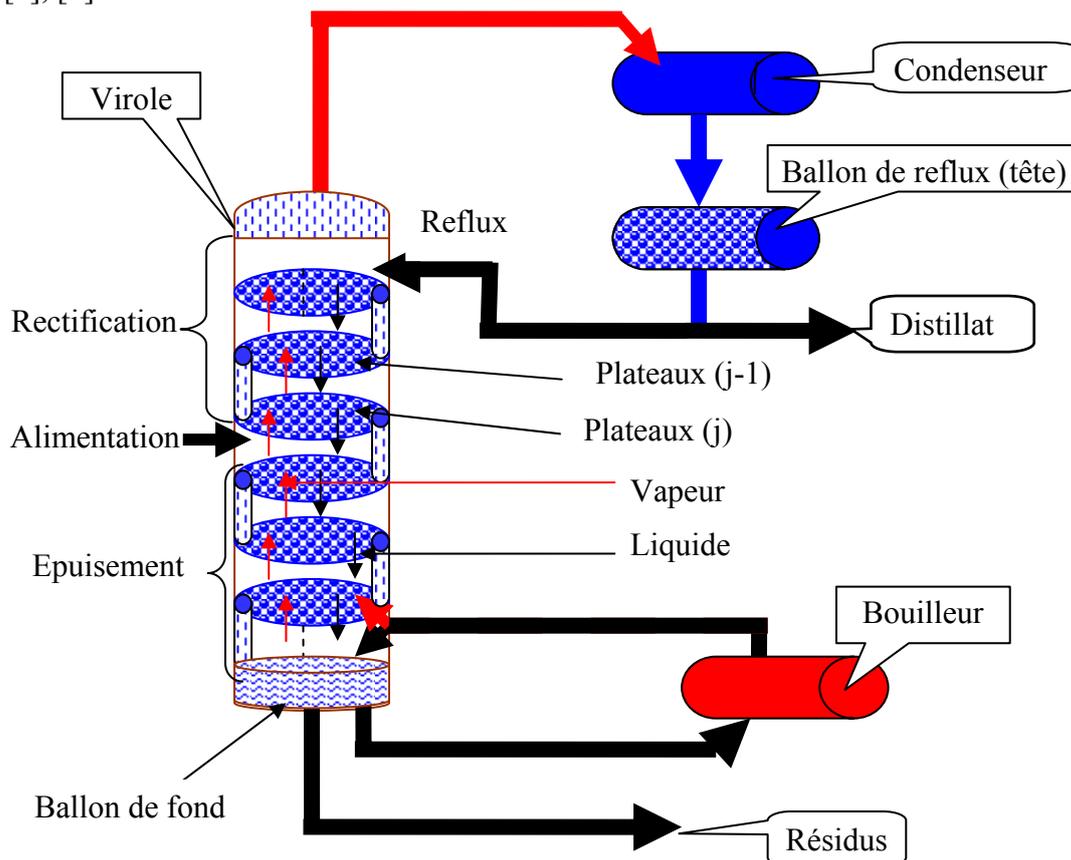


Figure 2.1 : Colonne de distillation

2.4.1. La virole

La virole est l'enveloppe de la colonne. C'est un corps cylindrique en tôles d'acier soudées. Elle doit résister aux efforts de pression, de dilatation et éventuellement aux efforts du vent et aux séismes. Elle peut être constituée de sections de différents diamètres. Si le débit et les propriétés physiques du flux de vapeur varient fortement entre le pied et la tête de la colonne, il sera plus économique d'ajuster la colonne aux conditions opératoires et de prévoir une colonne à deux ou même trois diamètres. On distingue deux types de viroles : Les viroles monobloc et les viroles tronçon.

2.4.2. Les fonds

La colonne de distillation a deux fonds (*fond supérieur*, *fond inférieur*) qui ont diverses formes. Les fonds les plus utilisés sont les fonds elliptiques et les fonds hémisphériques.

A égalité de résistances et de diamètres, les fonds sphériques sont moins épais que les fonds elliptiques. Les fonds elliptiques sont livrés emboutis jusqu'à 3m de diamètre. Les fonds sont soudés à la virole; toutefois dans certains cas particuliers et pour des diamètres ne dépassant pas 1.5m, le fond supérieur pourra être rapporté avec des brides boulonnées. Le métal des fonds est le même que celui de la virole [6].

2.4.3. Ballon de tête et Ballon de fond

On dispose en haut et en bas de deux ballons contenant des qualités du liquide nettement plus importantes que sur les plateaux :

- Grâce au ballon de tête, on peut augmenter le débit de reflux. Donc les débits internes de liquide augmentent.
- Par représentation du contenu du ballon de fond, on peut augmenter les débits internes de la vapeur.

Pour disposer à tout instant de ces retenues, on régule les niveaux du liquide dans les deux ballons.

2.4.4. Les contacteurs liquide-vapeur

Les unités de distillation peuvent comporter divers appareils. L'appareil spécifique est constitué d'un contacteur liquide-vapeur dont la diffusion à contre-courant instaure les phases liquide et gazeuse et le phénomène qui régit la distillation.

Le transfert de matière et de chaleur s'établit au moyen du dispositif de contact qui engendre la surface d'échange entre les deux phases (*liquide-vapeur*). Le contact est effectué par une série d'éléments actifs qui sont les plateaux et les garnissages dans un but d'effectuer un transfert de masse entre ces deux phases.

Cet élément reçoit en effet deux alimentations : un liquide descendant et une vapeur ascendante.

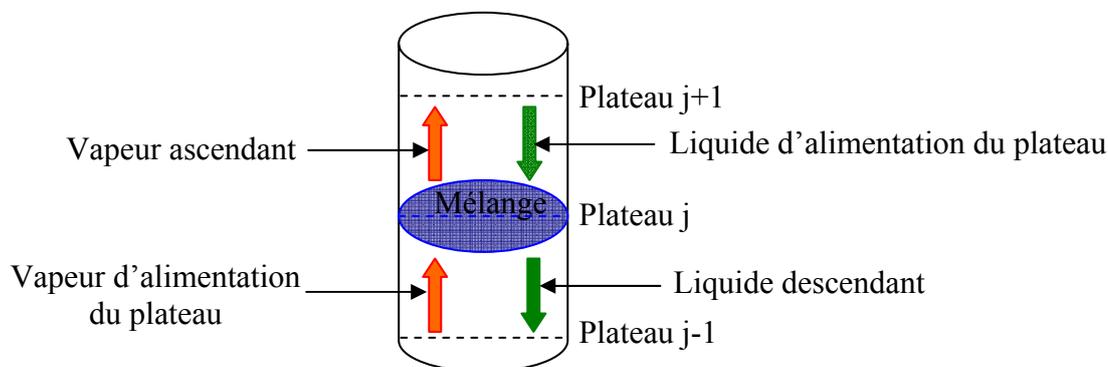


Figure 2.2 : Contact liquide vapeur

2.4.5. Les plateaux

Le plateau est l'élément actif de la colonne, il a pour fonction la mise en contact de la phase liquide et de la phase gazeuse de façon à amener celles-ci le plus près possible de l'état d'équilibre [3].

Chaque plateau est alimenté à la fois par la phase vapeur sortant du plateau inférieur et par la phase liquide sortant du plateau supérieur [3], [9].

Le long de la colonne de distillation, les constituants d'un mélange initial vont se déplacer en masse d'une phase à une autre tel que le liquide descend de plateau en plateau et sous l'effet de chaleur, les produits les plus volatils se vaporisent. Pour se faire, on utilise directement l'énergie de pression de la vapeur pour disperser les phases l'une de l'autre. Il existe donc deux types de dispositifs utilisés :

- Une dispersion du gaz dans une phase liquide continue qui correspond aux colonnes à plateaux.
- Une dispersion du liquide dans une phase gazeuse continue qui correspond aux colonnes à garnissage [11].

A part ces quelques dispositifs particuliers, ils peuvent se ranger en deux grandes catégories :

- Les plateaux à courants croisés avec trop-plein.
- Les plateaux à contre-courant sans trop-plein.



(a) : Plateau à courants croisés.

(b) : Plateau à contre-courant.

Figure 2.3 : Type de plateaux d'après l'écoulement des phases

Dans les plateaux à courants croisés, la phase gazeuse ascendante traverse le liquide qui se déplace horizontalement sur le plateau. Le liquide s'écoule par gravité d'un plateau à l'autre par une conduite (*trop-plein*). Les plateaux à contre-courant, ne comportent pas un barrage de sortie ni un trop-plein. Le liquide et la vapeur s'écoulent par les mêmes orifices.

2.4.6. Les garnissages

Le garnissage est déposé sur toute la section de la colonne soit en vrac soit donné en fraction. Il existe plusieurs garnissages qui diffèrent par la forme et les matériaux de construction

Les deux phases liquide et vapeur circulent en contre-courant, le liquide ruisselle sur les éléments du garnissage formant un film qui est léché par la phase gazeuse [4].

Le garnissage présente des pertes de charge moins élevées que les plateaux, par contre sa souplesse de fonctionnement est fiable. Ce type de garnissage convient dans les cas suivants :

- Produit très corrosif.
- Petites dimensions.

2.5. Les appareils d'échange thermique

La colonne de distillation comporte deux appareils d'échange thermique, le rebouilleur et le condenseur qui ont pour rôle d'engendrer les débits de liquide et de vapeur.

2.5.1. Le rebouilleur

Il est constitué d'un ballon dans lequel la charge à séparer est placée en début de la manipulation. Il y a différents types de rebouilleurs :

2.5.1.1. Rebouilleur type Kettle

Ce rebouilleur vaporise partiellement le liquide du fond de colonne et réalise la séparation des phases obtenues.

2.5.1.2. Rebouilleur à thermosiphon vertical

Dans ce type de rebouilleur, le liquide du fond de colonne circule naturellement vers le rebouilleur dans lequel il est partiellement vaporisé.

2.5.1.3. Rebouilleur once-through

Prélevé sur le dernier plateau, le liquide passe en une fois à travers le rebouilleur, les phases liquide et vapeur sont séparées au fond de la colonne.

2.5.1.4. Rebouilleur par four

Poussé par une pompe, le liquide de fond de colonne est partiellement vaporisé dans les tubes du four.

2.5.2. Le condenseur

Le condenseur est un appareil d'échange thermique où la condensation est un procédé de changement de phases, il permet d'obtenir le flux liquide.

Il a pour rôle de condenser totalement ou partiellement les vapeurs de tête de la colonne de manière à disposer du reflux qui permet d'initier le courant liquide sur les plateaux.

Les condensations les plus souvent rencontrées sont :

2.5.2.1. Condensation totale

Le liquide provenant de la condensation des vapeurs de tête se partage entre le débit de reflux et celui du produit de tête (figure 2.4). Dans ce type de condensation, il n'y a pas de dégazage.

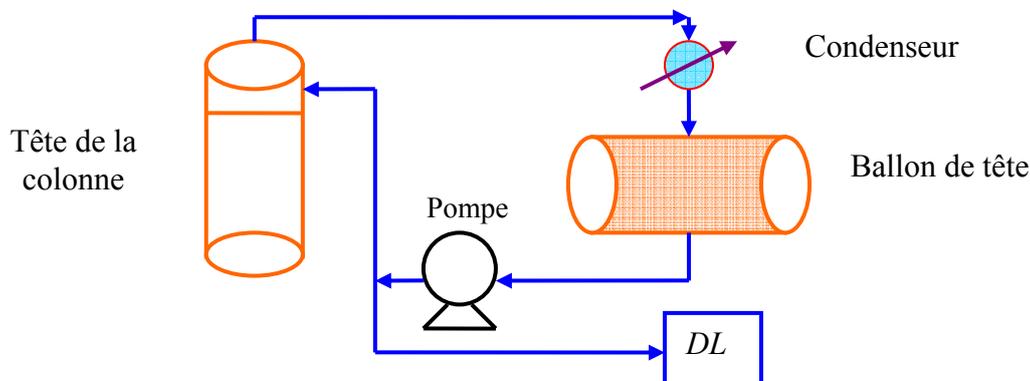
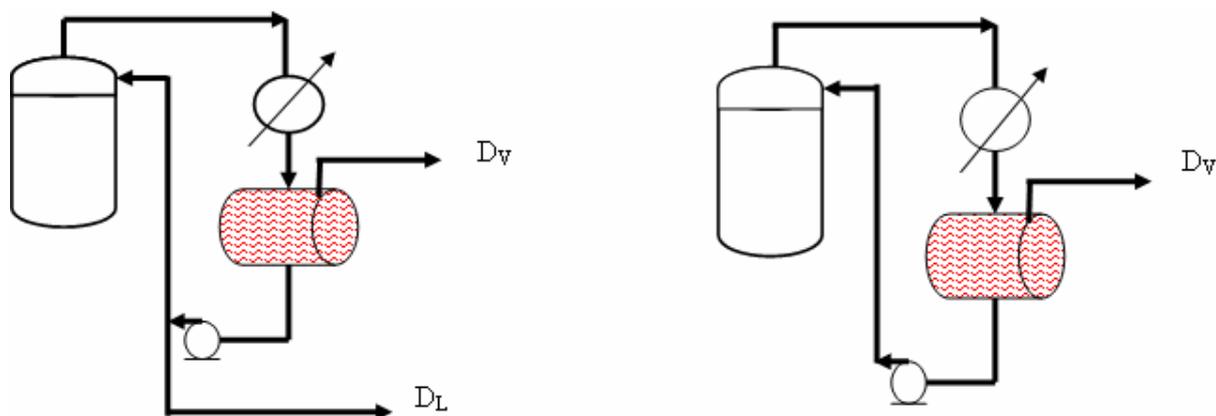


Figure 2.4 : Condensation totale

2.5.2.2. Condensation partielle

Dans la figure 2.5.a, une partie des vapeurs de tête non condensées, constitue le distillat gazeux. Les parties condensées se répartissent entre le reflux externe et le distillat liquide. Dans le cas d'une condensation partielle avec produit de tête totalement condensé qui est montrée par la figure 2.5.b, seule la fraction vapeur correspondant au reflux externe est condensée.



(a) : Produit de tête liquide et gazeuse

(b) : Produit totalement gazeux.

Figure 2.5 : Condensation partielle

2.6. 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, 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, ...*).

2.6.1. 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 méthode la plus simple 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 sortants, 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 comme le montre la figure 2.6.

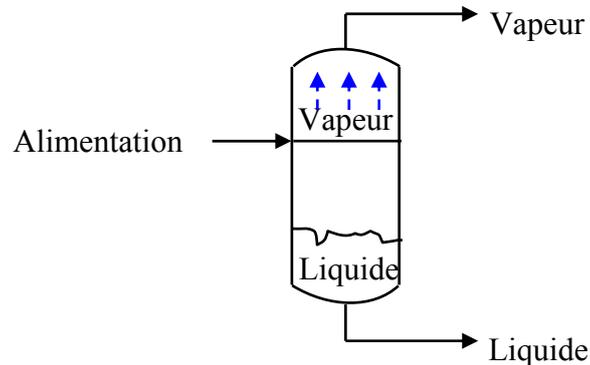


Figure 2.6 : Schéma simplifié d'un séparateur Flash

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-chimie, 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 (hL), la pression, ...etc.

Des modèles proposés dans la littérature, comme le modèle algébro-différentiel ou le modèle en pseudo-bond qui montre l'efficacité de la méthodologie bond graph dans la modélisation et la simulation des systèmes thermodynamiques [5].

2.6.2. 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 celui décrit plus haut, avec un plateau 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 sortante 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 de distillation continue figure 2.7 [7], [5].

- 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 [11].

Les colonnes de distillation continues peuvent être classées selon : [3], [4], [7]

2.6.2.1. La nature de l'alimentation : qu'elles traitent

2.6.2.1.1. Colonne binaire : l'alimentation contient seulement un mélange de deux composants ;

2.6.2.1.2. Colonne multi-composants : l'alimentation contient plus de deux composants,

2.6.2.2. La conception interne de la colonne

2.6.2.2.1. 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 ;

2.6.2.2.2. 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 [7]. 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 varie du simple au complexe suivant le but de la modélisation, pour la conduite par la commande robuste, par la commande adaptative, par le pilotage numérique par *PC* ou par des modèles aux équations algébro-différentielles pour l’analyse structurale, la surveillance et la simulation par l’approche bond graph.

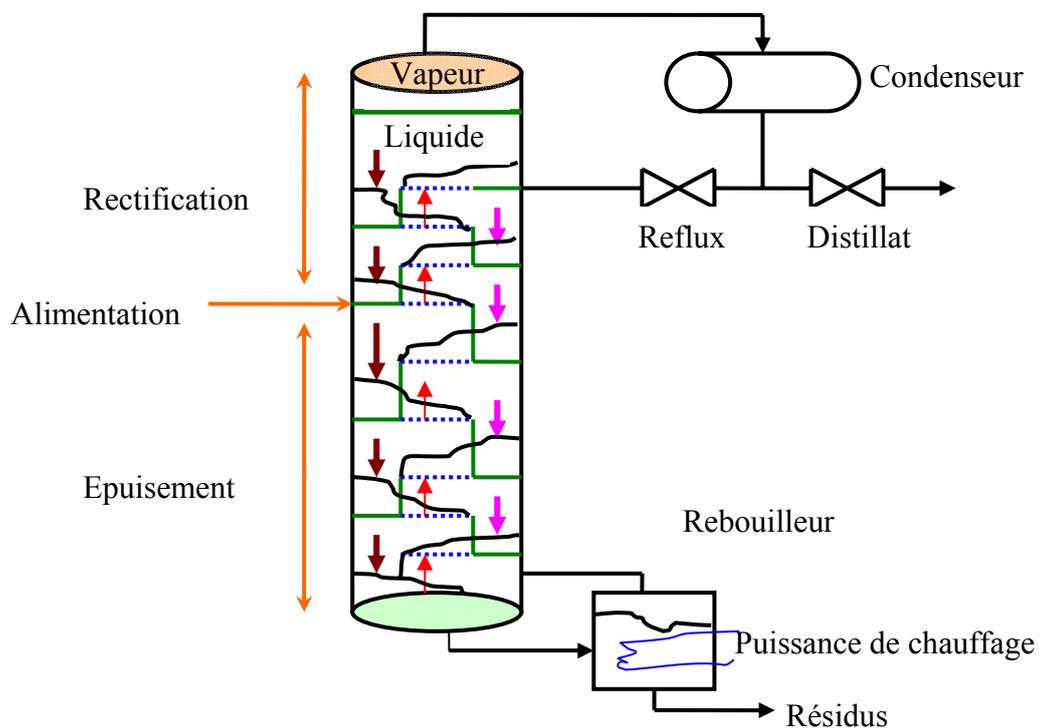


Figure 2.7 : Schéma d’une colonne de distillation continue

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 [1]:

- 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.

2.6.3. 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 sont 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 connu 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, mais peu d'attention dans la littérature concerne l'étude de son comportement dynamique.

Dans la distillation discontinue, un mélange liquide est chargé dans le rebouilleur (Fig. 2.8), 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 [7].

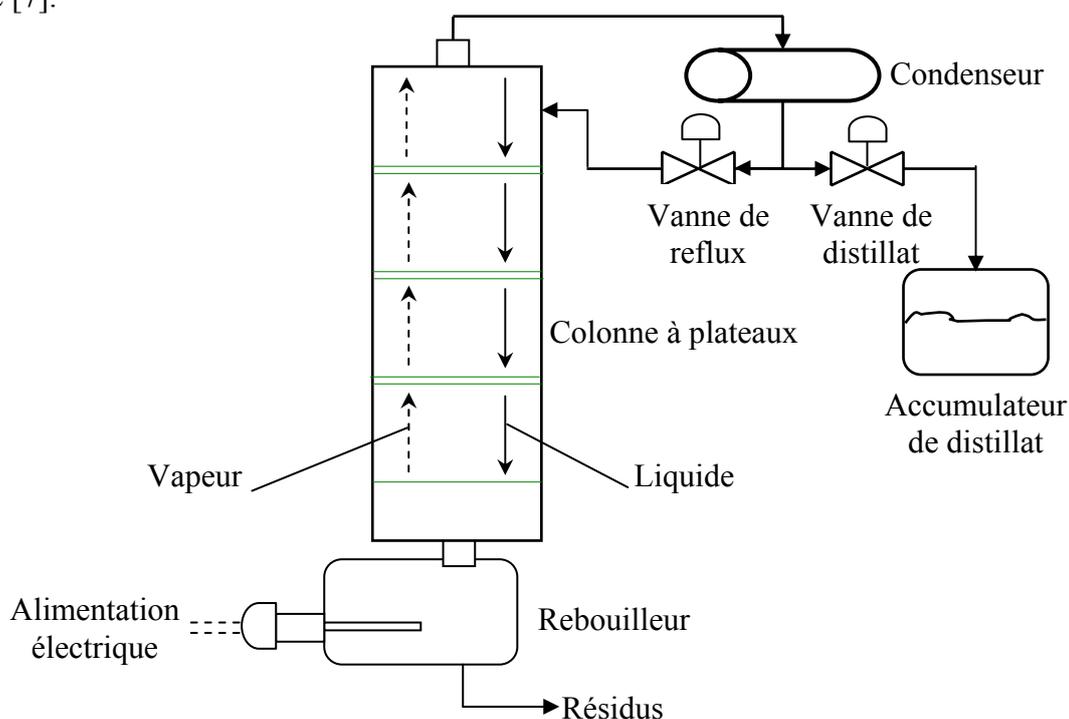


Figure 2.8 : Schéma d'une colonne de distillation discontinue

La colonne de distillation discontinue peut fonctionner sous différents modes selon le besoin industriel. On peut saisir les modes suivants :

- 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 optimal: 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 toujours assurer un débit d'ébullition (V) constant. 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.

2.7. Caractéristiques d'une colonne de distillation

2.7.1. Puissance de la colonne

C'est le nombre théorique de plateaux de la colonne ou c'est la hauteur équivalente à un plateau théorique ($H.E.P.T$). Pour une colonne donnée, il varie largement en fonction des conditions d'utilisation. On détermine la H.E.P.T expérimentalement.

2.7.2. Débit

C'est le volume de vapeur passant dans la colonne pendant une unité de temps. Le débit sera fonction du diamètre de la colonne. On ne peut pas augmenter le débit au-delà d'une certaine valeur sous peine de provoquer l'engorgement de la colonne [8]. Un bouchon liquide se forme lorsque la vapeur empêche le liquide de refluer vers le rebouilleur. Les débits molaires de liquide et de vapeur sont identiques dans la colonne comme le montre la figure 2.9.

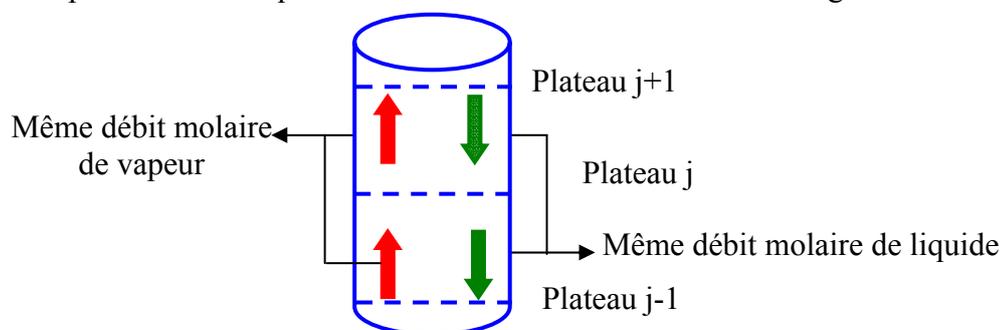


Figure 2.9 : Débit molaire dans la colonne

2.7.3. Retenue de la colonne (Volume de rétention)

La retenue de la colonne est la quantité de liquide présente dans la colonne à chaque instant [10]. On distingue généralement :

- ❖ **La retenue statique** : c'est la quantité de liquide dans l'appareillage à l'arrêt.
- ❖ **La retenue dynamique** : c'est la quantité de liquide dans l'appareillage en cours de fonctionnement.

2.7.4. Efficacité

C'est le rapport du nombre théorique de plateaux par rapport au nombre réel de plateaux. L'efficacité dépend du reflux et de la verticalité de la colonne.

2.7.5. Finesse

La finesse permet de comparer des colonnes ayant la même efficacité et le même pouvoir séparateur pour un mélange.

La colonne présentant la plus grande finesse est celle qui a le plus faible volume de rétention.

2.7.6. Pertes de charge

C'est la force que doit vaincre la vapeur pour monter dans la colonne. Pour des obstacles rencontrés par la vapeur dans son mouvement ascendant, le liquide reflux et les changements de direction sont liés à la conception de la colonne [10].

2.8. Avantages d'une colonne à plateaux

-S'il y a présence de solides (particules, impuretés,...) dans le liquide ou dans le gaz à traiter, les colonnes à plateaux sont recommandées pour permettre la facilité du nettoyage.

-Prix moins élevé par unité de volume, surtout dans le cas où l'on traite des mélanges corrosifs.

-Faible perte de charge, ce qui est particulièrement intéressant lorsqu'on distille sous vide des constituants peu stables thermiquement.

-Dans les appareils à plateaux, on peut facilement introduire un serpentin de refroidissement [10]

2.9. Inconvénient

Rétention forte (*le liquide reste souvent en fin d'opération sur les plateaux*). La rétention est le volume de liquide et de vapeur condensée retenu dans la colonne et le condenseur. Ce volume doit être le plus faible possible [10].

2.10. Conclusion

On désigne sous le nom générique de distillation, les opérations fondamentales de transfert de matières et d'énergie permettant de séparer plusieurs composés possédant une différence de volatilité suffisante.

Cette séparation se réalise par une succession de vaporisations et de condensations. Elle est basée sur le fait qu'une vapeur produit par un liquide est en équilibre avec le liquide qui l'a générée. Elle est généralement enrichie en constituant le plus volatil. L'intérêt du passage par la phase vapeur est donc mis à profit, dans la distillation, pour séparer au moins deux composés en phase liquide.

La séparation est effectuée dans une colonne assurant le meilleur contact possible entre la vapeur ascendante et le liquide descendant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Abida, 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.
- [2] J. C. Cicile, *Distillation. Absorption : Généralités sur les colonnes de fractionnement*, Technique de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J 2 621, 1999.
- [3] J. C. Cicile, *Distillation. Absorption : colonnes à plateau*, Technique de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J 2 622, J 2 623, 1999.
- [4] P. Copigneaux, *Distillation. Absorption : colonne garnies*, Technique de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J 2 626, 1999.
- [5] J. P. Couriou, *Commande de procédés chimiques : réacteurs et colonnes de distillation*, HERMES Science publication Ltd-2001.
- [6] H. Fauduet, *Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique : Aspects théoriques et pratiques*, Paris, 1997.
- [7] J.L. Humphrey, G.E Keller, *Procédés de séparation*, Editions Dunod, paris, 2001.
- [8] Basse Sambre-E.R.I.SA Moustier-sur-Sambre, *Conduite de colonne de distillation Application sur simulateur*, ENSPM Formation industrie, 2002.
- [9] J. Thoma, B. Ould Bouamama, *Modélisation et simulation des processus thermiques et chimiques : Application des bond-Ggraphs en génie des procédés*, Juillet 1998.
- [10] P.Wuithier, *Raffinage et génie chimique*, tome 1. Edition Technique ; 1972.
- [11] P.Wuithier, *Raffinage et génie chimique*. tome 2. Édition Technique ; 1972.

ELEMENTS BOND GRAPHS ET MODELISATION

3

Table des matières

3.1. Introduction	46
3.2. Éléments bond graph	47
3.2.1. Représentation de l’outil Bond-graph	47
3.2.1.1. Représentation des transferts de puissance	47
3.2.1.2. Les variables mises en jeu	48
Variables de puissance	48
Variables d’énergie	48
3.2.2. Les éléments bond-graphs	49
3.2.2.1. Éléments passifs	49
L’élément R	50
L’élément C	51
L’élément I (<i>inertie</i>)	52
3.2.2.2. Éléments actifs (les sources)	53
3.2.2.3. Détecteurs	53
3.2.2.4. Éléments des jonctions	54
A. Jonction 0	54
B. Jonction 1	55
C. Transformateur TF	55
D. Gyrateur GY (transducteur TD)	55
3.2.3. Notion de causalité	56
3.2.3.1. Analyse de la causalité	56
3.2.3.2. Procédure d’affectation de la causalité	57
3.2.4. Matrice de transfert	58
3.2.5. Fonction de transfert	59
3.2.6. Equation d’état	59
3.2.6.1. Etablissement de l’équation d’état	59
3.2.6.2. Propriétés	59
3.2.7. Procédure (méthode systématique)	60

3.2.8. Variables de puissance en génie des procédés	60
3.2.8.1. Représentation par bond-graph à multiports	60
3.2.8.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond-graph.....	60
3.2.8.3. Les variables d'énergie en pseudo bond-graph.....	61
3.1.8.4. L'équation de Carnot.....	62
3.3. Modélisation par bond graph.....	62
3.3.1. Organigramme de modélisation	62
3.3.2. Niveaux de modélisation.....	62
3.3.2.1. Le niveau technologique	63
3.3.2.2. Le niveau physique.....	63
3.3.2.3. Le niveau mathématique	63
3.3.2.4. Le niveau algorithmique.....	64
3.3.3. Principe de la thermodynamique.....	64
3.3.4. Bond-graphs des systèmes thermiques.....	65
3.3.4.1. Phénomène de conduction.....	65
3.3.4.2. Entropie	66
3.3.4.3. Enthalpie.....	66
3.3.5. Modélisation de quelques phénomènes par bond graph.....	66
3.3.5.1. Présentation des classes de problèmes et choix des variables de puissance	66
3.3.5.1.1. Phénomènes de convection	66
3.3.5.1.2. Mélange eau-vapeur	67
3.3.5.1.2.1. Fluide à température normale.....	67
3.3.5.1.2.2. Mélange à température saturée.....	67
3.3.5.1.2.3. Variable de flux d'un accumulateur de vapeur.....	67
3.3.5.2. Eléments multiports de base en génie des procédés.....	68
3.3.5.2.1. Multiport <i>R</i> thermodynamique	68
3.3.5.2.2. Multiport <i>C</i> thermodynamique.....	69
3.3.5.3. Multiport <i>RS</i>	69
3.3.5.4. Source thermo-fluide.....	70
3.3.6. Bond-graph des systèmes chimiques.....	70
3.3.6.1. Potentiel ou tension chimique	70
3.3.6.2. Propriété de la tension chimique	71
3.3.6.3. Equations constitutives pour les gaz et les liquides	72
3.3.6.4. Equilibre chimique, thermique et hydraulique.....	73

3.3.6.5. Echange de masse entre deux substances.....	74
3.3.6.6. Bond-graph d'une réaction chimique.....	75
3.4. Changement de phase de la vapeur.....	76
3.4.1. Le condenseur.....	76
3.4.2. Présentation du condenseur.....	77
3.4.3. Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation.....	77
3.4.4. Phénomène de condensation.....	78
3.5. Modélisation du condenseur par bond-graph.....	79
3.5.1. Schéma de principe.....	79
3.5.2. Bond-graph à mots.....	79
3.5.3. Modèle bond-graph.....	80
3.6. Application.....	81
3.6.1. Application sur un modèle bond graph.....	82
3.6.1.1. Variation de la température en fonction du temps pour la phase vapeur.....	82
3.6.1.2. Variation de la température en fonction du temps pour la phase liquide, c'est-à-dire l'eau de refroidissement.....	84
3.6.1.3. Variation de la température par rapport au débit massique la vapeur.....	85
3.6.1.4. Variation de la température par rapport au débit massique de l'eau de refroidissement.....	85
3.6.2. Application sur un modèle paramétrique.....	86
3.6.3. Comparaison entre le modèle paramétrique et le modèle bond graph.....	87
3.7. Conclusion.....	88

3.1. Introduction

L'outil bond-graph, appelé aussi *Graphe à liens* ou *Graphe de liaisons*, défini par H. **PAYNTER** en 1961, est formalisé par [**KARNOPP, ROSENBERG, 1975,1983**], [**THOMA, 1975, 1990**] et est développé depuis le début des années 1990. C'est une représentation graphique d'un système physique (*mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique, ...*) qui représente les transferts d'énergie dans le système. Les bond-graphs sont basés sur le principe de la conservation de la puissance. Les liens d'un bond-graph sont des symboles qui représentent soit des flux d'énergie, soit des flux d'information. Comparés à une autre représentation visuelle du système en *schéma-bloc*, les bond-graphs présentent plusieurs avantages :

- Ils distinguent les flux d'énergie des flux d'information
- Puisqu'ils reposent sur le principe de la conservation de l'énergie, ils rendent impossible d'insérer de l'énergie inexistante dans le système.
- Ils mettent en évidence la *causalité* entre les efforts (*force, tension, pression*) et les flux (*vitesse, courant, débit*). Cette *causalité* est rajoutée une fois que le schéma initial a été construit. Ce qui permet entre autre, de détecter des phénomènes modélisés qui ne sont pas physiques tels qu'imposer un courant dans une bobine, la vitesse d'un volant d'inertie...etc.
- Comme chaque lien représente un flux bidirectionnel, les systèmes qui produisent des contre-efforts (ex: *force électromotrice* des moteurs) qui agissent sur le système se représentent sans ajout de boucle de contre-réaction.

La modélisation d'un système physique par bond-graph ne nécessite pas l'écriture de lois générales de conservation. Elle repose essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d'échanges de puissance dissipées et stockées au sein du système. Le modèle bond-graph se situe entre le système physique et les modèles mathématiques classiques (*matrices de transfert, équations d'état*). Le modèle peut être considéré comme un modèle de connaissance pour la simulation dont le but est de fournir les réponses du système à des oscillations connues, soit directement, soit à partir du bond-graph si le logiciel le permet, soit à partir des équations mathématiques qui en sont déduites. Une autre démarche consiste à considérer le modèle bond-graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, à la conception, à l'analyse et à la surveillance grâce à sa structure causale. La modélisation par bond-graph d'un système physique permet d'obtenir une représentation graphique indépendante du domaine étudié [1]. La méthodologie de la modélisation par Bond-Graph est réalisée en quatre étapes : Bond-Graph à mot (*schéma fonctionnel*) ; Modèle Bond-Graph ; Causalité et Mise en équation.

Le schéma de la figure 3.1 met en évidence le *Bond-graph* dans la modélisation :

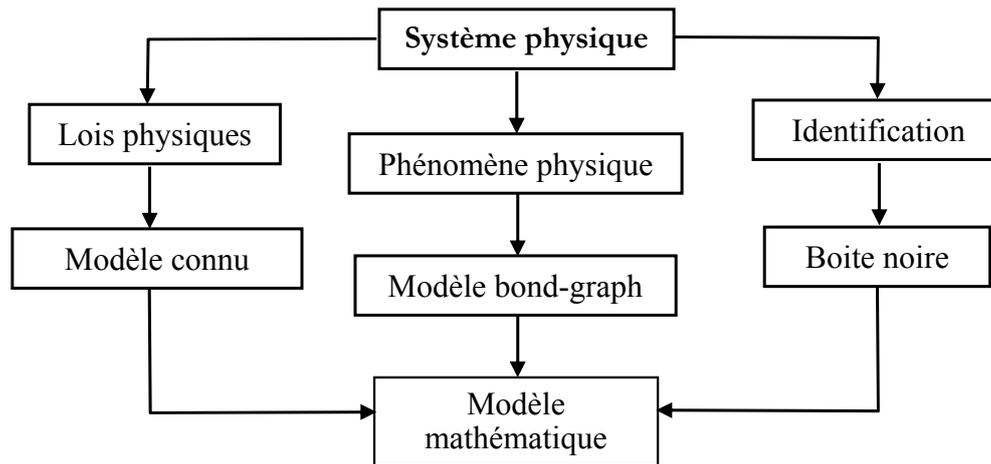


Figure 3.1 : Situation du modèle bond graph

La modélisation par bond-graph des systèmes à structure mécanique ou électrique a connu beaucoup de progrès par contre, la modélisation des systèmes thermiques, thermodynamiques ou tout simplement en génie de procédés reste encore un domaine ouvert en raison de la complexité de ces phénomènes [4]. Leur modélisation nécessite en conséquence une approche unifiée et capable de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'états [6].

L'application de cette approche unifiée pour la modélisation en génie des procédés est justifiée principalement par le fait que, par opposition à la modélisation de connaissance classique. On peut affiner le modèle en ajoutant ou en supprimant des éléments bond-graphs en fonction des hypothèses simplificatrices [9].

La construction d'un modèle bond-graph est réalisée en trois étapes qui sont :

- ❖ Décomposition du système à modéliser en sous systèmes;
- ❖ Reproduction graphique de tous les phénomènes physiques pris en compte dans l'hypothèse de la modélisation;
- ❖ Ecriture des lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées [1], [9], [12].

3.2. Éléments bond graph

3.2.1. Représentation de l'outil Bond-graph

Il y a deux types de représentation de la méthodologie bond-graph :

3.2.1.1. Représentation des transferts de puissance

On peut représenter le système physique sous forme bond-graph à mots. Cette forme conduit à décomposer le système à modéliser en sous-systèmes où il y a échange de puissance, et dans chaque système global (fermé) il y a non seulement conservation d'énergie mais aussi

continuité de puissance qui est toujours positive dont la représentation se fait par un **bond** qui correspond au flux d'énergie entre deux sous-systèmes [1], [3], [11].

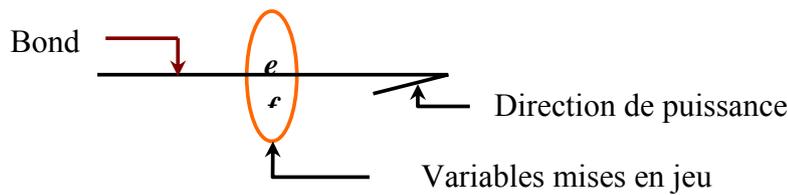


Figure 3.2 : Construction générale d'un Bond-graph

3.2.1.2. Les variables mises en jeu

Les variables mises en jeu dans la modélisation par Bond-Graph sont :

- **Variables de puissance :**

La puissance échangée P s'exprime par le produit de deux variables de puissances *effort* (e) et *flux* (f) [2], [9], et nous avons :

$$P = e.f \quad \dots 3.1$$

Par représentation, nous représentons le liens comme suit :

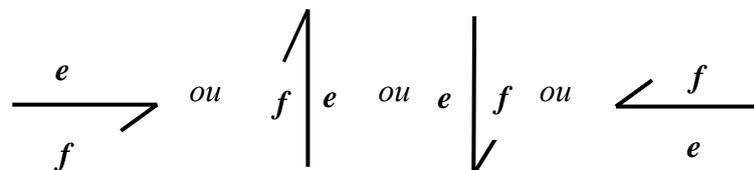


Figure 3.3 : Représentation générale d'un bond

- **Variables d'énergie :**

- L'énergie $E(t)$ qui passe à travers le bond est donnée par l'intégrale de la puissance par rapport au temps :

$$\begin{cases} E(t) = \int_0^t e(\tau)f(\tau) d\tau \\ E(0) = 0 \end{cases} \quad \dots 3.2$$

- Le moment généralisé (*impulsion*) $p(t)$ est donné par la relation suivante :

$$\begin{cases} p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau \\ p(0) = 0 \end{cases} \quad \dots 3.3$$

- Le déplacement $q(t)$ est donné par :

$$\begin{cases} q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \\ q(0) = 0 \end{cases} \quad \dots 3.4$$

Le tableau suivant présentera les variables associées aux variables généralisées dans plusieurs domaines physiques [9].

Domaine	Effort	Flux	Moment (impulsion)	Déplacement
	$e(t)$	$f(t)$	$p(t)$	$q(t)$
Mécanique de rotation	Couple [$N.m$]	Vitesse angulaire [Rad / S]	Impulsion angulaire [$N.m.s$]	Angle [Rad]
Mécanique de translation	Force [N]	Vitesse linéaire [m / s]	Impulsion [$N.s$]	Distance [m]
Electrique	Tension [$Volt$]	Courant [$Ampère$]	Flux magnétique [$Weber$]	Charge électrique [$Colomb$]
Hydraulique	Pression [Pa]	Débit volumique [m^3 / s]	Impulsion de pression [Pa / s]	Volume [m^3]
Thermique	Température [K^0]	Flux de chaleur [J / s]	-	Energie calorifique [J]
Thermodynamique	Température [K^0]	Flux d'entropie [$J / (K^0.s)$]	-	Entropie [J / K]
Chimique	Potentiel chimique [$J / mole$]	Débit molaire [$mole / s$]	-	Masse molaire [$mole$]

Tableau 3.1 : Signification des variables de puissance et d'énergie pour divers domaines physiques

3.2.2. Les éléments bond-graphs

Nous utilisons les éléments pour représenter des phénomènes qui lient les variables généralisées. Nous pouvons les séparer en trois catégories suivantes :

- ✓ Classe d'éléments passifs : R , C et I ;
- ✓ Classe d'éléments actifs : Se , Sf ;
- ✓ Classe d'éléments de jonction : 0 , 1 , TF , GY .
- ✓ Plus les détecteurs (De , Df).

3.2.2.1. Eléments passifs

L'élément R est dissipatif d'énergie, sous forme de chaleur. Les éléments I et C sont des éléments de stockage d'énergie. Les éléments passifs consomment la puissance et la transforment soit en énergie dissipée comme chaleur dans les éléments R , soit en énergie stockée dans les éléments I (énergie cinétique) et C (énergie potentielle). L'orientation de la demi-flèche

est donc entrante vers l'élément. Le tétraèdre de **Paynter** présenté par la figure 3.4, illustre les relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs (**R**, **I**, **C**). Ceux-ci peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire. Dans cette section, nous ne parlons que des éléments passifs ayant un seul lien de puissance entrant. Nous les appelons éléments passifs mono-ports [3], [9]. Une autre représentation donne la même information que le tétraèdre de Paynter, c'est le carrousel de **Thoma** donné par la figure 3.5.

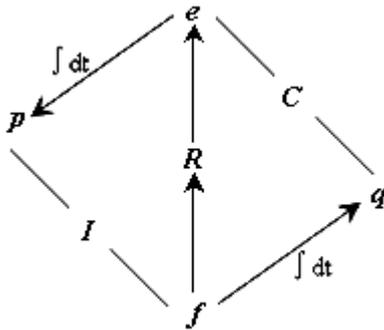


Figure 3.4 : Tétraèdre de Paynter

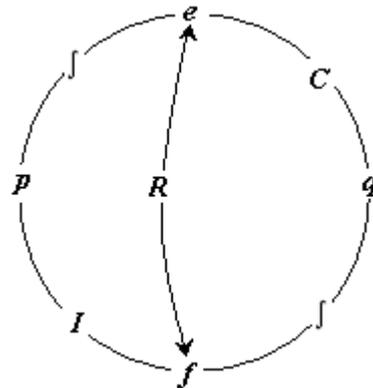


Figure 3.5 : Carrousel de Thoma

✓ **L'élément R :**

Cet élément est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant l'effort e et le flux f . La représentation générale de cet élément est donnée par la figure 3.6.

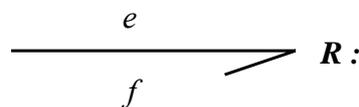


Figure 3.6 : Élément **R**

La loi qui le caractérise est :

$$\Phi_R = (e, f) = 0 \quad \dots 3.5$$

Si l'élément **R** est linéaire la relation entre l'effort et le flux est :

$$e(t) = R \cdot f(t) \quad \dots 3.6$$

Si l'élément **R** est non linéaire la relation entre l'effort et le flux est :

$$e(t) = \Psi_R \cdot f(t) \quad \dots 3.7$$

On trouve plusieurs cas si l'élément **R** est linéaire :

- Cas mécanique de translation : $F(t) = b \cdot V(t)$ b : frottement.
- Cas mécanique de rotation : $\tau(t) = B \cdot \omega(t)$ B : frottement.
- Cas électrique : $U(t) = R_1 \cdot I(t)$ R_1 : résistance.
- Cas hydraulique : $P(t) = R_2 \cdot Q(t)$ R_1 : résistance pneumatique.

R est un élément *dissipatif* d'énergie et la puissance qui lui est transmise est transformée en chaleur.

✓ **L'élément C :**

L'élément capacitif **C** modélise tout phénomène liant l'effort **e** au déplacement **q**. La représentation générale de cet élément est :

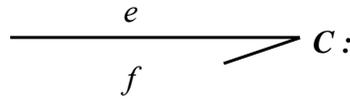


Figure 3.7 : Elément C

La loi qui caractérise l'élément C s'écrit :

$$\Phi_C(e, q) = 0 \quad \dots 3.8$$

Si l'élément C est linéaire la relation entre l'effort et le flux est :

$$q(t) = C \cdot e(t) \quad \dots 3.9$$

Si l'élément C est non linéaire on trouve :

$$q(t) = \psi_C \cdot e(t) \quad \dots 3.10$$

On obtient la forme intégrale suivante :

$$q(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t f(\tau) d\tau \quad \dots 3.11$$

Ce qui donne en linéaire :

✓ **En mécanique de translation :**

$$F(t) = K \cdot x(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t V(\tau) d\tau \quad \dots 3.12$$

Avec K : raideur d'un ressort.

✓ **En mécanique de rotation :**

$$\tau(t) = K_1 \cdot \theta(t) = K_1 \cdot \int_0^t \theta(\tau) d\tau \quad \dots 3.13$$

Avec K_1 : raideur d'un ressort de torsion.

✓ **En électrique :**

$$U(t) = \frac{q}{C_1} = \frac{1}{C_1} \cdot \int_0^t I(\tau) d\tau \quad 3.14$$

Avec C_1 : capacité d'un condensateur.

✓ **En hydraulique :**

$$P(t) = \rho \cdot g \cdot H = \frac{\rho \cdot g}{S} \cdot \int_0^t Q(\tau) d\tau \quad \dots 3.15$$

Avec $C = S/\rho$. g : capacité associée à une cuve.

L'élément C transforme la puissance qui lui est fournie en énergie stockée par la loi :

$$e = \psi_C \left(\int f dt \right) = \psi_C(q) = e(q) \quad \dots 3.16$$

Donc l'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_C = \int_{q_0}^{q_f} e(q) dq + E(q_0) \quad \dots 3.17$$

✓ L'élément I (inertie)

Il modélise tout phénomène physique liant le flux f au moment p . La représentation graphique de cet élément est donnée par la figure 3.8.

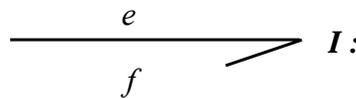


Figure 3.8 : Élément I

L'équation caractéristique de l'élément I est donnée par :

$$\Phi_I(p, f) = 0 \quad \dots 3.18$$

Si l'élément I est linéaire la relation entre l'effort et le flux est :

$$p(t) = I \cdot f(t) \quad \dots 3.19$$

Si l'élément I est non linéaire on trouve :

$$p(t) = \psi_I \cdot f(t) \quad \dots 3.20$$

La forme de $f(t)$ obtenue est une forme intégrale qui est donnée par l'expression:

$$f(t) = \frac{1}{I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \dots 3.21$$

Qui ce donne en linéaire les cas suivants:

❖ En mécanique de translation :

$$F(t) = M \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow V(t) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^t F(\tau) d\tau, \quad M : \text{masse en mouvements.}$$

❖ En mécanique de rotation :

$$\tau(t) = J \cdot \frac{dW}{dt} \Rightarrow W(t) = \frac{1}{J} \cdot \int_0^t \tau(\tau) d\tau, \quad J : \text{inertie en rotation.}$$

❖ En électrique :

$$U(t) = L \cdot \frac{dI}{dt} \Rightarrow I(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t U(\tau) d\tau, \quad L : \text{inductance d'une bobine.}$$

❖ En hydraulique :

$$P(t) = \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot S \cdot \frac{dQ}{dt} \Rightarrow Q(t) = \frac{1}{\rho \cdot \ell} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad I = \rho \cdot \ell / S : \text{inertie d'un fluide en mouvement.}$$

L'élément I est caractérisé par la loi :

$$f = \Psi_I \left(\int e dt \right) = \Psi_I(p) = f(p) \quad \dots 3.22$$

L'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_I = \int_{p_0}^{pf} f(p) dp + E(p_0) \quad \dots 3.23$$

3.2.2.2. Eléments actifs (les sources)

Les éléments actifs sont des sources d'effort ou de flux. Ces dernières peuvent avoir une valeur indépendante de toute influence extérieure (*par exemple la pesanteur*) symbolisées par Se pour des sources d'effort ou Sf pour des sources de flux, ou modulée selon un signal (*symbolisées par MSe ou MSf*). Ces éléments fournissent la puissance (*positive ou négative*) au système. Par conséquent, le sens de la *demi-flèche* sortant de l'élément est obligatoire.



Figure 3.9 : Représentation graphique des sources Se, Sf

3.2.2.3. Détecteurs

Nous utilisons les détecteurs d'effort De et de flux Df pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond-graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance; nous utilisons donc un lien de type signal (*une flèche*).



Figure 3.10 : Représentation graphique des détecteurs De, Df

Le tableau suivant résume les éléments bond-graphs avec des exemples dans quelques domaines physiques.

Eléments	symboles	Lois génériques	Exemples
Eléments actifs	Se	e indépendant de f	Générateur de tension ou de couple, pesantur, pompe à pression constante.
	Sf	f indépendant de e	Générateur de courant ou pompe à débit constant
Eléments passifs	R	$\Phi_R(e, f) = 0$	Résistance électrique, diode, frottement restriction thermique.
	C	$\Phi_c(e, q) = 0$	Ressort, condensateur, accumulateur, réservoir de stockage, élasticité.
	I	$\Phi_i(p, f) = 0$	Masse, inductance, inertie.
Détecteurs	De	-	Voltmètre, manomètre.
	Df		Ampèremètre, débitmètre, tachymètre.

Tableau 3.2 : Eléments du langage bond-graph

3.2.2.4. Eléments des jonctions

Les jonctions servent à coupler les éléments précédemment présentés. Celles-ci sont conservatives de puissance. Quatre types de jonction sont définis [2], [3]. Il s’agit des jonctions 0 , 1 , TF et GY .

A. Jonction 0 :

La jonction 0 sert à coupler les éléments soumis au même effort, les lois génériques qui la caractérisent sont :

$$\begin{cases} f_1 = f_2 = \dots = f_n & \text{(Caratéristique de la jonction 0)} \\ \sum_{i=1}^n a_i f_i = 0 & \text{(Bilan des puissances)} \end{cases}$$

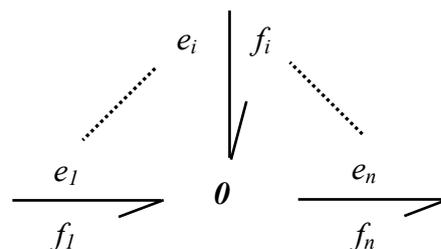


Figure 3.11 : Représentation de la jonction 0

B. Jonction 1 :

Elle associe les éléments soumis à un même flux et correspond à des éléments en parallèle, les lois génériques qui la caractérisent sont :

$$\begin{cases} e_1 = e_2 = \dots = e_n & (\text{Caractéristique de la jonction } 0) \\ \sum_{i=1}^n a_i e_i = 0 & (\text{Bilan des puissances}) \end{cases}$$

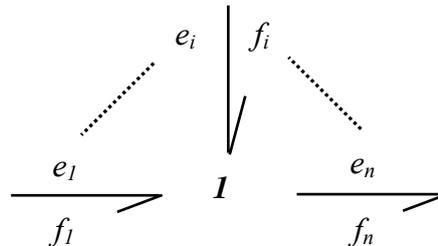


Figure 3.12 : Représentation de la jonction **I**

C. Transformateur TF :

L'élément **TF** possède deux ports, l'un en entrée et l'autre en sortie, qui modélise les éléments transformateurs d'énergie. Si le module **m** n'est pas constant, le transformateur est dit moduler et est noté par **MTF**, la variable **m** peut alors être continue ou booléenne.

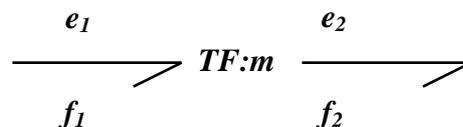


Figure 3.13 : Représentation de la jonction **TF**

L'équation constitutive est donnée par :

$$\begin{cases} e_1 = m.e_2 \\ f_2 = m.f_1 \end{cases} \quad \dots 3.24$$

D. Gyrateur GY (transducteur TD)

GY est un élément à deux ports l'un d'entrée et l'autre de sortie. Si le rapport du gyrateur **r** est variable le gyrateur est dit modulé (*commandé*), noté (**MGY**).

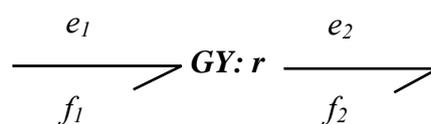


Figure 3.14 : Représentation de la jonction **GY**

L'équation constitutive est :

$$\begin{cases} e_1 = r.f_2 \\ e_2 = r.f_1 \end{cases} \quad \dots 3.25$$

3.2.3. Notion de causalité

Les éléments bond-graph permettent de représenter l'architecture d'un système physique où apparaissent les échanges de puissance entre les éléments. Le modèle mathématique sera représenté par l'ensemble des équations mathématiques déduites directement du modèle bond-graph par les équations constitutives (*des jonctions et des éléments*). L'une des propriétés importantes du modèle bond-graph est la causalité : en effet les bond-graphs permettent de définir la structure de calcul et d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. Ceci est un avantage évident sur les représentations graphiques. Pour décrire les relations de "cause à effet" et écrire les lois associées aux éléments sous forme causale mathématiquement solvable, il faut d'abord déterminer les variables qui sont imposées aux éléments (*les données*) et celles qu'imposent ces éléments (les conséquences). Dans un bond-graph, cette propriété est représentée par un trait orthogonal au lien, appelé trait causal [1], [3].

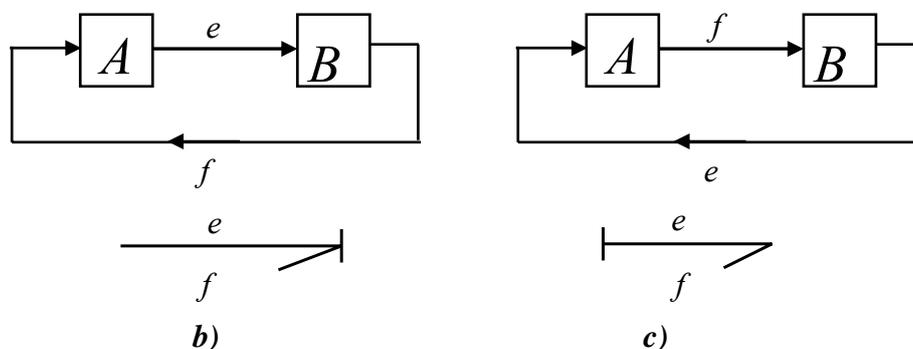


Figure 3.15 : Causalités en bond-graph et le schéma bloc

3.2.3.1. Analyse de la causalité

L'analyse des propriétés causales du graphes offre directement plusieurs types d'enseignement :

- L'existence d'une boucle causale de gain +1 sans passer par des éléments dynamiques **I** ou **C**, ou en passant par des éléments dynamiques dont les termes en s s'annulent n'est pas acceptable (terme nul au dénominateur de la fonction de transfert). Il faut transformer certaines causalités initialement intégrales en causalités dérivées pour éliminer le problème.
- Le cas où la causalité n'est pas unique conduit à l'obtention d'équations implicites qui peuvent provoquer des problèmes numériques lors de la simulation. Il faut rendre explicites ces équations, en cassant la boucle algébrique entre les éléments impliqués en ajoutant des éléments dynamiques qui fixent la propagation de causalité. Dans notre exemple, il suffit d'introduire un élément **C** à la jonction 0 pour fixer la causalité les éléments **R**. En fait, les éléments ajoutés correspondent souvent à des phénomènes physiques parasites négligés dans la modélisation [5], [12].

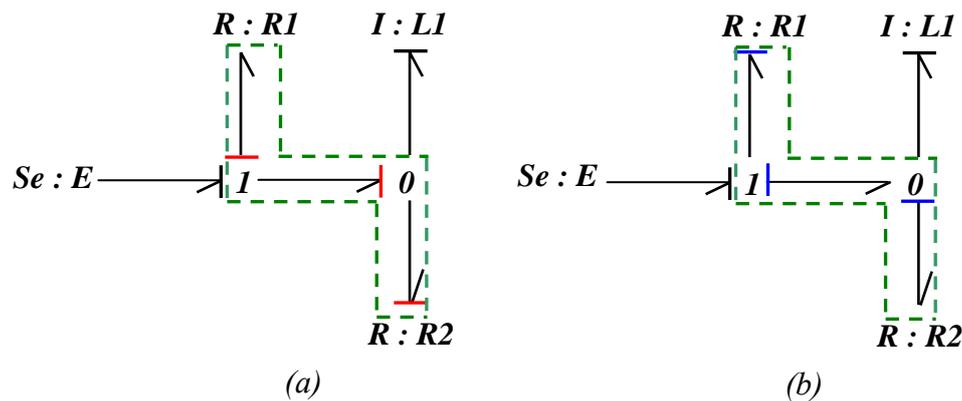


Figure 3.16 : Exemple de non unicité de la causalité entre les éléments $R1$ et $R2$, (a) ou (b)

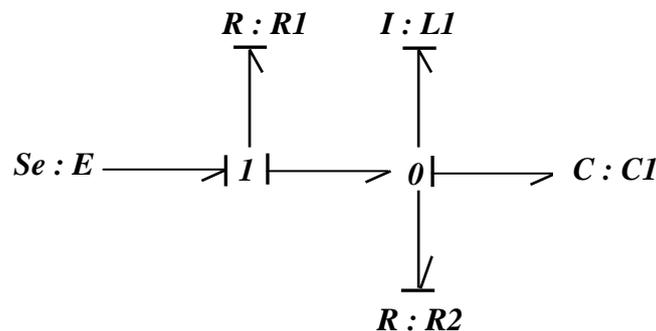


Figure 3.17 : Causalité unique

- Une causalité dérivée sur des éléments dynamiques conduit aussi à des équations implicites lors de la construction de l'équation d'état. Pour effectuer la simulation d'un modèle ayant ce type de causalité, il faut utiliser un solveur acceptant les équations implicites ou modifier le modèle pour supprimer la causalité dérivée en ajoutant des éléments dynamiques supplémentaires comme pour le cas de non unicité de la causalité.

3.2.3.2. Procédure d'affectation de la causalité

Après avoir affecté la causalité aux jonctions et aux éléments dans un modèle, nous obtenons un bond-graph causal. A partir de ce dernier, nous pouvons [9]:

- ✓ Affecter la causalité (*obligatoire*) aux sources et aux R non linéaires et répercuter sur l'environnement.
- ✓ Mettre les I et C en causalité intégrale préférentielle et répercuter sur l'environnement.
- ✓ Affecter les causalités aux jonctions 0 , I , TF , GY .
- ✓ Affecter les causalités aux éléments R linéaires en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.
- ✓ En cas de conflit à une jonction, rechercher l'élément I ou C cause du conflit et le mettre en causalité dérivée.
- ✓ Affecter une causalité aux détecteurs.

Remarque :

Le trait causal est placé près (*respectivement loin*) de l'élément ou jonction pour lequel l'effort (*respectivement le flux*) est une donnée [5].

Dans le tableau 3.3, sont représentées les règles d'affectation de causalité.

Elément	Causalité	Symbole	Loi générique
Eléments actifs	obligatoire	$Se \longrightarrow \perp$	e imposé par Se
		$Sf \perp \longrightarrow$	f imposé par Sf
Eléments passifs	intégrale	$\longrightarrow \perp I$	$f_I := \Psi_I \left(\int e_I(\tau) d\tau \right)$
		$\perp \longrightarrow C$	$e_C := \Psi_C \left(\int f_C(\tau) d\tau \right)$
	dérivée	$\perp \longrightarrow I$	$e_I := \Psi_I^{-1} \left(\frac{df_I}{dt} \right)$
		$\longrightarrow \perp C$	$f_C := \Psi_C^{-1} \left(\frac{de_C}{dt} \right)$
	arbitraire (cas linéaire) ou non arbitraire (cas non linéaire)	$\perp \longrightarrow R$	$e_R := R f_R$ $e_R := \Psi_R(f_R)$
		$\longrightarrow \perp R$	$f_R := \frac{1}{R} e_R$ $f_R := \Psi_R^{-1}(e_R)$
Jonctions	restriction de causalité	 1 trait causal loin de J-1	$\begin{cases} f_1 := f_i \\ \vdots \\ f_n := f_i \end{cases}$ $e_i := -a_1 e_1 - \dots - a_n e_n$
		 1 trait causal près de J-0	$\begin{cases} e_1 := e_i \\ \vdots \\ e_n := e_i \end{cases}$ $f_i := -a_1 f_1 - \dots - a_n f_n$
			$e_1 := m e_2$ $f_2 := m f_1$
			$e_2 := m^{-1} e_1$ $f_1 := m^{-1} f_2$
			$e_1 := r f_2$ $e_2 := r f_1$
			$f_1 := r^{-1} e_2$ $f_2 := r^{-1} e_1$

Tableau 3.3 : règles d'affectation de causalité

3.2.4. Matrice de transfert

Si le système possède m entrées et p sorties, le modèle est une matrice de transfert sous la forme :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ \vdots \\ y_p(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} N_{11}(s) & \dots & N_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{p1}(s) & \dots & N_{pm}(s) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_1(s) \\ \vdots \\ U_m(s) \end{bmatrix} \quad \dots 3.26$$

3.2.5. Fonction de transfert

L'équation de transfert est obtenue, dans le cas linéaire, en appliquant la **règle de Mason**.

Soit : e : variable d'entrée et Y : variable de sortie.

$$\frac{y(s)}{e(s)} = \frac{\sum_i T_i(s) \cdot D_i(s)}{D(s)} \quad \dots 3.27$$

Avec :

$$D(s) = 1 - \sum_i B_i + \sum_{i,j} B_i \cdot B_j - \sum_{i,j,k} B_i \cdot B_j \cdot B_k + \dots$$

$\sum_i B_i$: La somme des gains des boucles causales.

$\sum_{i,j} B_i \cdot B_j$: La somme des gains des boucles causales disjointes prises 2 à 2.

$T_i(s)$: Gain de la $i^{\text{ème}}$ chaîne d'action (cofacteur).

$D_i(s)$: se calcule comme $D(s)$ quand on a enlevé du bond-graph la $i^{\text{ème}}$ chaîne d'action du bond-graph [6].

3.2.6. Equation d'état

3.2.6.1. Etablissement de l'équation d'état

L'équation d'état peut s'établir à partir d'un modèle bond-graph où les variables d'état sont les variables d'énergie associées aux éléments **C** et **I** [3], [11]:

$$x = \begin{bmatrix} p_I \\ q_C \end{bmatrix} \quad \dots 3.28$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_I \\ f_C \end{bmatrix} \quad \dots 3.29$$

3.2.6.2. Propriétés

- Le vecteur d'état n'apparaît pas sur le **BG** mais seulement sa dérivée,
- L'ordre du système correspond à la dimension du vecteur d'état x , il est égal au nombre d'éléments **C** et **I** en causalité intégrale.
- Si parmi les n éléments **C** et **I**, il y a nd éléments en causalité dérivée donc la dimension du vecteur d'état est égale à $(n-nd)$, c'est l'ordre du système [3].

3.2.7. Procédure (méthode systématique)

Pour les éléments C et I en causalité intégrale, l'équation d'état est sous forme [3] :

$$\begin{cases} \dot{x} = A.x + B.u \\ Y = C.x + D.u \end{cases} \quad \dots 3.30$$

Où u est l'entrée et y est la sortie.

Pour obtenir cette équation d'état on peut procéder d'une manière systématique :

- ✓ Ecrire les lois de structure aux jonctions, et les lois associées aux éléments, en tenant compte de la causalité.
- ✓ Combiner ces lois pour obtenir les dérivées des variables d'état en fonction de ces dernières et des entrées.

3.2.8. Variables de puissance en génie des procédés

3.2.8.1. Représentation par bond-graph à multiports

Nous avons noté que les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisés par l'interaction des phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissances sont couplées. Elles seront représentées par un lien entouré par un anneau, comme indiqué sur la figure (3.18.a). Il existe aussi une autre représentation du bond-graphs multi domaines indiquée à la figure (3.18.b).

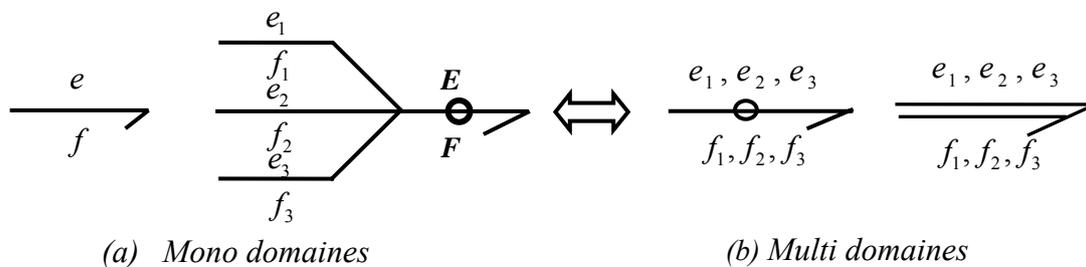


Figure 3.18 : Représentations des bond-graphs

3.2.8.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond-graph

Les systèmes mécaniques ou électriques sont modélisés par des bond-graphs dans 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*” avec l'utilisation en génie des procédés des variables d'effort thermique et chimique (*entropie, potentiel chimique*) de nature complexe. Ces variables sont mal adaptées aux problèmes de simulation, car elles n'obéissent pas à des lois de conservation simple. On introduit alors, pour leur modélisation des *pseudos bond-graphs* pour lesquels le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance [4], [8], [9].

Dans le tableau 3.4, sont représentées les variables de liaison en vrai et en pseudo bond-graph utilisées en génie des procédés.

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

Tableau 3.4 : Variables de puissance en génie des procédés

Afin de distinguer les différents types de puissance, nous désignerons, dans ce qui suit, par \dot{H} le flux d'enthalpie transporté par convection en *Watt (W)*, par Q , le flux thermique transmis par conduction (*W*) et par \dot{E} toute autre forme de puissance (*électrique, mécanique, ...*) [1].

3.2.8.3. Les variables d'énergie en pseudo bond-graph

Dans le tableau 3.5, sont représentées les variables d'énergie en pseudo bond-graph utilisées en génie des procédés.

Domaine	Déplacement : $q(t) = \int (\text{flux}) dt$	Moment : $p(t) = \int (\text{effort}) dt$
Chimique	Nombre de moles : $n = \int \dot{n} dt$	Moment : $p = \int P dt$
Hydraulique	Masse : $m = \int \dot{m} dt$	-
Thermique	Quantité de chaleur : $Q = \int \dot{Q} dt$	-

Tableau 3.5 : Variables d'énergie en génie des procédés

3.1.8.4. L'équation de Carnot

Par analogie avec l'électricité, nous définissons le flux de chaleur \dot{Q} (*quantité de chaleur transmise par unité de temps*) comme une puissance résultant du produit d'une "tension" T et d'un "courant" \dot{S} avec :

$$\dot{Q} = T \dot{S} \quad \dots 3.31$$

3.3. Modélisation par bond graph

3.3.1. Organigramme de modélisation

L'organigramme suivant montre les étapes à suivre pour l'obtention d'un modèle bond-graph :

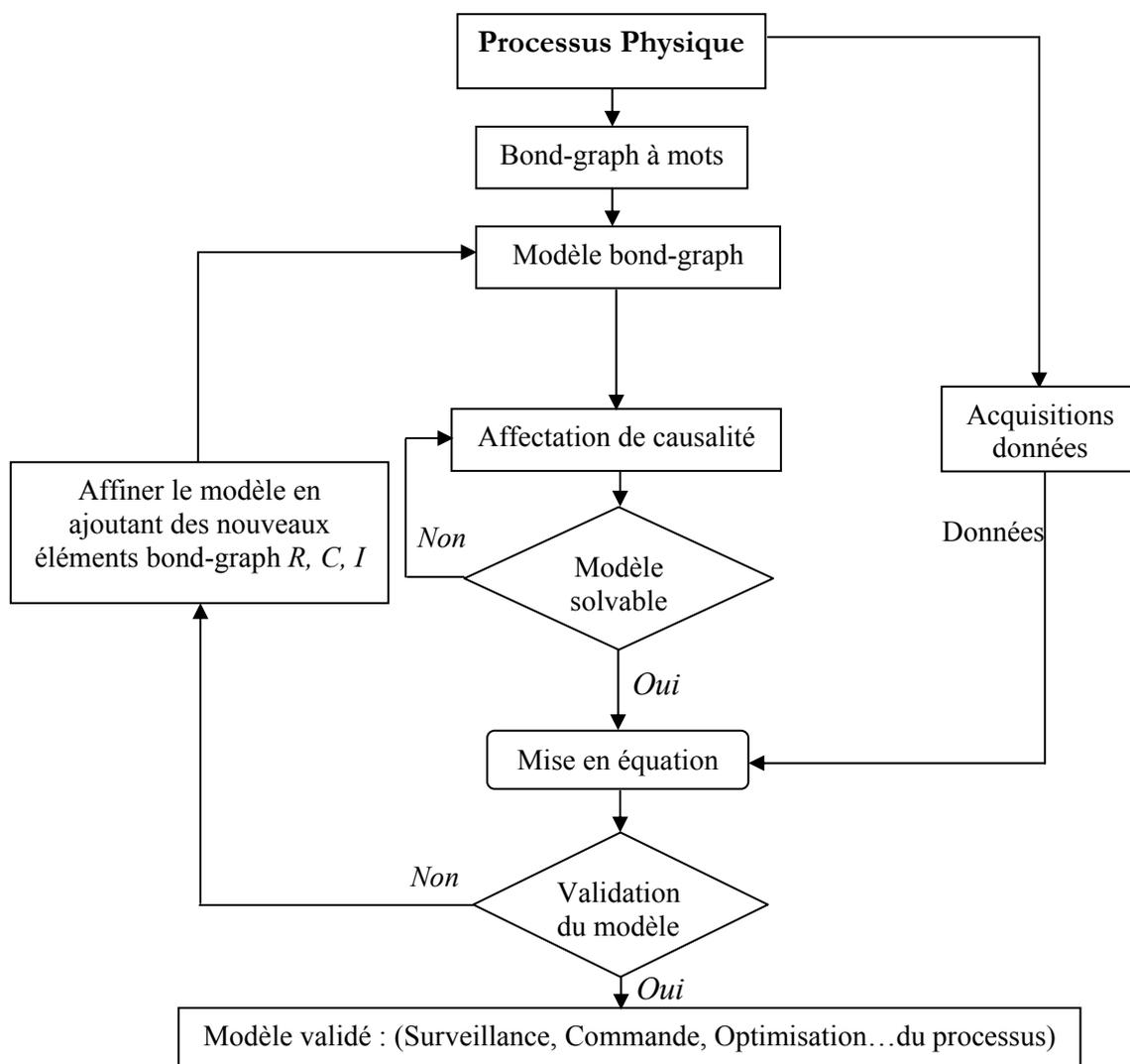


Figure 3.19 : Les étapes de modélisation par bond-graph

3.3.2. Niveaux de modélisation

Les méthodes de modélisation pour la représentation des systèmes sont nombreuses. Toutefois, chaque méthode de modélisation peut être classée selon son niveau de langage. On

distingue quatre niveaux de modélisation qui peuvent être représentées par le bond-graph [1], [6].

3.3.2.1. Le niveau technologique

Il est présenté par le bond-graph à mots. Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage des différents sous-systèmes. Les éléments de base sont des processus technologiques simples (échangeur de chaleur, bouilleur, conduite...). Dans ce type de modélisation, les langages de modélisation conduisent à une description normalisée sous forme de schémas technologiques. Cette description donne une modélisation facile à mettre en œuvre indiquant uniquement comment c'est réalisé. L'adéquation du modèle avec la réalité n'est pas vérifiée et les phénomènes physiques ne sont pas pris en considération que l'on appelle modèle type "boite noire" comme indiqué à la figure 3.18.

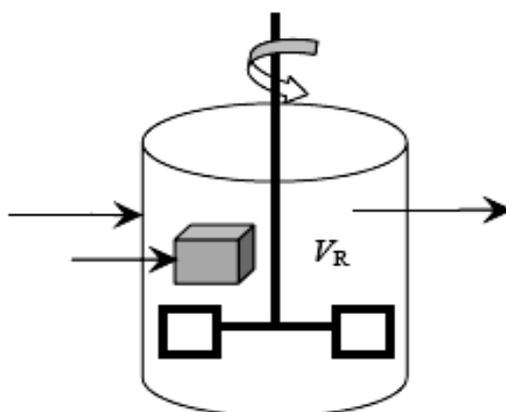


Figure 3.20 : Modélisation technologique

3.3.2.2. Le niveau physique

Le niveau physique consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront pris en considération dans la modélisation et reproduire l'architecture du système graphiquement, avec un langage unique pour tous les domaines physiques où apparaissent les échanges de puissance entre les éléments. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements.

3.3.2.3. Le niveau mathématique

Il consiste à écrire les lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées. Les éléments de base de ce niveau sont des opérateurs mathématiques: intégrateurs, dérivateurs et les fonctions algébriques. Ce modèle est sous forme d'équations ou de matrice de transfert dans le cas linéaire. Les modèles obtenus sont linéaires ou non linéaires, et la propriété de non linéarité du modèle peut être identifiée comme liée à la

structure et/ou aux composants. Les équations d'état sont déduites directement en parcourant le bond-graph.

3.3.2.4. Le niveau algorithmique

Il est lié directement au traitement de l'information. Les concepts manipulés sont donc des concepts informatiques. Ce niveau nous indique comment sont calculés les modèles. Les notions de causalité jouent un rôle important à ce niveau et permettent d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. La résolution numérique d'une intégrale est plus robuste que celle d'une dérivée, et insensible aux bruits. Ce niveau nous permet donc de représenter l'algorithme du modèle et la manière dont celui-ci doit être calculé. Il faut toutefois noter qu'en génie des procédés une analyse fonctionnelle permet de déduire une causalité naturelle pour les multiports C ou les processus de stockage d'énergie et une causalité quelconque pour les processus de transformation et de transport d'énergie modélisés en bond-graph.

Les avantages présentés par la modélisation bond-graph sont :

- ✓ Unicité du langage dans les domaines physiques ;
- ✓ Mise en évidence des relations de cause à effet dans le modèle ;
- ✓ Evolution du modèle bond-graph ;
- ✓ Outil d'analyse, on peut aussi avoir des renseignements sur les propriétés structurelles du système (*commandabilité, observabilité, surveillabilité*).

3.3.3. Principe de la thermodynamique

Les principes qu'on peut trouver dans tous les manuels spécialisés peuvent être résumés comme suit :

❖ Principe de conservation :

Il y a conservation universelle de l'énergie, qui est conservée quand elle est accumulée, elle change l'état de l'accumulateur et après son utilisation. Ou bien la somme algébrique des flux entrant et sortant d'un corps est nulle s'il n'y a pas d'accumulation d'énergie [9].

❖ Principe d'évolution :

Il existe une variable appelée *entropie* qui est liée à l'énergie par l'équation de Carnot. L'entropie ne peut pas être détruite mais générée par tout type de frottement.

- ❖ L'enthalpie de chaque corps est nulle. Il faut toutefois spécifier que ceci est valable pour un refroidissement lent moins qu'avec un refroidissement rapide.

3.3.4. Bond-graphs des systèmes thermiques

3.3.4.1. Phénomène de conduction

Dans le cas de la modélisation de la matière au repos que l'on rencontre en général dans les échangeurs de chaleur, dans les fours, dans les pertes thermiques à travers les parois etc., on peut utiliser aussi bien la paire température-flux d'entropie (T, \dot{S}) pour constituer un vrai bond-graph que la paire température-flux thermique (T, \dot{Q}) pour un pseudo-bond-graph.

L'utilisation de cette dernière est toutefois plus commode pour la modélisation du phénomène de conduction de chaleur [5], [6].

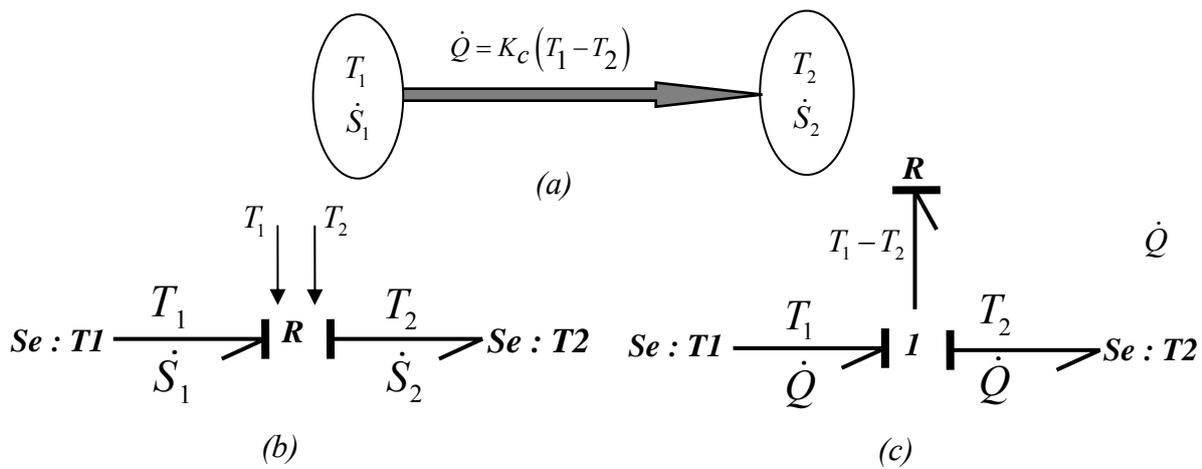


Figure 3.21 : Choix des variables de puissance pour le phénomène de conduction

En effet, le flux de chaleur échangé entre deux phénomènes thermiques est décrit par une simple équation constitutive en pseudo-bond-graph (analogue à la loi d'ohm en électricité):

$$\dot{Q} = K_c (T_1 - T_2) \quad \dots 3.32$$

Cette équation est représentée par la figure 5.4b. Par contre, l'utilisation du flux d'entropie conduit à écrire les lois sous forme non linéaire (équation [5.3]) couplée où les deux variables \dot{S}_1 et \dot{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 3.21.c.

L'expression des flux d'entropie est déduite de l'équation de Carnot :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}}{T_1} = \frac{K_1(T_1 - T_2)}{T_1} \\ \dot{S}_2 = \frac{\dot{Q}}{T_2} = \frac{K_2(T_1 - T_2)}{T_2} \end{cases} \quad \dots 3.33$$

3.3.4.2. Entropie

L'entropie d'un système monophasique est définie par :

$$dS = \frac{\delta}{T} Q \quad \dots 3.34$$

La quantité de chaleur échangée dQ est positive si le système reçoit de la chaleur, négative si le système cède de la chaleur. Un échauffement du système correspond donc à une augmentation de l'entropie.

3.3.4.3. Enthalpie

L'enthalpie est la fonction d'état, c'est une grandeur extensive définie par :

$$H = U + P.V \quad \dots 3.35$$

Ou, pour une unité de masse:

$$h = u + p.v \quad \dots 3.36$$

3.3.5. Modélisation de quelques phénomènes par bond graph

3.3.5.1. Présentation des classes de problèmes et choix des variables de puissance

Les systèmes thermofluides sont caractérisés par un ensemble de variables, qui est pour les efforts : la pression P et la température T , et pour les flux : le débit volumique et le flux d'entropie \dot{S} . D'autres variables peuvent aussi intervenir telles que le flux d'énergie interne \dot{U} , le flux d'enthalpie \dot{H} ou la qualité X d'un mélange eau-vapeur.

Le choix des variables de puissance n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser. Définissons le choix des variables de puissance pour quelques procédés types rencontrés en génie des procédés.

3.3.5.1.1. Phénomènes de convection

Dans un processus de convection, nous avons deux énergies couplées : hydraulique et thermique. Pour l'énergie hydraulique, on utilise comme variables de puissance la paire (P, \dot{m}) car le fluide est incompressible, ce qui évite alors de tenir compte de sa masse volumique.

Concernant la variable du flux thermique, le flux d'enthalpie \dot{H} est utilisé, puisqu'il représente la quantité d'énergie véhiculée par le fluide par unité de temps. En qualité de variable d'effort thermique, on utilise soit la température T , soit l'enthalpie spécifique h en fonction du type de processus à modéliser. En tenant compte que $h = c_p T$, le flux d'enthalpie totale est calculé alors par les expressions :

$$\dot{H} = \dot{m}.c_p.T = \dot{m}.h \quad \dots 3.37$$

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 H :

$$h = \frac{H}{m} \quad \dots 3.38$$

La détermination de la température nécessite par contre la connaissance de la chaleur spécifique c_p :

$$T = \frac{H}{m.c_p} \quad \dots 3.39$$

Toutefois, cette variable est mesurable par les capteurs, donc commode pour les boucles de commande. Examinons pour les principaux phénomènes rencontrés en génie des procédés, le choix de la variable d'effort thermique (h ou T). Pour les variables de puissance hydraulique, on utilise toujours la paire (P, \dot{m}) car en thermofluide, les énergies étant couplées.

3.3.5.1.2. Mélange eau-vapeur

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

3.3.5.1.2.1. Fluide à température normale

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.

3.3.5.1.2.2. Mélange à température saturée

Le mélange étant à saturation, on peut déterminer en équilibre thermodynamique, pour chaque température, l'enthalpie correspondante. La chaleur spécifique c_p varie sensiblement avec la température, il sera alors difficile de calculer le flux d'enthalpie en fonction de c_p et T .

Il suit alors qu'il est plus simple d'utiliser la paire flux d'enthalpie-enthalpie spécifique (h, \dot{H}) [6].

3.3.5.1.2.3. Variable de flux d'un accumulateur de vapeur

Analysons le choix de la variable de flux thermique lors de la modélisation d'un accumulateur d'un mélange eau-vapeur modélisé dont le schéma de principe suivant :

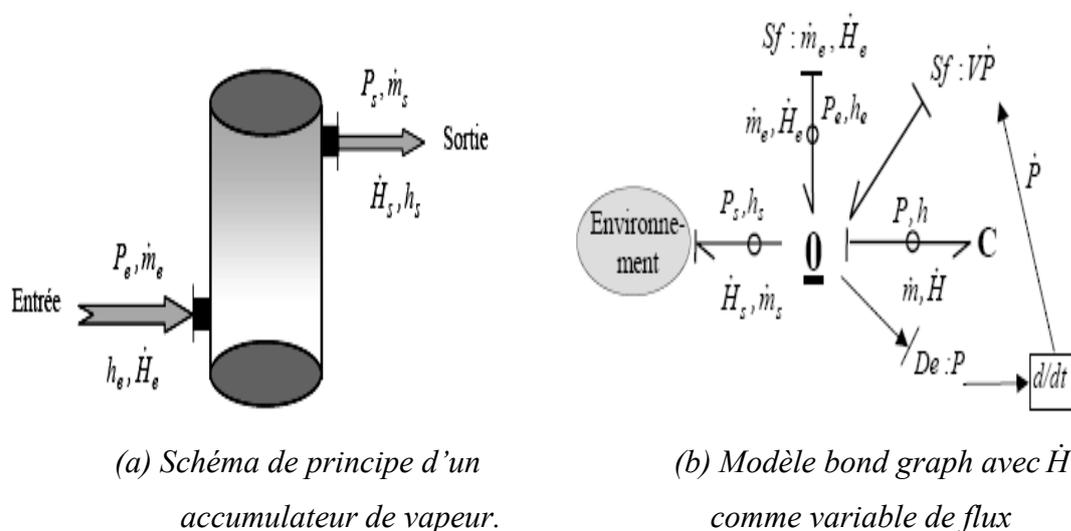


Figure 3.22 : Modèle bond graph d'un accumulateur avec \dot{H} comme variable de flux

En négligeant les énergies cinétiques et potentielles, la variation de l'énergie interne \dot{U} accumulée par un système thermodynamique ouvert est :

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad \dots 3.40$$

Où \dot{H}_e , \dot{H}_s et sont les flux d'enthalpie à l'entrée et à la sortie du système. \dot{E} est la puissance fournie par le système sous forme des forces de pression, égale au produit de la pression P par la variation du volume de la vapeur \dot{V} :

$$\dot{E} = -P\dot{V} \quad \dots 3.41$$

3.3.5.2. Eléments multiports de base en génie des procédés

3.3.5.2.1. Multiport R thermodynamique

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, ...*), le changement de phase de la vapeur (*évaporation, condensation*), le transfert thermique....

Dans le cas général, les efforts amont et aval sont imposés, et on détermine les flux thermiques \dot{H} et hydraulique \dot{m} . Cette causalité est naturelle dans un élément résistif de type convection dans une conduite ou conduction thermique dans un échangeur, c'est le flux thermique ou massique transféré qui est la conséquence d'une variation des efforts imposés comme montrée dans la figure suivante :

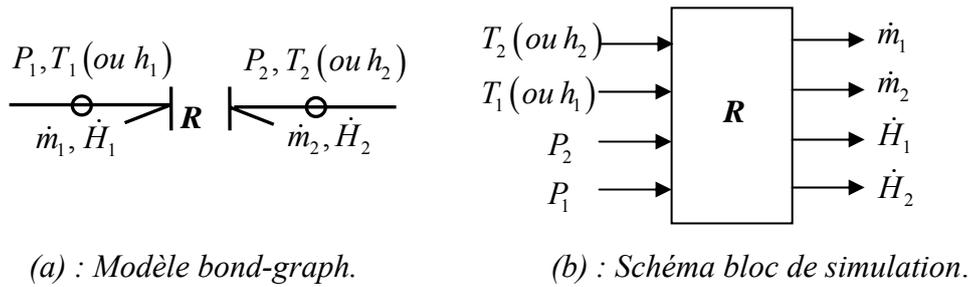


Figure 3.23 : Multiport R

Si les efforts hydrauliques (*pressions*) et thermiques (*températures*) sont désignés respectivement par le couple (P_1, P_2) (T_1, T_2) , la relation matricielle constitutive est :

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{R_1}(p_1, p_2, T_1, T_2) \\ \phi_{R_2}(p_1, p_2, T_1, T_2) \\ \phi_{R_3}(p_1, p_2, T_1, T_2) \\ \phi_{R_4}(p_1, p_2, T_1, T_2) \end{bmatrix} \quad \dots 3.42$$

3.3.5.2.2. Multiport C thermodynamique

Les multiports C représentent des accumulateurs d'énergies (chaudière, réservoir,...) et sont associés à un stockage d'énergie thermique et hydraulique. Mis en causalité intégrale, le multiport C en thermodynamique comporte deux variables d'état : la quantité d'énergie thermique (*température*) et hydraulique (*masse*). Les variables de puissance du multiport C sont la température et le flux d'entropie (*ou le flux d'enthalpie sur le lien thermique et la pression et le débit volumique (ou massique) sur le lien hydraulique*). Ce phénomène de couplage entre les effets thermiques et hydrauliques est plus important pour les gaz.

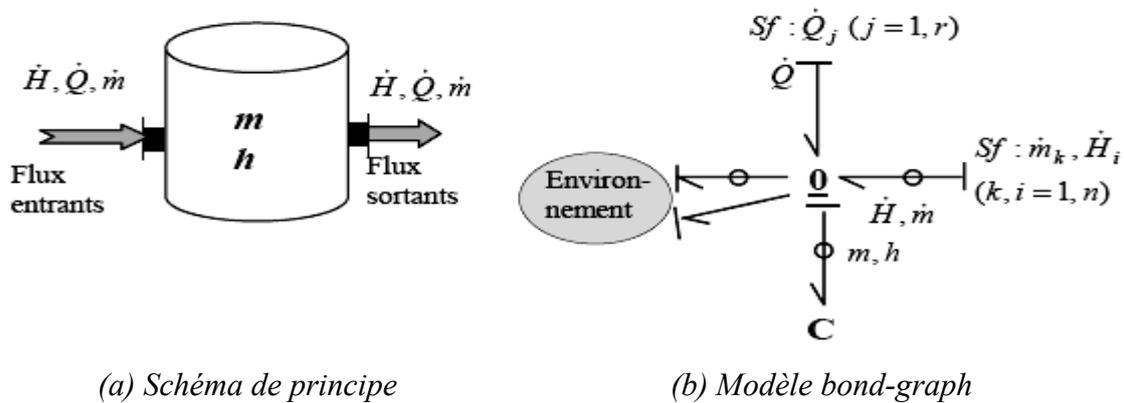


Figure 3.24 : Accumulateur d'énergie comme multiport thermodynamique

3.3.5.3. Multiport RS

En bond-graph, le symbole R représente tout phénomène dissipatif d'énergie sous forme de chaleur. Pour inclure les effets thermiques, on ajoute à celle-ci le symbole S comme source :

chaque élément RS est en même temps une source d'entropie et une source de chaleur qui sont évidemment liées par l'équation de Carnot. Ainsi, on arrive à un élément RS comme une structure qui conserve la puissance et est irréversible. L'élément C est mis en œuvre dans la suite pour la modélisation d'un condenseur, dont le stockage d'énergie hydraulique et thermique est représenté par cet élément qui couple ces deux énergies.

3.3.5.4. Source thermo-fluide

Dans les systèmes thermo-fluides, le couplage des deux énergies est quantifié par l'équation de couplage (3.43). A travers cette équation, on voit que le flux thermique est une fonction du flux hydraulique et de l'effort thermique [1] :

$$f_t = F(f_h, e_t) \quad \dots 3.43$$

La source thermo-fluide est, schématiquement, représentée comme suit :

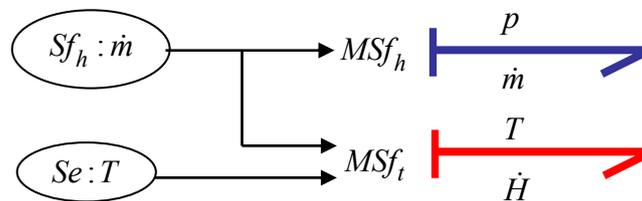


Figure 3.25 : Représentation d'une source thermofluide

Cette représentation est importante du point de vue physique et de point de vue analyse des systèmes de commande [9]. En effet, le modèle bond-graph nous montre bien que les véritables actionneurs sont le flux hydraulique $Sf_h : \dot{m}$ (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. Nous avons vu que les éléments bond-graph qui font intervenir dans leur équation caractéristique une seule variable d'effort et une seule variable de flux, sont des éléments impliquant une loi scalaire, par contre, dans certains cas, il n'est pas possible de représenter les phénomènes par des éléments passifs *I-port*.

3.3.6. Bond-graph des systèmes chimiques

3.3.6.1. Potentiel ou tension chimique

Nous avons considéré la modélisation des systèmes thermodynamiques à masse totale constante. Dans cette partie, nous allons développer la modélisation par bond-graph des systèmes chimiques et thermodynamiques à masse variable. Considérons d'abord un système chimique constitué d'un seul composant. Les variables décrivant cette phase sont T, S, P, V, μ et n . Par

rapport à un système sans transformation de matière, nous avons dans ce cas deux variables supplémentaires : le potentiel chimique μ et le nombre de moles n .

L'énergie interne accumulée par le système est décrite ici par l'équation de Gibbs

$$dU = TdS - PdV + \mu dn \quad \dots 3.44$$

Cette relation est représentée en bond graph par le multiport C à trois ports comme indiqué sur la figure 3.24 : deux ports associant les puissances thermodynamique et hydraulique et un lien supplémentaire de puissance chimique avec la tension chimique μ comme effort et le flux molaire \dot{n} . La relation [3.44] définit *la tension* ou *le potentiel chimique*, mais pour se familiariser, disons pour l'instant qu'elle montre la tendance d'un constituant chimique à s'étendre et s'élargir. En thermodynamique, la pression a pour conséquence une variation de volume et la température une variation d'entropie. La tension chimique est associée en chimie au transfert de matière. Il existe une similarité entre pression et 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. Elle dépend de la masse molaire n , du volume V et de l'entropie S . Ainsi, la tension chimique à entropie constante et volume constant est égale à :

$$\mu = \left(\frac{\partial U(S, V, n)}{\partial n} \right)_{S, V} \quad \dots 3.45$$

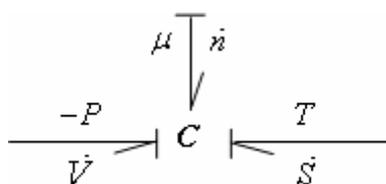


Figure 3.26 : Bond graph d'un système chimique avec une phase à masse variable

Le multi-port C est associé à l'accumulation de l'énergie chimique, hydraulique et thermique :

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^2 \mu_i \dot{n}_i \quad \dots 3.46$$

3.3.6.2. Propriété de la tension chimique

Pour étudier les propriétés du potentielle chimiques, prenons l'expression de l'enthalpie libre :

$$G(P, T) = U - Ts + PV \quad \dots 3.47$$

En tenant compte de cette équation et en imposant la pression P et la température T constantes, on déduit :

$$\mu = \frac{\partial G(P, T, n)}{\partial n} \quad \dots 3.48$$

La condition d'homogénéité des substances est traduite par le fait que certaines grandeurs physiques sont proportionnelles à la masse molaire n . En introduisant la densité de l'enthalpie que nous notons par g , on a alors :

$$G(P, T, n) = n \cdot g(P, T) \quad \dots 3.49$$

A partir de cette expression et de l'équation 3.48 on trouve :

$$\mu = \frac{dn g(P, T)}{dn} = g(P, T) \quad \dots 3.50$$

On conclut que pour les substances homogènes, le potentiel chimique est la dérivée de l'enthalpie libre par apport à la masse molaire à pression et température constantes. Dans ces conditions particulières, la tension chimique est égale à l'enthalpie libre par unité de masse [6].

3.3.6.3. Equations constitutives pour les gaz et les liquides

Déterminons ici la dépendance du potentiel chimique de la pression et de la température. Pour les gaz et les liquides on détermine d'abord l'entropie de la chaleur spécifique c_p .

$$S(T, P) - S(T_{ref}, P_{ref}) = \int_{T_{ref}}^T \frac{C_p}{T} dt = c_p \ln \frac{T}{T_{ref}} \quad \dots 3.51$$

Dans ce cas, la variable $S(T_{ref}, P_{ref})$ l'entropie de référence est importante, la dépendance de la tension chimique et de la pression est différent suivant que c est un gaz ou un liquide. Pour un gaz nous avons :

$$\frac{\partial \mu(T, P)}{\partial V} = v = \frac{V}{n} = \frac{R(T + T_{ref})}{P} \quad \dots 3.52$$

On intégrant cette équation on obtient :

$$\mu_{gaz}(T, P) - \mu_{gaz}(T, P_{ref}) = \int_{P_{ref}}^P R(T + T_{ref}) \cdot \frac{dp}{p} = R(T + T_{ref}) \cdot \ln \frac{P}{P_{ref}} \quad \dots 3.53$$

Pour les liquides, l'influence de la température sur la tension chimique est donnée par l'entropie spécifique par contre l'influence de la compressibilité sur la pression est négligeable :

$$\frac{\partial \mu(T, P)}{\partial P} = v = cste \quad \dots 3.54$$

$$D'o\grave{u} : \mu_{liq}(T, P) - \mu_{liq}(T, P_{ref}) = v(P - P_{ref})$$

Puisque v est en générale petit pour les liquides ($v = 10^{-3}$ pour l'eau), on peut négligée la dépendance de la pression avec $\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_{(P, V)} = -S$ et $\left(\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_{(T, S)} = v$

3.3.6.4. Equilibre chimique, thermique et hydraulique

Afin d'établir une analogie avec d'autres domaines d'énergie, examinons l'échange d'énergie entre deux substances différentes, contenues dans deux cylindres comme indiqué sur la figure 3.27. R_{hy} , R_{th} et R_{ch} désignent respectivement les résistances hydraulique, thermique et chimique.

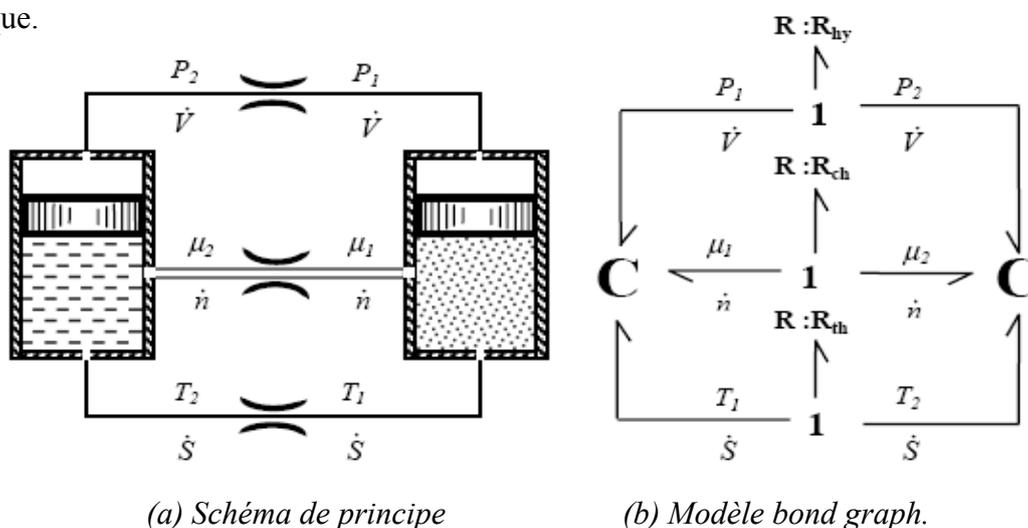


Figure 3.27 : Equilibre thermique, hydraulique et chimique entre deux cylindres contenant des substances différentes

Sous l'action des deux pistons agissant sur un fluide incompressible, il se produit alors entre les deux cylindres un échange de volume, c'est à dire l'écoulement d'un flux de masse jusqu'à obtention d'une égalité des pressions. Cet  tat correspond alors à un * quilibre hydraulique*. Nous avons représenté aussi une liaison thermique dans laquelle s'écoule un flux d'entropie jusqu'à ce que les températures des fluides contenus dans chacun des cylindres soient égales. Nous désignons cette égalité des températures comme la condition d'un * quilibre thermique*. En plus de ces deux liaisons nous avons une liaison permettant un échange de masse. Quand les deux tensions chimiques sont égales, il ne se produit plus d'échange de masse dans la liaison et l'on parle d'* quilibre chimique*. Le transfert de masse est produit par la force motrice qui est la différence des tensions chimiques. La différence de tension chimique est aussi à l'origine de la dynamique des réactions chimiques. Bien entendu, la tension chimique de chaque phase dans un système chimique dépend de la pression et de la température ; c'est pourquoi

est établi à égalité des tensions chimiques et que, si par contre elles sont grandes, l'équilibre est établi à égalité des pressions. [8]

3.3.6.6. Bond-graph d'une réaction chimique

Les réactions chimiques peuvent être représentées par les bond-graphs dans lesquels la tension chimique joue un rôle essentiel. Contrairement aux systèmes mécaniques et électriques à un degré thermodynamique moindre, la modélisation par bond-graph des réactions chimiques est peu développée. Soit une réaction chimique entre deux substances A et B qui réagissent entre elles pour donner deux produits de réactions C et D selon l'équation :



v_A, v_B, v_C et v_D : sont les coefficients stoechiométriques, k_f et k_r sont les constantes de vitesse de réaction direct (Forward) et inverse (Reverse).

Pour introduire graduellement la représentation des réactions chimiques par les bond graphs, modélisons la réaction ci-dessus en tenant compte uniquement des phénomènes de transformation. Sur la figure 3.30, les éléments C ($C_A, C_B, C_C,$ et C_D) sont des capacités représentant le stockage de la matière. Chaque produit chimique est représenté par le couple des variables de puissance (μ_i, \dot{n}_i).

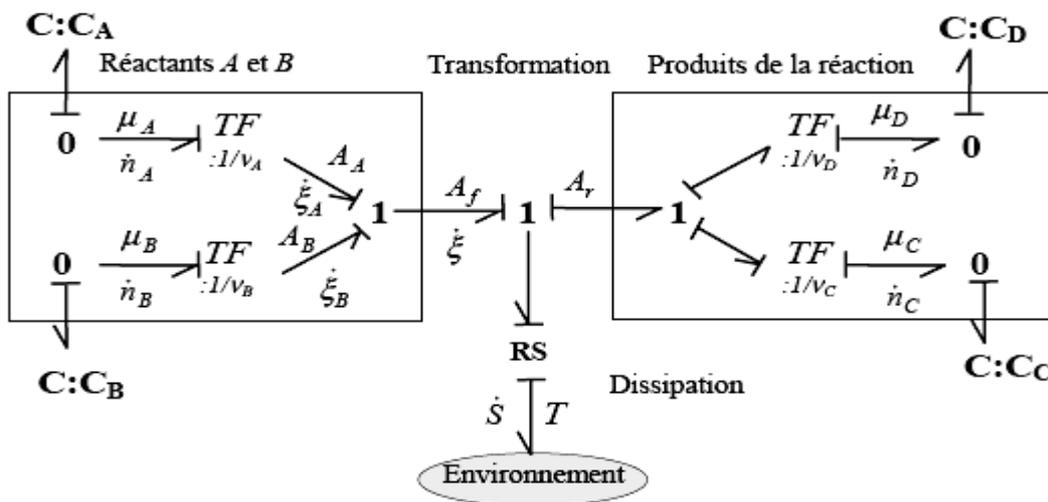


Figure 3.30 : Modèle bond graph des phénomènes de transformation d'une réaction

La vitesse de la réaction est gouvernée par la résistance pour laquelle différente théorie de la cinétique chimique.

➤ **Résistance chimique**

La quantité de matière transportée par diffusion de l'espèce i peut être exprimée par la première loi de Fick :

$$\xi_i^d = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad \dots 3.56$$

ξ_i^d : est le flux de diffusion, D_i le coefficient de diffusion et x la variable espace.

Toutefois, du point de vue thermodynamique et du bond graph, la force (*effort*) d'entraînement pour la diffusion est le gradient du potentiel chimique et non la concentration C_i .

La résistance chimique détermine la rapidité de la réaction qui ne peut s'étendre d'une durée pratiquement nulle (*explosion*) à une durée pratiquement infinie [8].

➤ *Capacité chimique*

Sachant que la concentration C_i est liée à l'intégrale du flux molaire \dot{n} , l'équation [3.46] peut s'écrire :

$$\Psi_C(\mu, \int \dot{n} dt) = 0 \quad \dots 3.57$$

Ce qui est bien une équation constitutive d'une capacité chimique en bond graph. Toutefois, il faut préciser qu'en général, l'équation est de la forme $n = \Psi_C(\mu_i)$ dont la dérivée donne :

$$\dot{n}_i = \frac{\partial \Psi(\mu_i)}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu_i}{dt} \quad \dots 3.58$$

En notant par $\frac{\partial \Psi(\mu_i)}{\partial \mu} = C_i$, la capacitance, on déduit de l'équation [5.23] la relation

classique d'un élément C liant l'effort et l'intégrale du flux (le déplacement) $\Psi_C(e, \int f dt) = 0$

$$\mu_i = \frac{1}{C_i} \int \dot{n}_i dt \quad \dots 3.59$$

Où \dot{n}_i est le flux molaire traversant la capacité.

Notons qu'on peut utiliser un pseudo-bond graph pour modéliser la réaction. Dans ce cas, en qualité d'effort on utilise les concentrations des substances au lieu des tensions chimiques [8].

3.4. Changement de phase de la vapeur

Dans ce processus, on distingue deux phénomènes “ *l'évaporation et la condensation* ” où on s'intéresse à cette dernière qui est réalisée par un condenseur d'une colonne de distillation [9].

3.4.1. Le condenseur

Le condenseur est un appareil d'échange thermique qui a pour rôle d'engendrer le flux liquide et permet principalement de transformer la vapeur en liquide d'une part et de refroidir le

flux de vapeur en le faisant changer d'état d'autre part, c'est donc un *échangeur-condenseur*. Ces deux rôles sont thermodynamiquement liés c'est-à-dire lors de la transformation vapeur liquide, la vapeur se refroidit forcément, et lorsque l'on refroidit suffisamment la vapeur, elle se transforme en liquide.

3.4.2. Présentation du condenseur

Le condenseur est un module de quatre entrées-sorties '*entrée vapeur, sortie liquide, entrée-sortie du fluide de refroidissement*'. Il est composé d'un circuit de refroidissement constitué d'un ensemble de tubes qui conduisent le liquide dit de refroidissement (*l'eau*). Le liquide de refroidissement entre froid, accumule la chaleur en passant dans la vapeur puis sort chaud. Selon l'élévation de la température on distingue deux circuits de refroidissement :

- ✓ Si l'élévation est peu importante, le liquide de refroidissement fonctionne en boucle fermée, il se refroidit grâce aux pertes thermiques lors de son retour à l'entrée du condenseur et le circuit est dit *court*.
- ✓ Si l'élévation est plus importante, les pertes thermiques ne suffisent plus, il est donc préférable de refroidir le liquide par un aéroréfrigérant, le circuit de refroidissement est dit *long*.

Quand le flux de vapeur arrive et passe dans le condenseur, un contact s'obtient entre cette vapeur et les tubes du circuit de refroidissement dans lequel circule le fluide de refroidissement froid. La vapeur se condense en fines gouttelettes qui se forment au fond du condenseur, c'est ce qu'on appelle *condensât* [10].

3.4.3. Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation

La vapeur en circulation dans la colonne provient, pour une partie, de l'alimentation quand elle est vaporisée et surtout du rebouilleur dans lequel le mélange liquide du début est chauffé pour le revaporiser. Les vapeurs qui arrivent dans la ligne de tête de la colonne sont condensées soit totalement par un condenseur total, soit partiellement par un condenseur partiel. Lorsque la vapeur arrive en contact des tubes de refroidissement dans lesquels circule le liquide de refroidissement froid, elle se condense en liquide qui s'écoule vers le bas par simple gravité et recueille en fond du condenseur et forme le *condensât*.

Une partie du liquide obtenu est renvoyée généralement dans la colonne sous le nom de *reflux* par une tubulure de reflux qui joue le rôle d'une tubulure d'alimentation, amorçant le flux liquide [10]. L'autre partie est recueillie comme un distillat et la partie non vaporisée de l'alimentation vient également contribuer au débit liquide. L'opération se répète, en assurant la condensation des vapeurs de tête de la colonne.

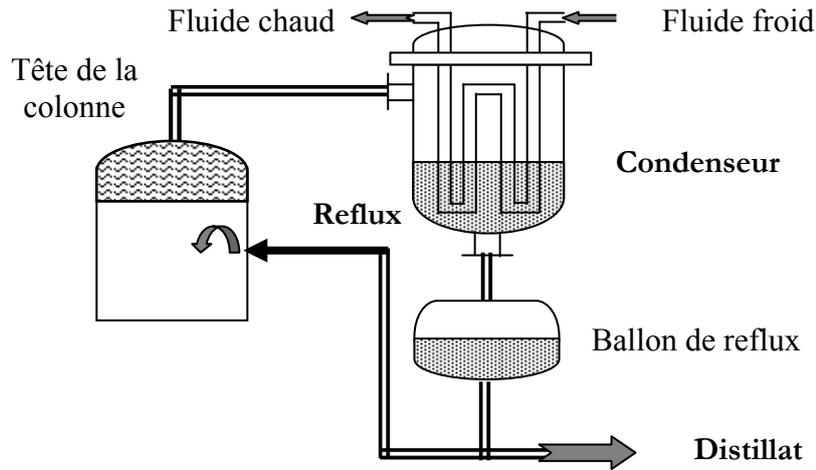


Figure 3.31 : Fonctionnement du condenseur d’une colonne de distillation

3.4.4. Phénomène de 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 se produit par échange de chaleur avec un corps plus froid. En présence deux phénomènes thermiques qui se déroulent simultanément : phénomène de conduction de la chaleur vers un fluide solide refroidissement et convection du condensât. On utilise 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 qu’hydrauliques [9]. Le phénomène de condensation peut être représenté par le modèle bond-graph simplifié de la figure 3.32, [7].

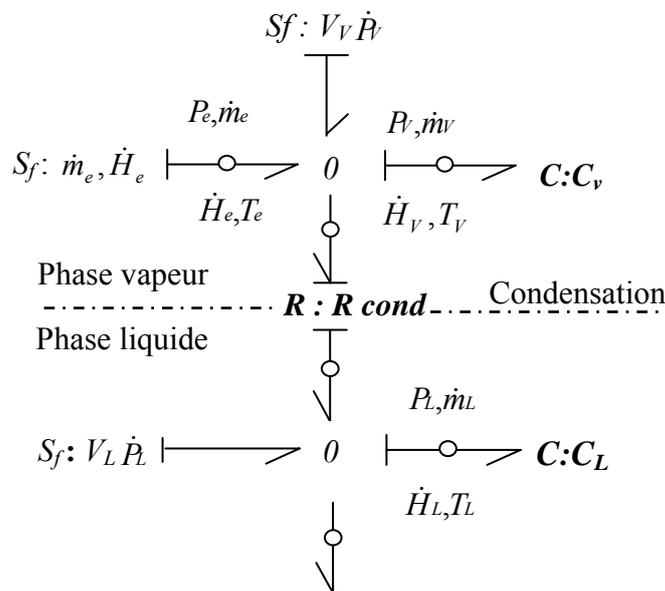


Figure 3.32 : Modèle en pseudo-bond-graph simplifié du procédé de condensation

3.5. Modélisation du condenseur par bond-graph

3.5.1. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un condenseur est donné par la figure 3.33.

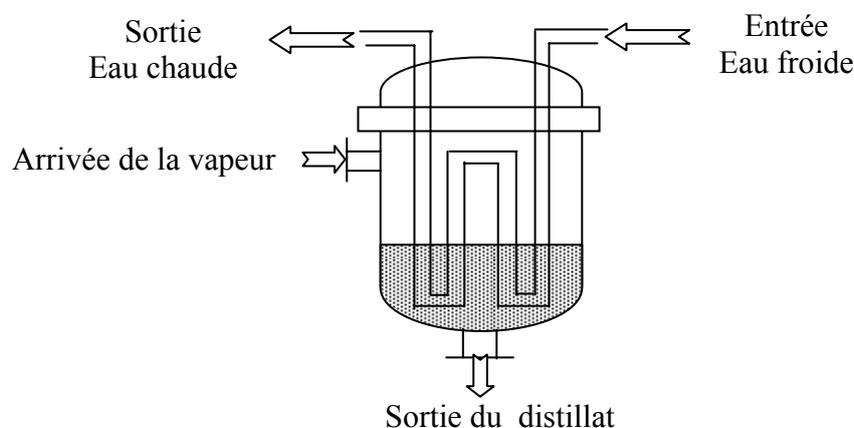


Figure 3.33 : Schéma de principe

Le système à modéliser est un condenseur comme le montre la figure 3.33, qui représente un sous-système d'une colonne à distiller. La vapeur arrivant de ballon de la tête de la colonne est condensée au contact des serpents du circuit de refroidissement dans lesquels circule l'eau froide arrivant à la température réglée à 20°C . Le liquide condensé (*distillat*) dont le niveau est contrôlé en tout ou rien par la vanne de décharge est évacué vers un accumulateur du distillat.

3.5.2. Bond-graph à mots

C'est la première étape de modélisation par bond-graph, il consiste à décomposer le système à modéliser en sous-systèmes. A chacun entre eux sont associés les phénomènes pris en compte dans la modélisation. L'interconnexion des composants est assurée par des variables de puissance. Cette représentation est appelée bond-graph à mots (*ou Word bond-graph*). Elle constitue l'étape technologique de la modélisation [9].

Nous avons représenté dans la figure 3.34, le bond-graph à mots où les transferts de puissance par des liens qui portent les variables du pseudo bond-graph car les variables de puissance utilisées sont : la température T , le débit massique \dot{m} , la pression P et le flux d'entropie \dot{H} , (*le choix des variables de puissance n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser*). Le serpentin du circuit de refroidissement est divisé en trois sections : à l'entrée du condenseur au contact de la vapeur, dans le liquide du condensât et à la sortie au contact de vapeur. Au niveau de ce contact, le changement de phase de la vapeur s'accompagne de la libération de sa chaleur de vaporisation et le liquide est refroidi à une température inférieure à la température de saturation.

On considère que [6]:

- Le condenseur est parfaitement calorifugé;
- Les paramètres sont localisés;
- La vapeur dans le condenseur est à saturation.

Le bond graph à mots est représenté par la figure 3.34.

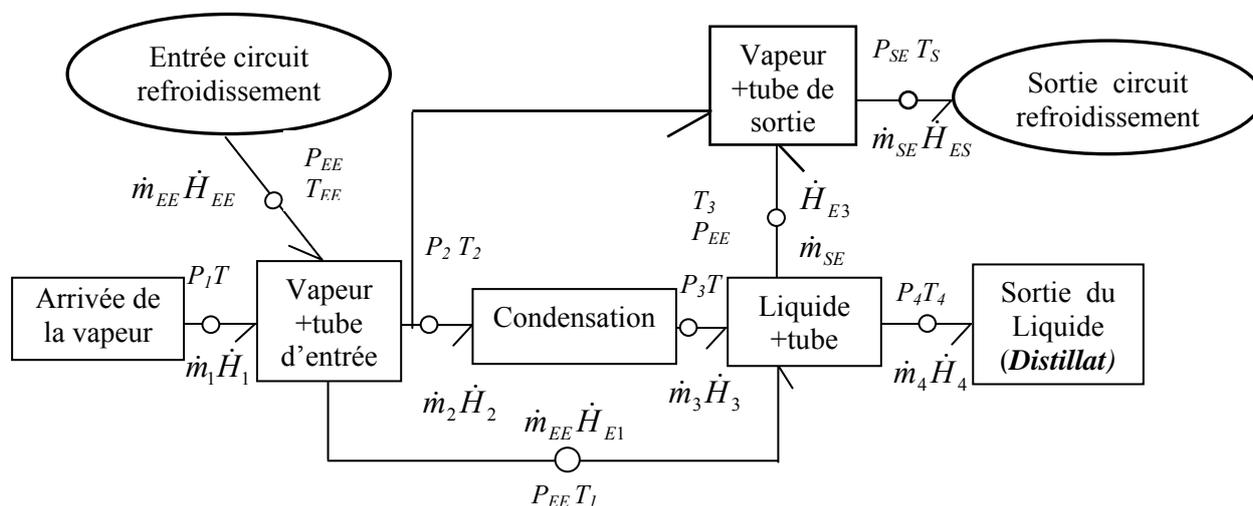


Figure 3.34 : Bond-graph à mots du condenseur.

Les phénomènes d'échange de chaleur interviennent entre les deux fluides (*la vapeur et l'eau de refroidissement*) à travers la paroi au niveau des tubes (*les trois sections*). Nous sommes en présence de deux phénomènes qui se déroulent simultanément : le phénomène de conduction de la chaleur vers le fluide de refroidissement (*eau*) et la convection du condensât. En plus, on a les deux énergies : hydraulique et thermique.

3.5.3. Modèle bond-graph

Cette étape décrit les phénomènes qui sont pris en considération dans la modélisation et permet de représenter graphiquement tous ces phénomènes. Nous devons en conséquence poser les hypothèses de modélisation, pour recenser les phénomènes à modéliser.

Dans le système étudié, nous avons les variables suivantes :

Les températures moyennes des tubes (*entrée vapeur, dans le liquide et à la sortie*) et les deux énergies thermique et hydraulique accumulées par la vapeur et le condensât. Ces variables sont modélisées par des éléments C simples C_{T1} , C_{T3} , C_{TS} et un élément C à deux ports (C_v et C_l). La condensation de la vapeur autour des tubes est modélisée par le multi-port R (**R_{cond}**). Les éléments dissipatifs R_{T1} , R_{T3} , R_{TS} modélisent les échanges de chaleur par conduction au contact des tubes dans les trois sections.

Le modèle bond-graph détaillé est donné par figure 3.35.

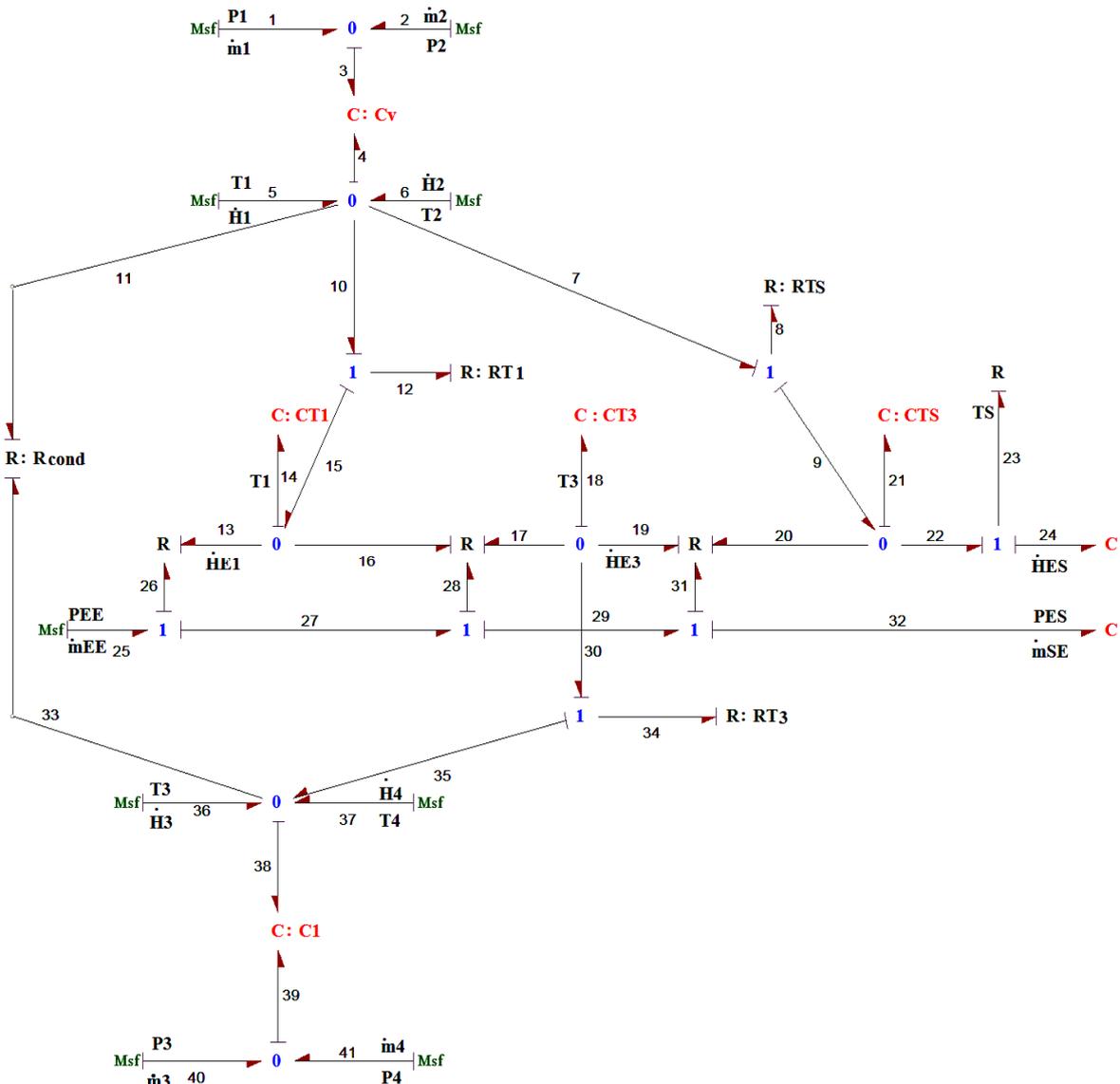


Figure 3.35 : Modèle bond graph du condenseur d'une colonne de distillation

3.6. Application

Simulation et la réalisation d'un essai hors système en employant le modèle mathématique pour effectuer des essais des expériences numériques. Elle permet dans un premier temps de valider le modèle en comparant les résultats de l'expérience et de la simulation, puis l'extrapolation des conditions dans un cadre limité. Elle apporte un grand nombre d'avantages par rapport à une démarche basée sur l'expérience, elle permet donc d'étudier les phénomènes pour lesquels l'expérience n'est pas possible. La simulation d'un système en temps continu est généralement obtenu par un algorithme d'intégration numérique, l'utilisateur doit choisir celui qui est le mieux adapté : méthode, pas de calcul et précision. Le temps de simulation ne dépend pas de la complexité du système, du choix et des réglages de

l'algorithme d'intégration numérique et des performances de la machine informatique qui exécute la simulation.

3.6.1. Application sur un modèle bond graph

Cahier de charges

On a fait une expérience dans laboratoire de chimie Moléculaire, de contrôle de l'environnement et de mesures Physico-chimiques (*département de chimie de l'université MENTOURI de Constantine*), où on a vue l'opération de distillation d'un mélange binaire (*eau + méthanol*) avec une colonne de distillation (*UPO3A*). A fin de valider notre modèle, on a utilise le logiciel Symbols 2000 avec le cahier de charge du tableau 3.6.

<i>Phénomène</i>	<i>Variable</i>	<i>Valeur</i>
Température d'ébullition du méthanol	$T_v [C^\circ]$	65
Température d'entrée d'eau du circuit de refroidissement	$T_{EE} [C^\circ]$	20
Température de sortie d'eau du circuit de refroidissement	$T_{SS} [C^\circ]$	40
Température de sortie de distillat	$T_S [C^\circ]$	26
Débit massique d'entrée de vapeur	$\dot{m}_v [Kg/s]$	53
Débit massique d'entrée d'eau	$\dot{m}_{EE} [Kg/s]$	55
Capacité calorifique d'eau	$C_e [Cal/g.K^\circ]$	0.71
Capacité calorifique du méthanol	$C_m [Cal/g.K^\circ]$	0.69
La pression de la colonne	$P [atm]$	1
La surface de contact	$S [m^2]$	2

Tableau 3.6 : caractéristiques

La simulation des systèmes en général réside dans la représentation des paramètres et dans notre cas et de suivre l'évolution de la température pour les deux phases (*liquide et vapeur*) dans les trois sections par rapport à d'autres variables telles que le temps, le débit massique de vapeur et celui de l'eau de refroidissement. La partie simulation au niveau du condenseur nécessite surtout d'enlever les variations de la température dans les trois sections au niveau de condenseur. Les résultats de simulation sont illustrés par les figures représentées ci-dessous :

3.6.1.1. Variation de la température en fonction du temps pour la phase vapeur

Les figures 36, 37 et 38 montrent la variation de la température du vapeur dans les différentes régions :

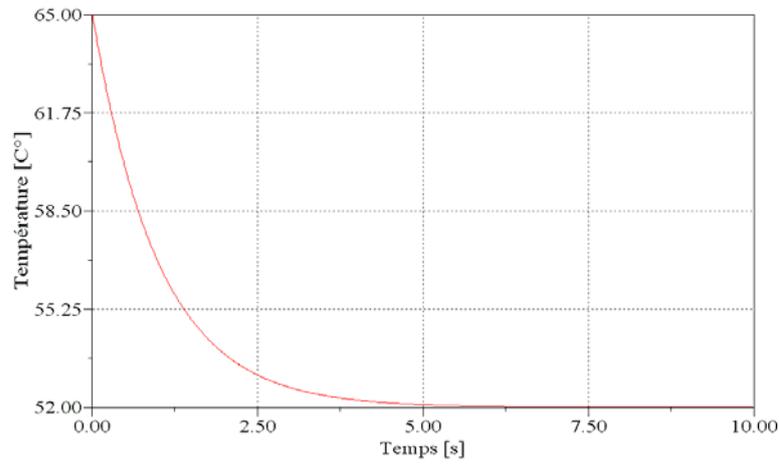


Figure 3.36 : Variation de la température à l'entrée du condenseur

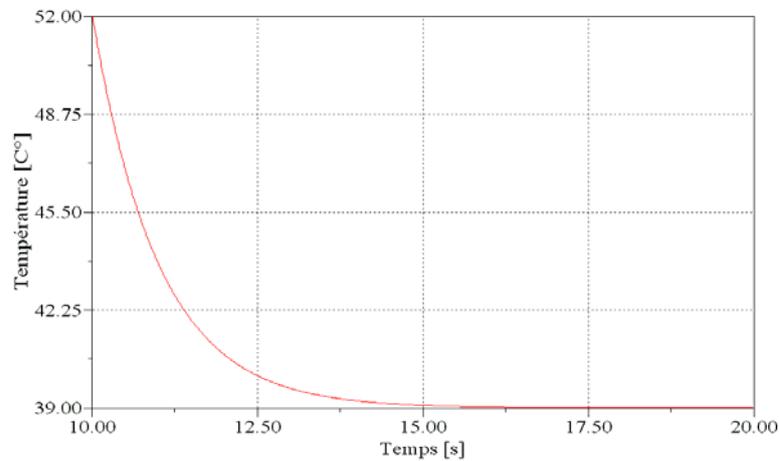


Figure 3.37 : Variation de la température au sein du Condenseur

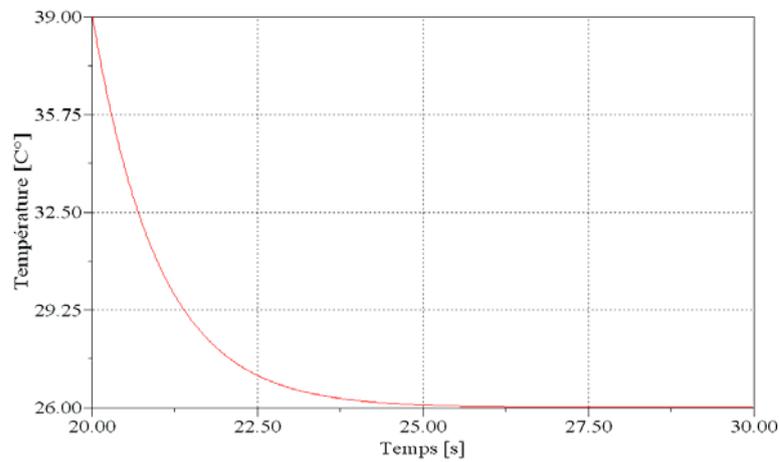


Figure 3.38 : Variation de température à la sortie du condenseur

On remarque que les courbes représentant la variation de la température du vapeur varient de la même façon dans les phases suivantes :

- Section de 52°C à 65°C
- Section de 39°C à 52°C
- Section de 26°C à 39°C

3.6.1.2. Variation de la température en fonction du temps pour la phase liquide, c'est-à-dire l'eau de refroidissement

Les figures 39, 40 et 41 montrent la variation de la température de liquide de refroidissement dans les différentes régions.

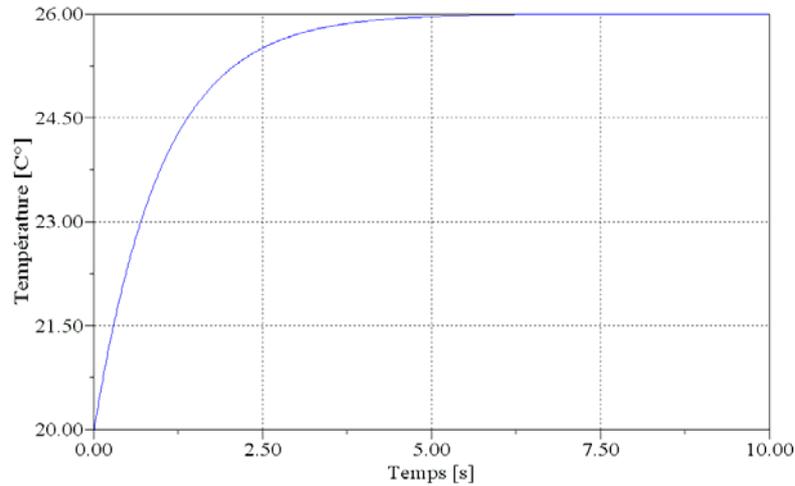


Figure 3.39 : Variation de la température d'eau à l'entrée du condenseur

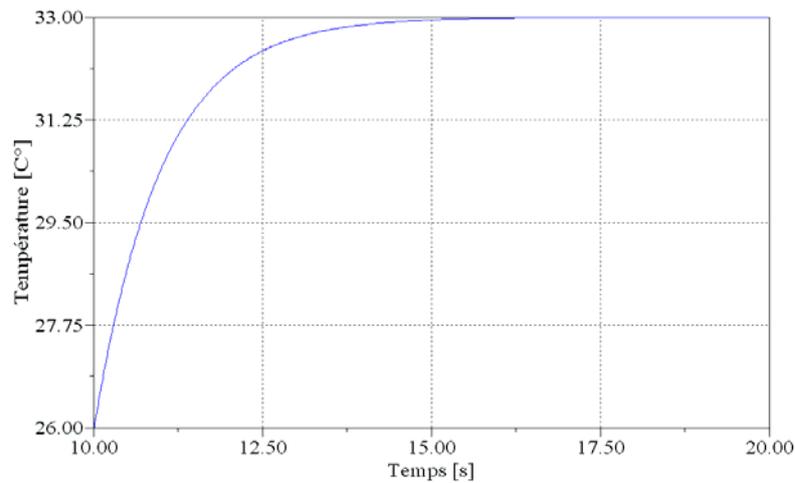


Figure 3.40 : Variation de la température de l'eau au sein du condenseur

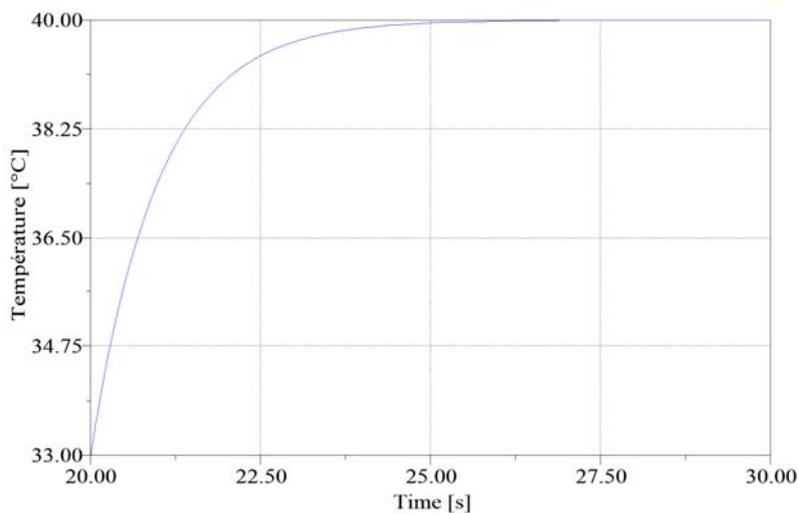


Figure 3.41 : Variation de la température de l'eau à la sortie

On remarque que les courbes représentant la variation de la température du liquide de refroidissement varient de la même façon dans les phases suivantes :

- Section de 20°C à 26°C
- Section de 26°C à 33°C
- Section de 33°C à 40°C

3.6.1.3. Variation de la température par rapport au débit massique la vapeur

L'augmentation du débit massique de vapeur entraîne un accroissement de la température de sortie du distillât et celle de l'eau de refroidissement figure 3.42.

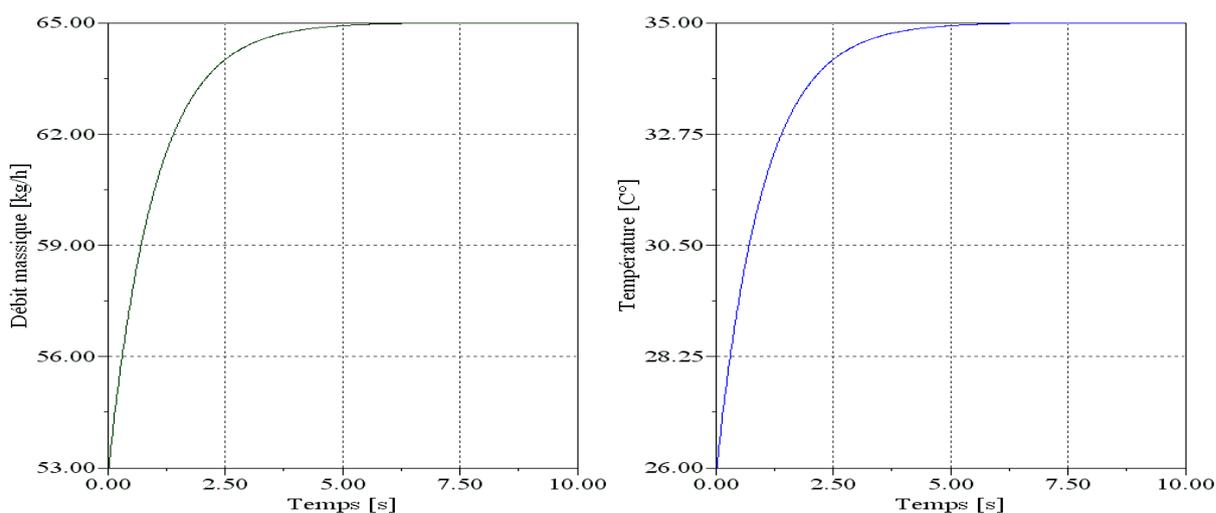


Figure 3.42 : Température de distillât en fonction du débit massique de la vapeur

3.6.1.4. Variation de la température par rapport au débit massique de l'eau de refroidissement

L'augmentation du débit massique de l'eau entraîne un décroissement de la température de sortie du distillât et celle de l'eau de refroidissement figure 3.43.

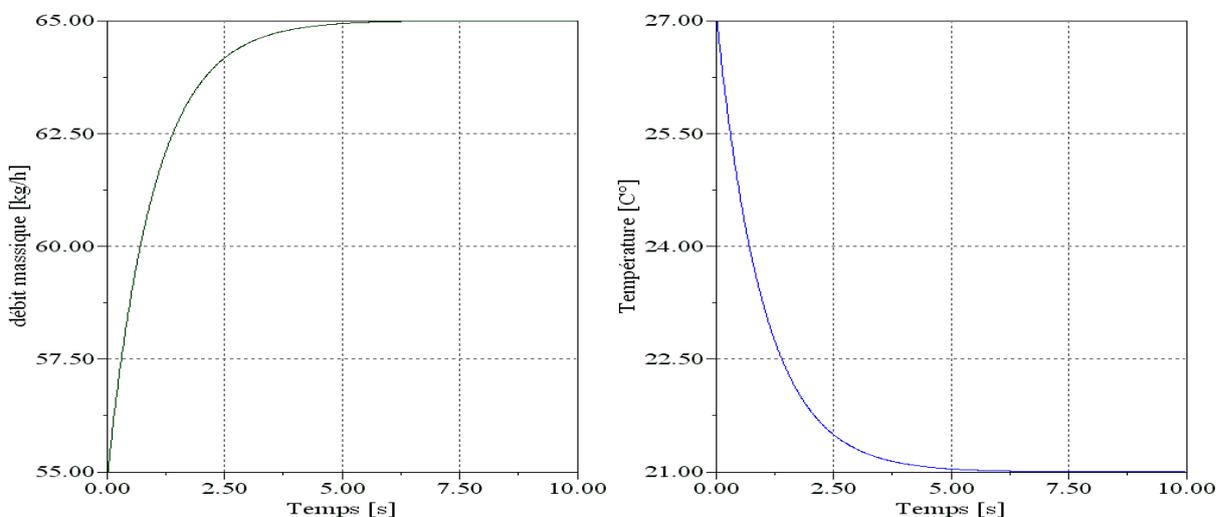


Figure 3.43 : Température de distillât en fonction du débit massique de l'eau de refroidissement

3.6.2. Application sur un modèle paramétrique

On considère qu'il se produit un mélange binaire (*eau + méthanol*), où on a vue l'opération de distillation d'un mélange binaire avec une colonne de distillation (*UPO3A*). A fin de valider notre modèle, on a utilise le MATLAB avec le cahier de charge du tableau 3.7.

Temps [s]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Température d'entrée [C°]	20	28	60	64	65	65	65	65	65	65
Température de sortie [C°]	20	20	20	20	20	64	64.5	65	65	65

Tableau 3.7 : Les valeurs d'entrée/sortie de la température

Sa fonction de transfert est :
$$G(s) = \frac{k}{1+T_{p1}s} e^{-T_d s}$$

Avec : $K = 1.0021, T_{p1} = 0.001$ et $T_d = 30$

Dans cette partie on a essayé d'identifiée les paramètres de ce modèle à partir d'un cycle expérimental obtenu au niveau de laboratoire de chimie. Les montants du processus de l'identification à maintes reprises sélectionner une structure du modèle, calculer le meilleur modèle dans la structure et évaluer ces propriétés du modèle pour vérifier si ils sont satisfaisants.

Le cycle peut être détaillé comme suit : donnez une expérience et rassemblez les données de l'entrée-sortie du processus devant être identifié, examinez les données, sélectionnez et définissez une structure du modèle dans laquelle un modèle sera trouvé, calculez le meilleur modèle dans la structure modèle d'après les données d'entrée/sortie et un critère donné d'entrée et examinez les propriétés du modèle obtenu.

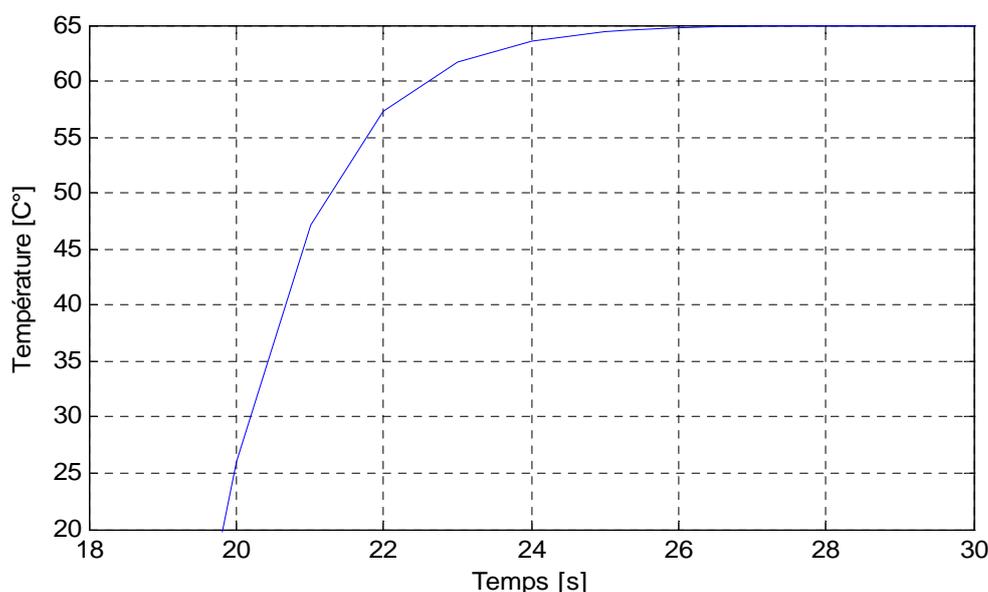


Figure 3.44 : Variation de température du modèle paramétrique

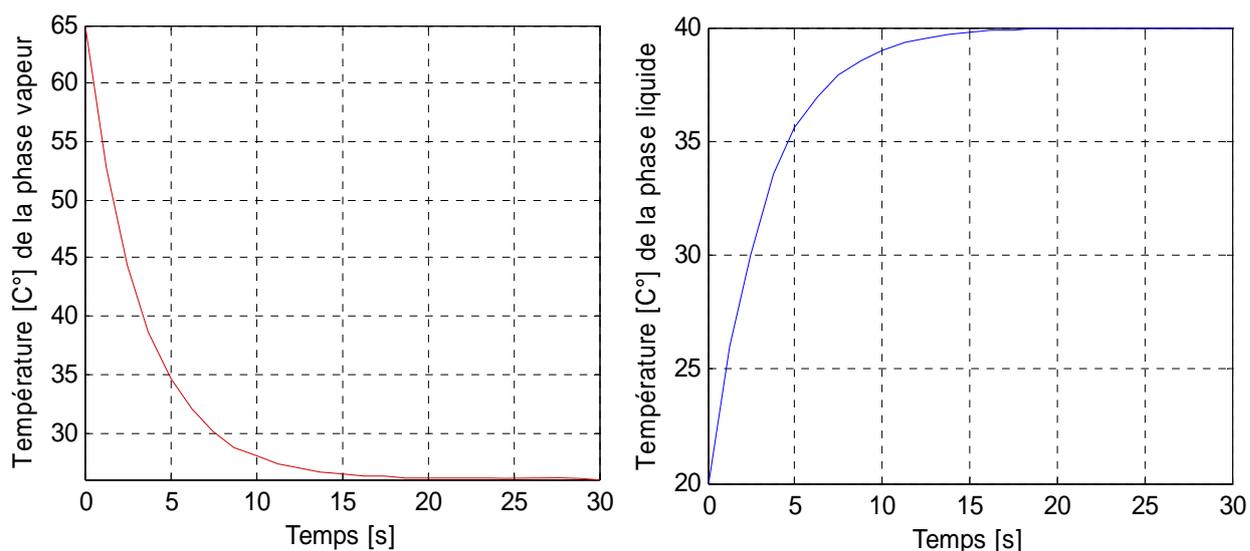


Figure 3.45 : Variation de température de la vapeur et de l'eau

L'identification des systèmes a connu un développement considérable sur les applications des techniques existantes aux modèles très généraux. Elle consiste à déterminer un ensemble d'équations ou bien un modèle décrivant le mieux possible le procédé. La plupart des modèles communs sont des descriptions des équations différentielles, aussi bien que tous les types de modèles de l'espace état linéaires. Il est permis de construire des modèles mathématiques d'un système dynamique basé sur les données d'entrée /sortie mesurées.

3.6.3. Comparaison entre le modèle paramétrique et le modèle bond graph

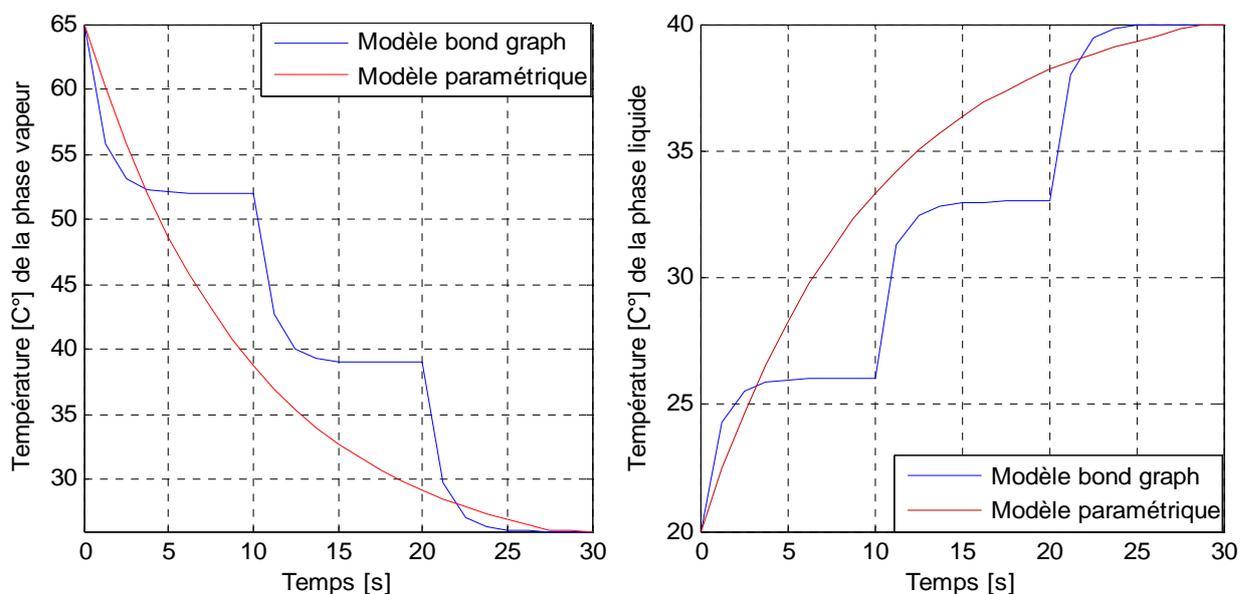


Figure 3.46 : Variation de température de la phase vapeur et de phase liquide (*eau*)

Pour la validation des paramètres obtenus, on superpose sur la figure le cycle expérimental de simulation obtenu à partir des paramètres identifiés et le cycle de simulation

obtenu à partir de bond graph. Pour permettre la comparaison entre les deux méthodes qu'on utilise pour l'identification des paramètres du modèle. On remarque que le bond graph est une représentation graphique d'un système semi-physique par contre l'identification paramétrique est une représentation mathématique.

3.7. Conclusion

L'outil bond-graph, relativement récent, commence à être utilisé de manière significative dans le monde industriel, et plus particulièrement dans les entreprises du secteur automobile. Le besoin croissant de modèles physiques pluridisciplinaires, la nécessité vitale de capitaliser les connaissances dans des bibliothèques de modèles, et le souci nouveau de prendre en compte dès la conception les aspects commande et sûreté de fonctionnement laissent envisager un développement important des applications industrielles de cet outil qui dégage l'ingénieur des vicissitudes de la modélisation mathématique et lui permet de s'intéresser aux propriétés structurelles et parfois génériques de ce qu'il conçoit.

Ce chapitre a été effectué par deux méthodes : modélisation par bond graph et l'identification paramétriques. La première méthode est réalisée une simulation sur un modèle bond graph '*méthode graphique*' d'un condenseur d'une colonne de distillation discontinue de type (UPO3A). On a vu que le condenseur est élément essentiel assure l'échange thermique entre deux phases '*liquide et vapeur*'. Ce modèle a été validé par l'utilisation du logiciel Sympos2000. Les résultats ont été satisfaisants. L'outil bond-graph et le logiciel Symbols se sont avérés des moyens puissants et commodes pour ce projet qui comprenait de la modélisation, la simulation et l'analyse des résultats. La deuxième méthode réalise une simulation sur un modèle paramétrique sous l'environnement MATLAB, les paramètres de cette méthode sont obtenus par une expérience élaborée dans le laboratoire de chimie de l'université de Constantine, les résultats obtenus sont comparés avec la première méthode. Essentiellement en ajustant des paramètres dans un modèle donné jusqu'à ce que sa sortie satisfait aussi bien que possible avec la sortie mesurée. Les méthodes de l'identification paramétriques sont des techniques pour estimer des paramètres dans les structures du modèle donné. D'importance particulière la capacité du modèle de reproduire le comportement des ensembles des données de validation qui sont utilisés pour les buts de la validation du modèle. Cela inclut simuler le modèle pour ces données et calculer les résidus du modèle quand appliqué à ces données. Le problème de l'identification du système monte à trouver une bonne structure de la modèle et bonne valeurs numériques de ses paramètres.

Références Bibliographiques

- [1] P. Borne, G. Dauphin, *Modélisation et identification des processus*, T2, Edition Technip, Paris, 1992.F.
- [2] Busson, *Les Bond-Graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie de procédés*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 2002.
- [3] G. Dauphin-Tanguy, *Les bond graphs et leur application en mécatronique*, Techniques d'ingénieur, traiter Informatique industrielle, S 7 2222, 1999.
- [4] P. L. Fabre, *Thermodynamique et cinétique chimique*, 1998.
- [5] G. Gandanegara, DEA Systèmes Automatiques, *Méthodologie de conception systémique en Génie Electrique à l'aide de l'outil Bond Graph : Application à une chaîne de traction ferroviaire*, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 7 Novembre 2003.
- [6] J. P. Gourlia, *Modélisation en génie des procédés*, 1996.
- [7] B. Ould Bouamama, J.U. Thoma et J.P. Cassar, *Bond graph modelisation of stream condensers*, in: proceeding of the IEEE international conference on systems, man and cybernetic, Vol.3, pp.2490-2494, Olando, USA, 16-17October, 1997.
- [8] B. Ould Bouamama et J. Thoma, Les Bond Graphs, sous la direction de Geneviève Dauphin-Tanguy, *Chap. 6 : Procédés thermodynamiques et chimiques*, pp. 236-277, Collection IC2, Edition Hermes, Paris, 2000.
- [9] J. Thoma, B. Ould Bouamama, *Modélisation et Simulation Des Processus Thermiques et Chimique : Application des bond-Ggraphs en génie des procédés*, Lille, France, Juillet 1998.
- [10] Basse Sambre-E.R.I.SA Moustier-sur-Sambre, *Conduite de colonne de distillation Application sur simulateur*, ENSPM Formation industrie, 2002.
- [11] M. Vergé, D. Jaume. *Modélisation structurée des systèmes avec les Bond-Graphs*, Editions TECHNIP 2004.
- [12] M. Vergé, *Modélisation pour l'ingénieur: approche par Bond Graph*, LMSP, ENSAM, 151 Bd de l'hôpital, Paris, 75013 France, 19-22 septembre 2005.

Table des matières

4.1. Introduction	89
4.2. Terminologies de base	89
4.3. Diagnostic des systèmes : concepts généraux.....	90
4.4. Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision	91
4.4.1. Classification des méthodes de surveillance	91
4.4.2. Méthodes de surveillance	93
4.4.2.1. Les approches de la surveillance sans modèle analytique	93
4.4.2.1.1. Analyse fréquentielle (Filtrage)	94
4.4.2.1.2. Redondance matérielle	94
4.4.2.1.3. Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs)	94
4.4.2.1.4. Réseaux de neurones artificiels (RNA).....	94
4.4.2.1.5. Systèmes d'Inférence Flous	95
4.4.2.2. Les approches de la surveillance à base de modèle analytique.....	96
4.4.2.2.1. Espace de parité.....	98
4.4.2.2.2. Observateurs	99
4.4.2.2.3. Estimation paramétrique	101
4.4.2.2.4. Graphes causaux	101
4.5. Génération des RRAs par les approches classiques.....	102
4.6. Etat de l'art sur la surveillance des systèmes par bond graph	102
4.6.1. Intérêt des modèles bond graphs couplés pour le diagnostic	102
4.6.2. Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic	103
4.6.3. Diagnostic par Bond graph quantitatif	104
4.6.3.1. Connaissance de la structure du modèle	104
4.6.3.2. Représentation matricielle	105
4.6.3.3. Parcours des chemins causaux	106
4.6.3.4. Placement de capteurs pour la surveillabilité des sources	106
4.6.3.5. Surveillance des composants	107

4.6.3.6. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph	108
4.7. Algorithme de placement de capteurs	108
4.7.1. Contraintes pour la surveillance des composants	108
4.8. Description du processus	110
4.9. Relations de redondance analytique des résidus	113
4.10. Application	116
4.10.1. Essais sur le processus et résultats	116
4.10.1.1. Défaillance sur les détecteurs	116
4.10. Conclusion.....	125

4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des outils de surveillance par une approche classique, l'intérêt des modèles bond graphs pour le diagnostic et enfin une étude de l'art dans le domaine de la surveillance par bond graph des processus industriels. Le diagnostic présente un grand intérêt dans l'industrie afin d'assurer une large fiabilité, une productivité optimale et une grande sûreté de fonctionnement des systèmes technologiques. L'apparition de défaillances sur un processus incite à la mise en œuvre des systèmes de surveillance dont l'objectif est de fournir, à tout instant, l'état du processus ou de ces organes constitutifs.

4.2. Terminologies de base

On donne quelques définitions pour la suite de notre travail [3]:

Un **processus industriel** est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant ou pouvant accomplir une activité clairement définie (*colonne de distillation, générateur de vapeur,...*).

Un **composant industriel** est un organe technologique destiné à former une partie du processus industriel (*pompe, vanne, conduite, ...*).

L'**architecture du système** est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau des composants industriels.

Il comprend les outils d'agencement général destinés au positionnement et à la localisation des équipements, à la création et la gestion des lignes d'acheminement et à la création et la gestion des boucles d'instrumentation et de contrôle. Ce diagramme est utilisé pour une description visuelle de l'architecture du processus. Il utilise des symboles pour représenter les composants technologiques et des lignes pour leur connexion. Les entrées et sorties peuvent représenter des flux d'énergies (*des variables de puissance comme débit massique, pression,...*) pour les composants technologiques et des flux d'information pour les capteurs et les correcteurs [8].

Le **terme faute (défaut)** est généralement défini comme une déviation d'une variable observée ou d'un paramètre calculé par rapport à sa valeur fixée dans les caractéristiques attendues du processus lui-même, des capteurs, des actionneurs ou de tout autre équipement.

Il existe une progression dans la sévérité des défauts: naissant, passager, permanent et catastrophique. Les défauts sont classés selon leur origine en [4]:

– **Défauts capteur** : Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On classe ces défauts en fonction de leur type en: biais, dérive, modification du gain de mesure, valeurs aberrantes, blocage du capteur à une valeur atteinte ou à une coupure électrique du capteur.

- **Défauts d'actionneurs** : Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie (*la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique*).
- **Défauts du processus physique** : Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure (*fuite, rupture d'un organe,...*) ou des paramètres du modèle (*encrassement d'un tube d'un four, bouchage partielle d'une conduite, ..*).
- **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.

Une **défaillance** est une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions fixées.

Une **panne** est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.

Une **erreur** est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et la vraie valeur spécifiée par un capteur étalon ou jugée (*par un modèle*) théoriquement correcte.

Les **symptômes** sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.

Les **contraintes** sont les limitations imposées par la nature (*lois physiques*) ou l'opérateur.

Un **résidu** ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle.

4.3. Diagnostic des systèmes : concepts généraux

Le diagnostic signifie simplement la détermination des composants défectueux au sein d'un système physique. Le principe général du diagnostic consiste à vérifier la cohérence entre un comportement observé et un comportement attendu. Le diagnostic d'un système est effectué à travers la détection, la localisation et l'identification des défauts.

La détection de défauts consiste à signaler la présence d'un défaut, c'est-à-dire déterminer si l'état courant du système et de ses éléments est normal ou non, en signalant toute déviation par rapport au fonctionnement attendu. Cette tâche est ensuite complétée par celle de localisation qui doit indiquer quel organe ou quel composant est affecté par le défaut. Enfin, la tâche d'identification a pour objet de caractériser le défaut en durée et en amplitude afin d'en déduire sa sévérité.

Le diagnostic constitue donc une étape d'une procédure plus complète que nous désignons sous le nom de surveillance [1]. La surveillance nécessite la mise en oeuvre de nombreuses tâches décrites selon l'organigramme représenté par la figure 4.1.

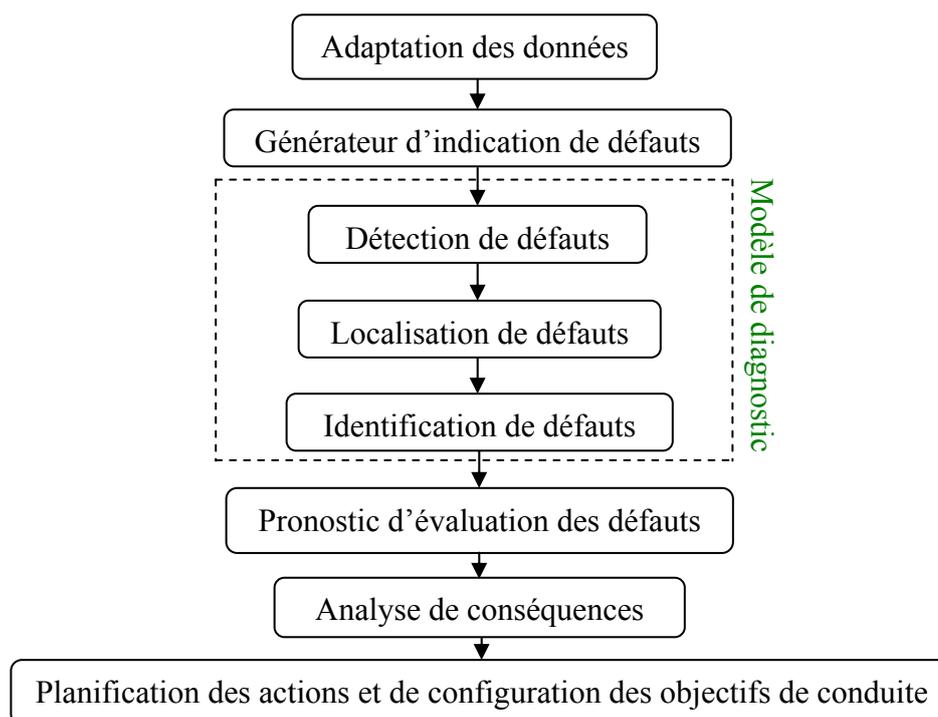


Figure 4.1 : Modules d'une procédure de surveillance

Du point de vue de la détection et de l'isolation des fautes et de la tolérance aux fautes deux types d'informations doivent être proposées à l'opérateur de supervision. Le premier concerne la détection et l'isolation de défauts survenus sur l'installation, et le deuxième indique les moyens de continuer à conduire le processus. Le diagnostic a pleinement conquis sa place surtout pour les processus en génie des procédés en raison de leur caractère à risque (*processus chimique, nucléaire, etc.*).

4.4. Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision

4.4.1. Classification des méthodes de surveillance

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement repose essentiellement sur la surveillance, qui constitue une interface entre l'installation physique et les opérateurs. La surveillance fournit des informations sur l'état de fonctionnement des dispositifs surveillés. Elle valide les informations issues des capteurs et localise les dispositifs défectueux. Le système de surveillance constitue une couche particulièrement importante du système d'information des processus de production automatisés sûrs de fonctionnement. Les données brutes sont des données connues, elles sont constituées de variables de commande et de variables mesurées.

Les algorithmes de surveillance traitent ces données brutes pour produire des données validées et enrichies. Les données validées sont celles dont la véracité a été "prouvée" par le système. Les algorithmes de diagnostic permettent de compléter la liste des prestations

systématiques. Alors, en fonction de la nature des défaillances localisées et de leur importance (*fuite d'eau, défaut de calorifugeage, ...*), des priorités et donc une planification des interventions pourront être établies.

Les algorithmes de surveillances sont en réalité tous basés sur le principe de la redondance des sources d'information. La redondance est obtenue par comparaison des données réelles issues du processus (*transmises par les capteurs*) et des données théoriques fournies par un type de modèle. Cette comparaison permet de vérifier que l'information obtenue à un instant donné reste conforme à des normes de fonctionnement normal. Le diagnostic se réalise en suivant une procédure qui contient les étapes suivantes :

– **L'acquisition des informations** : Cette opération est destinée à obtenir les informations sur le processus réel à surveiller et celles fournies par la connaissance du système. Elle se réalise à l'aide de capteurs spécialisés.

– **Etape de détection** : On surveille le fonctionnement réel en testant la cohérence entre ce modèle et les observations. Si celles-ci ne vérifient pas les équations du modèle, on en déduit que le fonctionnement réel n'est pas le fonctionnement normal. Ces changements sont alors détectés et traduits en terme de symptômes ou d'événements. On produit alors une alarme ou résidu.

– **Décision** : La procédure de décision conduite à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Si le défaut est conditionnellement tolérable (une pompe est défaillante mais il est possible d'utiliser une autre pompe installée en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée.

– **Etape de diagnostic** : Dans cette phase, un modèle de mauvais fonctionnement est utilisé selon le même principe pour déterminer la défaillance présente. C'est l'étape de localisation des défaillances. Cette étape se déclenche quand la comparaison ne correspond pas à un état normal de fonctionnement caractérisé par un état de référence et que la procédure de décision a indiqué que c'est une vraie alarme. Lorsque la faute est localisée, il faut alors identifier les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements.

Le système de surveillance produit également un enrichissement de ces données en générant d'autres données, qui caractérisent l'état de fonctionnement du processus (*détection, localisation et diagnostic des défaillances*), et qui sont utilisées pour la maintenance, la réparation, la gestion technique. Les prestations de maintenance peuvent être systématiques (*identifiées et prévues dans le temps*), ou aléatoires. Dans ce dernier cas, les méthodes

d'optimisation et d'ordonnement fournissent des outils d'aide aux opérations de maintenance (*planification des entretiens, calcul des taux de défaillance ...*).

4.4.2. Méthodes de surveillance

Il existe plusieurs différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des systèmes physiques. Le domaine était très vaste, des choix arbitraires ont été faits. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de système de diagnostic. Les deux principaux critères de classification des méthodes de surveillance sont le type de connaissance utilisé, et la stratégie de diagnostic. Même s'il faut le souligner, la méthode de diagnostic utilisée dépend fortement du type de modèle, le type de la connaissance a priori sur le système reste le critère principal de classification des méthodes de surveillance.

Les méthodes de surveillance sont principalement basées sur deux approches : les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic. On les classe souvent en méthodes avec ou sans modèle. On considère toutefois que l'approche dite sans modèle en utilise quand même un, même si celui-ci repose sur des descripteurs qui caractérisent le fonctionnement du système observé dans différents modes de fonctionnement (*normal, défaut $n\pm 1$, défaut $n\pm 2$,...*). L'approche avec modèle, que nous développons surtout par la suite, utilise un modèle opératoire. Bien que la connaissance exprimée par ces modèles puisse se représenter sous des formes très variées, la méthodologie de surveillance est identique, elle utilise l'idée de la redondance qui existe entre la connaissance exprimée par le modèle et celle que portent les données qu'il produit.

4.4.2.1. Les approches de la surveillance sans modèle analytique

Dans ces approches, on analyse des données fournies par le système qui permettent de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle. Contrairement aux techniques utilisées en automatique classique où l'on traite les problèmes numériquement en utilisant surtout les propriétés des équations différentielles, en intelligence artificielle, on travaille essentiellement en symbolique. Les problèmes sont alors combinatoires et l'on utilise la logique; on cherche à représenter les connaissances de sens commun, à modéliser la façon dont un individu raisonne. En effet, dans le contexte de la supervision, les données traitées sont très variées (*qualitative, logique, analogique, ...*) et imprécises (*bruit de mesure*), ce qui introduit des doutes dans la validité des modèles numériques utilisés dans les techniques à base de modèle. L'approche par reconnaissance de formes des problèmes de surveillance des systèmes se base sur la connaissance d'un ensemble de mesures effectuées sur le processus et des états de

fonctionnement associés. Ces techniques supposent la connaissance a priori de tous les états de fonctionnement, et ne prennent pas en compte l'évolution du système.

4.4.2.1.1. Analyse fréquentielle (Filtrage)

C'est une première approche du traitement du signal repose sur l'analyse fréquentielle (*transformée de Fourier*). Elle est bien évidemment très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. Le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter des défauts dans les machines électriques. Avec le développement des applications à vitesse variable, les recherches actuelles portent plus particulièrement sur les méthodes adaptées à la caractérisation de signaux non stationnaires : temps-fréquence, temps-échelle. L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont ici tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de. Cette approche possède l'avantage d'être relativement simple à mettre en pratique, mais l'inconvénient d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence [10], [8].

4.4.2.1.2. Redondance matérielle

Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation. Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectue des comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût. Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (*le nucléaire*). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs [15], [17].

4.4.2.1.3. Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs)

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles [14].

4.4.2.1.4. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation de modèle dit "boîte noire" peut être envisagée. Un RNA est en fait un système informatique constitué

d'un nombre de processeurs élémentaires (*ou noeuds*) interconnectés entre eux qui traite l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs [6], [14], [15].

En générale, l'utilisation des RNA se fait en deux phases. Tout d'abord, la synthèse du réseau est réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage qui permet alors, sur la base de l'optimisation d'un critère, de reproduire le comportement du système à modéliser. Il consiste en la recherche d'un jeu de paramètres et peut s'effectuer de deux manières : supervisée (*le réseau utilise les données d'entrée et de sortie du système à modéliser*) et non supervisée (*seules les données d'entrée du système sont fournies et l'apprentissage s'effectue par comparaison entre exemples*) quand les résultats d'apprentissage obtenus par le RNA sont satisfaisants, il peut être utilisé pour la généralisation. Il s'agit ici de la deuxième phase où de nouveaux exemples sont présentés au RNA pour juger de sa capacité à prédire les comportements du système modélisé. Leur faible sensibilité aux bruits de mesure, leur capacité à résoudre des problèmes non linéaires et multi-variables, à stocker la connaissance de manière compacte, à apprendre en ligne et en temps réel, sont en effet autant de propriétés qui les rendent attrayants pour cette utilisation.

Leur emploi peut alors se faire à trois niveaux :

- Comme modèle du système à surveiller en état normal et générer un résidu d'erreur entre les observations et les prédictions,
- Comme système d'évaluation de résidus pour le diagnostic,
- Comme système de détection en une étape (*en tant que classificateurs*).

4.4.2.1.5. Systèmes d'Inférence Flous

Les applications dans le traitement du signal, la modélisation, la commande, la supervision de procédés et la prise de décision sont en effet autant d'applications qui démontrent la capacité des SIF à traiter des problèmes non linéaires grâce à l'utilisation de connaissances expertes.

La structure de base d'un SIF est constituée de [6], [14], [15]:

- Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée/sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes (triangulaires, gaussiennes, ...),
- Une base de connaissance qui regroupe les règles liant les variables d'entrées et de sorties sous la forme "*Si...Alors...*",
- Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du *modus ponens* généralisé.

Les SIF peuvent être qualifiés de méthode « boîte noire ». En effet, ils explicitent la connaissance experte sous la forme de règles d'inférence, tout en classant les entrées et les sorties de façon qualitative. Ils effectuent également des calculs sur la base de poids et de fonctions fixées de façon à faire correspondre des comportements observés sans qu'il y ait de signification physique explicite. Le mode de fonctionnement d'un SIF permet donc de manier indistinctement des quantités et des symboles, de les manipuler pour faire des calculs et d'expliquer le cheminement parcouru pour obtenir un résultat. D'autre part, les tâches de diagnostic reposent sur des quantités d'heuristiques difficiles à formaliser dans un modèle mathématique :

- La corrélation entre des variables très différentes,
- Des observations qualitatives (*couleur, bruit*),
- Des intuitions, liées à des statistiques (*un appareil pose plus de problèmes que un autre*) difficilement quantifiables mais pourtant très efficaces.

4.4.2.2. Les approches de la surveillance à base de modèle analytique

L'opération d'identification est souvent omise ou reléguée aux opérateurs, car elle s'avère alors subsidiaire par rapport aux difficultés qu'elle peut induire [16]. Une procédure de détection et localisation de défauts à base de modèles analytiques peut être décomposée en deux étapes principales désignées sous le nom de « *génération des résidus* » et « *prise de décision* », selon la représentation de la figure 4.2.

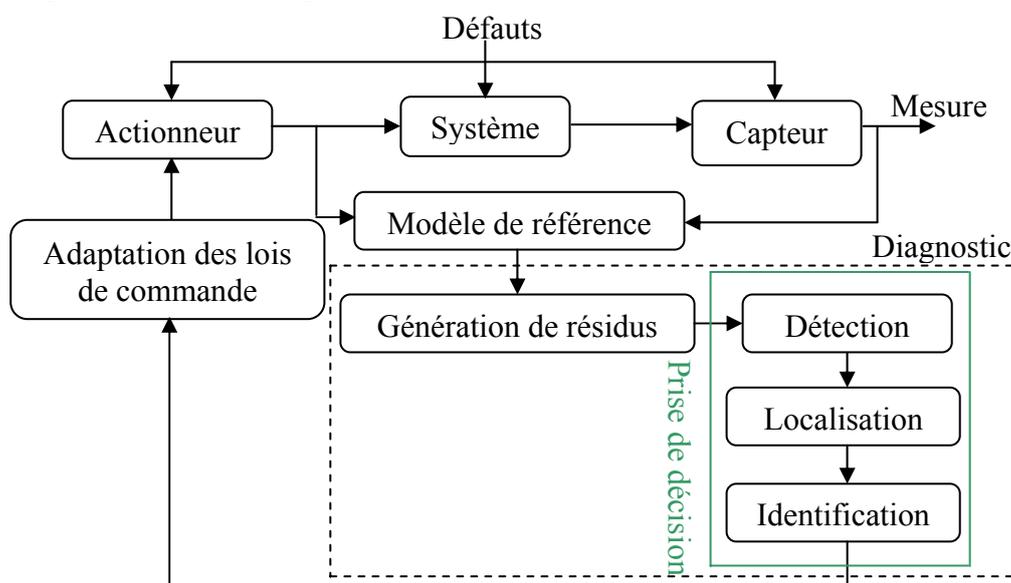


Figure 4.2 : Etape du diagnostic à base du modèle analytique

La première phase concerne la génération de résidus, grandeurs sensibles aux défauts. Elle correspond principalement à la phase de perception et vise à la mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution du système et qui traduisent un changement de situation

sans préjuger du fait qu'ils soient normaux ou non. Un résidu est une grandeur obtenue explicitement à partir des mesures issues des capteurs et des signaux de commande du système, soit directement (*espace de parité*), soit indirectement par l'intermédiaire d'estimées (*observateurs d'état, estimation paramétrique*). L'expression qui permet le calcul d'un résidu en fonction de mesures est appelée forme de calcul ou forme externe. En fonctionnement normal, un résidu doit être idéalement nul, c'est-à-dire indépendant du point de fonctionnement courant. En pratique, il est différent de zéro car il dépend implicitement des perturbations liées à l'environnement, des erreurs de modélisation et bien sûr des défauts. La relation liant le résidu à ces différentes grandeurs est appelée forme d'évaluation ou forme interne. La distinction entre formes de calcul et d'évaluation résulte simplement de la séparation de l'expression analytique d'un résidu en deux parties, l'une parfaitement connue et facile à calculer numériquement, l'autre dépendant des incertitudes modélisant les diverses perturbations agissant sur le système et des défauts à diagnostiquer figure 4.3. La seconde étape d'un module de diagnostic à base de modèle analytique est appelée prise de décision qui regroupe :

- tout particulièrement, les procédures de détection et de localisation qui concernent l'analyse des comportements pour distinguer ceux qui sont anormaux et la détermination précise du composant incriminé.
- puis, dans une moindre mesure, la procédure d'identification qui consiste à déterminer l'instant d'apparition du défaut, à le quantifier en estimant sa durée et son amplitude, ainsi qu'à en comprendre l'origine.

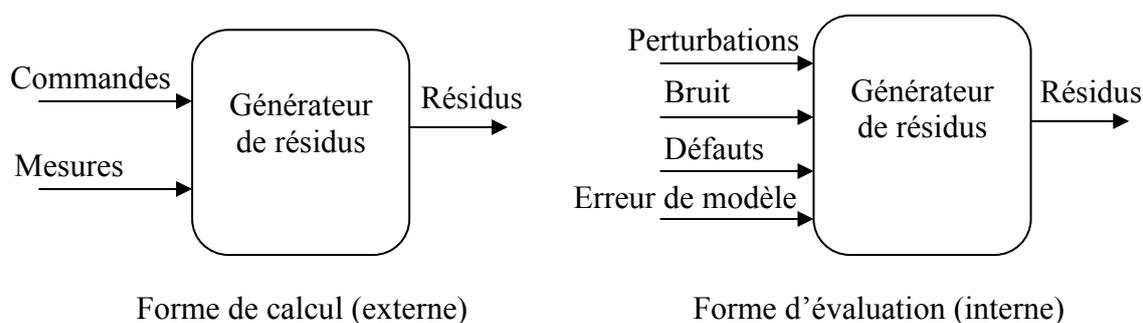


Figure 4.3 : Forme de calcul et d'évaluation des résidus

La présence de plusieurs défauts simultanés dans un ensemble de données rend cette étape plus difficile, car un résidu peut être sensible à plusieurs défauts, ce qui peut entraîner une confusion sur la localisation de ces défauts. Une façon d'améliorer la décision concernant cette localisation consiste à générer des résidus qui ne sont sensibles qu'à un sous-ensemble particulier de défauts, d'où le nom "*résidus structurés*". Les sous-ensembles de défauts permettent de structurer une table de signature appelée également matrice d'incidence ou matrice de signatures théoriques de défauts (*cette matrice est construite en se basant sur l'hypothèse que si un résidu*

dépasse un seuil donné, la valeur booléenne ‘1’ sera associée à ce résidu mais si le résidu ne dépasse pas le seuil, on lui associera la valeur booléenne ‘0’). Ces signatures traduisent l’influence des défauts sur les résidus. Pour que tous les défauts puissent être détectés, aucune colonne de la matrice des signatures théoriques de défauts ne doit être nulle, et pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures théoriques doivent être distinctes. Dans ce cas on utilise les redondances d’information et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode de fonctionnement ou l’état du système, puis décider s’il est normal ou pas. La plupart comprennent trois étapes : dans la première, on calcule des 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 produisant jamais, les résidus diffèrent en général de zéro. Dans ce sens, la deuxième étape de la procédure consiste à séparer les cas dans lesquels la non nullité résulte des bruits, erreurs de modélisation, entrées inconnues, ... ; de ceux dans lesquels elle résulte de défaillances du système. Une troisième étape tente alors de localiser et de diagnostiquer les défaillances supputées.

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne s’appuient sur des mesures. Il existe des méthodes qui utilisent plus de connaissances que celles apportées par les seuls capteurs physiques. Ces connaissances peuvent en particulier provenir de la connaissance du comportement entrée /sortie d’un procédé ou des processus qui en gouverneraient l’évolution. Cette connaissance est généralement exprimée sous forme de modèles mathématiques. On peut distinguer deux types de méthodes pour le diagnostic à base de modèle analytique : l’estimation paramétrique et l’estimation d’état comme il est illustré dans la figure 4.4.

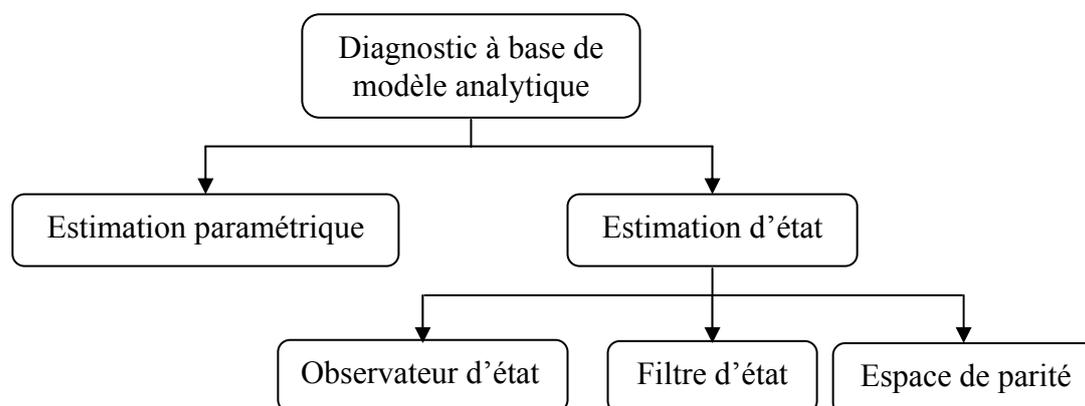


Figure 4.4 : Méthodes utilisées en diagnostic à base de modèles analytiques

4.4.2.2.1. Espace de parité

L’espace de parité est un espace dans lequel tous les éléments sont des résidus, c’est-à-dire de valeur statistiquement nulle en l’absence de défauts. Dans le contexte de cette approche,

le terme vecteur de parité est souvent employé pour désigner le vecteur des résidus et les relations utilisées pour générer les résidus sont appelées relations de parité. Les relations de parité sont des relations comportementales statiques ou dynamiques existant entre grandeurs mesurées. Cette approche a été initialement proposée dans le cas d'une redondance matérielle, puis développée pour les systèmes statiques (*espace de parité*). Ce type de redondance est appelé '*redondance analytique directe*' et a tout d'abord été utilisée en complément de la redondance matérielle (*le milieu aéronautique*). Citons aussi le travail qui démontre que la taille minimale de la fenêtre d'observation temporelle correspond à l'ordre de la partie observable du modèle d'état et donne une méthode permettant d'obtenir des résidus qui ne dépendent que de la mesure d'un seul capteur ou d'une seule entrée [15].

La notion d'espace de parité généralisé dans le cas stochastique en utilisant en plus des mesures, une prédiction de l'état du système à l'aide d'un filtre de Kalman. Le problème d'optimisation de ces résidus se traite à l'aide des valeurs et vecteurs propres généralisés.

Le principe de la méthode est la vérification de la consistance existante entre les entrées et les sorties du système surveillé comme se montre la figure 4.5

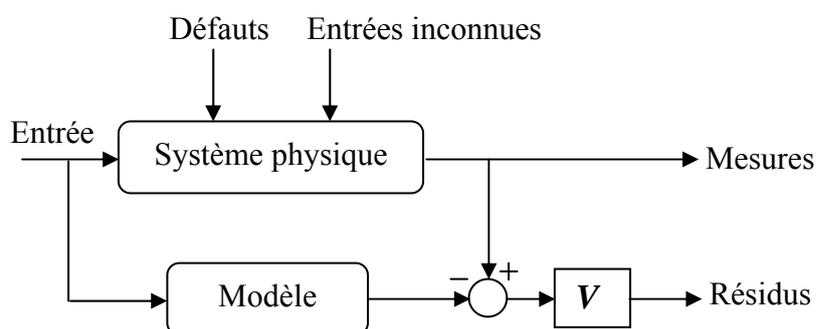


Figure 4.5 : Approche de l'espace de parité dans un format entrée-sortie

4.4.2.2.2. Observateurs

Cette approche s'appuie sur une bonne connaissance du modèle et de ses paramètres. Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconSTRUCTEURS est toujours la même à savoir celle de l'observateur proportionnel. Un modèle parallèle, corrigé à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, est élaboré. Ce gain est souvent calculé par placement de pôles, ce qui permet d'imposer la dynamique désirée. Une notion essentielle, qui n'apparaît pas dans l'approche par Espace de Parité, est la stabilité de l'observateur, c'est-à-dire la faculté de l'estimée à pouvoir converger vers la vraie valeur. L'état inconnu du système est reconstruit en se recalant à l'aide de certaines mesures, le gain de l'estimateur dépendant des objectifs et des performances désirées [10], [15].

Le but est de créer, à partir de l'estimation des mesures, des résidus qui seront testés afin de détecter une rupture à l'aide de diverses techniques : reconnaissance de formes, analyse discriminante floue, arbres logiques, systèmes experts. Dans cette approche, les résidus correspondent à l'erreur de prédiction de l'observateur d'ordre plein ou réduit ou encore à l'erreur d'innovation d'un filtre de Kalman.

L'un des avantages de ces techniques de génération de résidus est la possibilité de construire des batteries d'observateurs pour assurer l'isolabilité des défauts. Chaque observateur est conçu de façon à générer un résidu ou un sous-ensemble de résidus sensibles à une situation particulière de défaut. Le schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidus est représenté par la figure 4.6.

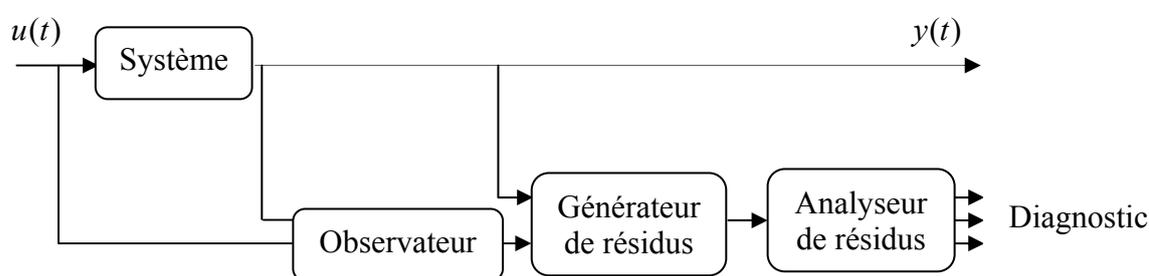


Figure 4.6 : Schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidu

Signalons que dans cette approche plusieurs types d'observateurs sont construits. Citons parmi ces observateurs, les observateurs à entrées inconnues et les observateurs à mémoire finie [12]. Récemment, une autre approche, concernant le diagnostic des systèmes incertains, en s'appuyant sur l'arithmétique des intervalles, a permis la synthèse d'observateurs intervalles. Ce type d'observateurs est capable d'estimer complètement ou partiellement le vecteur d'état ou de sortie du système sous forme intervalle ; il est ensuite possible de générer des résidus intervalles.

- Filtres d'état

Comme les observateurs qui s'adressent à un contexte déterministe, les filtres utilisent une formulation similaire du problème d'estimation et s'appuient sur des modèles stochastiques. Cette approche comprend différents problèmes d'estimation de l'état du système, qui dépendent de la position de l'instant courant t par rapport à la fenêtre temporelle d'observation $[t_0, t_f]$.

Les filtres sensibles aux défauts peuvent être considérés comme des observateurs particuliers dont les gains sont fixés de manière à ce que le vecteur des résidus, c'est-à-dire le vecteur des erreurs de prédiction, prenne une direction particulière pour chaque situation de défaut.

4.4.2.2.3. Estimation paramétrique

L'approche d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non plus, comme précédemment, sur les variables du système physique [15]. Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé comme il est indiqué dans la figure 4.7.

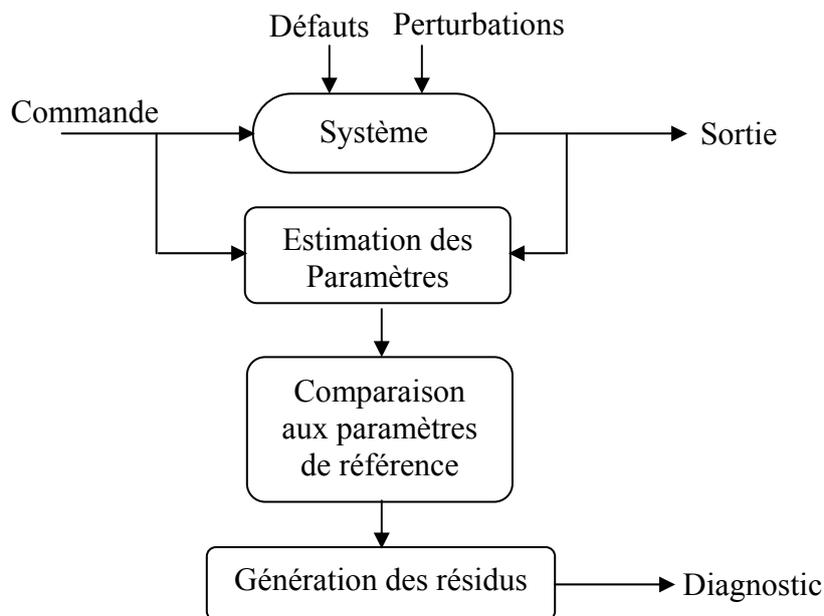


Figure 4.7 : Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus [1].

4.4.2.2.4. Graphes causaux

Il consiste à déterminer les composants défectueux qui peuvent expliquer le fonctionnement anormal observé. Un aspect significatif de la connaissance exigée au moment de l'analyse des régimes perturbés est la compréhension des mécanismes en termes de causalité. Une structure causale est une description des effets que les variables peuvent avoir les unes sur les autres. Cela peut être représenté par un graphe orienté. Cette structure fournit un outil conceptuel pour le raisonnement à propos de la façon dont les changements normaux ou non se propagent au sein du procédé. La méthode de modélisation causale est fondée sur une représentation causale qualitative du fonctionnement normal du procédé et sur des modèles

locaux de comportement quantitatifs. Le comportement normal de n'importe quel dispositif industriel de procédé de fabrication peut être partiellement décrit par un graphe causal, composé de relations continues entre les variables. La transcription des modèles de comportement normal en termes de graphes orientés fournit un outil de raisonnement au sujet des lois physiques régissant le dispositif et fournit ainsi une manière normale de mettre en oeuvre le diagnostic.

Les noeuds sont les variables mesurées et significatives pour l'opérateur de surveillance concernant le niveau exigé d'abstraction et les arcs représentent les liens orientés entre elles. De cette façon, $x \rightarrow y$ signifie que l'état de y au temps t dépend de l'état de x au temps $t' < t$; x est la cause, y l'effet. Ce principe est valide aussi longtemps que les liens causaux ne sont pas modifiés par les défauts. Par ailleurs le graphe causal fournit un outil graphique pour la visualisation de la propagation du défaut de variable en variable sur l'interface opérateur. Un graphe causal peut être obtenu par une analyse physique soignée et une analyse fonctionnelle descendante du processus. Ce genre de modèle est généralement concentré sur des phénomènes de transport de matière (*équilibres, transferts, stockage...*). Les paramètres temporels dans les relations dynamiques soutenues par les arcs peuvent être obtenus avec des procédures classiques d'identification [13].

4.5. Génération des RRAs par les approches classiques

Les modèles des processus en génie des procédés sont fortement non linéaires. De plus les non linéarités sont souvent non linéarisables. Il est alors nécessaire de déduire les RRAs pour leur surveillance. On rappelle qu'une RRA est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. La génération de ces équations permet d'engendrer des indicateurs de fautes appelés résidus. En fonctionnement normal (sans faute), ce résidu est statistiquement nul. Lors de l'apparition d'un défaut, son amplitude s'éloigne de zéro.

4.6. Etat de l'art sur la surveillance des systèmes par bond graph

4.6.1. Intérêt des modèles bond graphs couplés pour le diagnostic

En plus de ce qui est développé précédemment, en peut dire la modélisation est une étape importante dans la conception des algorithmes de surveillance (*de détection et d'isolation de fautes FDI*) reçoivent les informations en ligne issues des capteurs (détecteurs d'effort De et de flux Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance [7]. 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. Le modèle bond graph est avant tout un modèle de connaissance pour la simulation.

La démarche de l'équipe Bond Graph consistant à considérer le modèle bond graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, la conception, l'analyse, la commande et la surveillance grâce à sa structure causale est originale.

Plus tard le bond graph est utilisé comme outil de calcul formel et d'analyse structurelle pour la résolution de problèmes de commande tels que : Commandabilité en sortie, inversibilité, découplage entrée-sortie, observabilité, placement de pôles... Ces méthodes se basent sur le parcours de modèles bond graph en suivant des chemins causaux entrées-sorties pour l'analyse des systèmes de commande linéaires modélisant une seule énergie [12]. On distingue deux approches d'utilisation du bond graph pour la surveillance des processus industriels : quantitative et qualitative.

4.6.2. Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis [4], [9]. Le bond graph qualitatif décrit explicitement la localisation des composants du système et leurs interconnexions et son modèle peut être construit sans aucune considération des paramètres du système [9]. Les représentations de connaissances conventionnelles permettent aussi de décrire la structure du système ainsi que son état par le biais de divers outils (*schéma bloc, équations différentielles, ...*). Par la suite, la surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif est relativement plus simple en comparaison des méthodes utilisées en mathématique conventionnelle.

Les bond graphs qualitatifs utilisent, à la place de valeurs numériques, des valeurs qualitatives définies par l'ensemble $\{[1] \ [+] \ [0] \ [-] \ [-1] \ [?]\}$ représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Un ensemble d'opérations qualitatifs peut être défini en accord avec ces représentations qualitatives en utilisant les opérateurs des nombres réels : $\{+, -, \times, \div, =\}$. On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute. D'autres auteurs utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance. Un mécanisme d'inférence construit avec une stratégie de raisonnement qualitatif a été utilisé pour analyser les relations entre la structure du système et son comportement (*donné par son modèle bond graph*) pour localiser les pannes du système.

L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois cette approche devient complexe pour les processus multi énergie et présente d'autres inconvénients

comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations [4].

4.6.3. Diagnostic par Bond graph quantitatif

Cette approche est basée sur les lois physiques et nécessite une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres [9]. Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Les modèles (*sous forme de fonction de transfert, d'équations d'état, ...*) peuvent être obtenus sur la base des lois physiques [11] ou sur la base d'une identification statistique des paramètres [9]. On utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance. La causalité intégrale est recommandée pour la simulation, afin d'éviter les problèmes numériques inhérents à la différentiation. Par contre, la causalité dérivée est utilisée de manière préférentielle dans les RRAs afin d'éviter les influences des conditions initiales. Le courant et la tension sont mesurés respectivement par des détecteurs de flux (De) et d'effort (Df). Les détecteurs sont supposés idéaux. Ils sont reliés à la structure de jonction par des flèches classiques, signifiant qu'il n'y a aucun transfert de puissance entre le système et les détecteurs.

Les avantages que présente cette approche par rapport aux approches basées sur les observateurs sont : la simplicité de la compréhension des (**RRAs**) 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 donc adaptées à une implémentation informatique.

4.6.3.1. Connaissance de la structure du modèle

Le bond graph est un outil de modélisation avantageux car il met en évidence à la fois la structure et le comportement du système étudié. Le modèle bond graph peut être représenté vectoriellement comme le représente la figure 4.8. Les vecteurs associés à cette représentation sont : X , le vecteur d'état (composé des moments généralisés " p " des éléments I et des déplacements généralisés " q " des éléments C), divisé en 2 sous-vecteurs X_i et X_d , respectivement associés aux composants en causalité intégrale et aux composants en causalité dérivée; \dot{X} , la dérivée par rapport au temps du vecteur d'état, divisée elle aussi en 2 sous-vecteurs \dot{X}_i et \dot{X}_d ; Z : le vecteur d'état complémentaire (" f " sur les éléments I et " e " sur les éléments C) divisé en 2 sous-vecteurs Z_i et Z_d ; U : le vecteur source; Y : le vecteur de mesure; D_{in} : le vecteur d'entrée des champs R ; D_{out} : le vecteur de sortie des champs R [11].

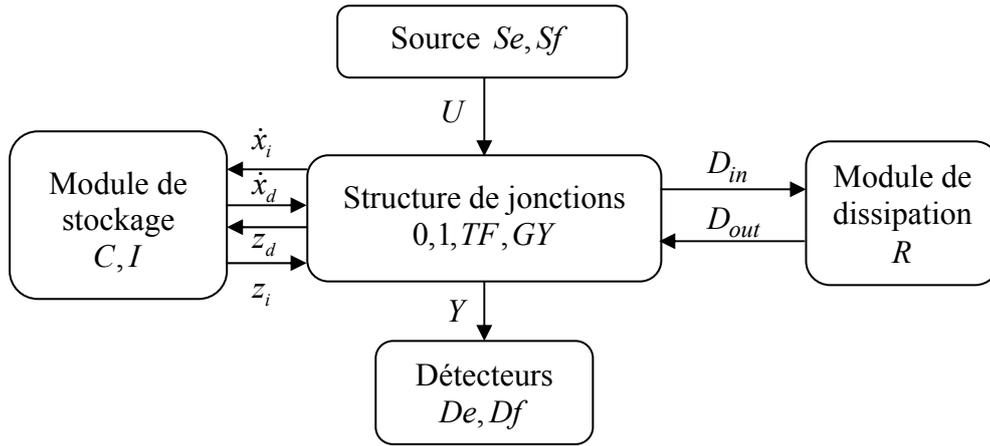


Figure 4.8 : Représentation vectorielle d'un modèle bond graph

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

$$\begin{bmatrix} x_i \\ z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \quad \dots 4.1$$

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 $0, -1, +1, m, r, \frac{1}{m}$ et $\frac{1}{r}$, 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 :

$$\begin{cases} z_i = F_i(x_i) \text{ ou } z_i = F_i x_i \\ z_d = F_d(x_d) \text{ ou } z_d = F_d x_d \\ D_{out} = L(D_{in}) \text{ ou } D_{out} = L.D_{in} \end{cases} \quad \dots 4.2$$

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

$$\begin{cases} z_d(s) = H'(s) \dot{X}_d(s) \\ z_i(s) = H'\left(\frac{1}{s}\right) \dot{X}_i(s) \end{cases} \quad \dots 4.3$$

Avec $L, H'(s)$ et $H'\left(\frac{1}{s}\right)$ sont des matrices carrées.

4.6.3.2. Représentation matricielle

La matrice de structure de jonction S et les lois E/S de tous les composants forment la nouvelle matrice M qui contient toutes les relations liant les variables du système et constitue un modèle polynomial du système.

Elle est définie par $M = \left[\begin{array}{c|c} S & -I \\ \hline I & M' \end{array} \right]$:

$$M = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & -I_1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 & 0 & -I_4 \\ I_1 & 0 & 0 & 0 & -H\left(\frac{1}{s}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & -H^1(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & -L & 0 \end{bmatrix} \quad \dots 4.4$$

M' regroupe les relations d'entrée-sortie de tous les composants du système, de telle sorte que la relation $M'V = 0$ soit satisfaite. La structure est l'expression de la présence ou de l'absence de relations entre les variables. L'existence de relations est caractérisée par un terme non nul dans la matrice M . Ainsi cette matrice représente un ensemble de $(2n_c + n_s)$ équations déterminant les $2n_c$ inconnues. Il y a donc sur-détermination si le nombre de capteurs n_s n'est pas nul. L'indépendance des différentes lignes de la matrice M est assurée par la présence des matrices unités I_1, I_2, I_3 et I_4 . La matrice M peut être associée à un graphe biparti composé de l'ensemble des variables V et l'ensemble des relations F_i .

4.6.3.3. Parcours des chemins causaux

Pour générer des RRAs à partir du modèle bond graph en suivant les chemins causaux. Les jonctions 0 et 1 sont connectées à des éléments soumis respectivement à un effort commun et à un flux commun, et une somme algébrique d'efforts (*respectivement de flux*) apparaît. Le but est d'étudier tous les chemins causaux relatifs à la jonction considérée jusqu'aux sources et aux capteurs. La méthode est intéressante car elle génère autant de relations que de jonctions 0 et 1. Il n'est pas besoin de calculer le déterminant du bond graph, ainsi que les gains des différentes boucles causales.

4.6.3.4. Placement de capteurs pour la surveillabilité des sources

Dans le domaine d'application du bond graph par le placement de capteurs, on considère qu'il existe des capteurs placés permettant de résoudre le problème de surveillabilité des sources d'un système modélisé par bond graph si, pour chaque source S_k non surveillable, il existe une jonction J_k accessible à partir de S_k en arrivant par le flux (*respectivement par l'effort*) si celle-ci est une jonction 1 (*respectivement 0*) et que le chemin causal entre S_k et J_k n'est pas inclus dans

un des autres chemins causaux source-jonction partant des autres sources non surveillables retenus pour assurer la surveillabilité des autres sources. Les études sur la surveillance des composants ont permis de déterminer une méthode de placement de capteurs sur un système modélisé par un bond graph linéaire:

- ✓ Déterminer toutes les sources dont les défaillances ne peuvent être isolées;
- ✓ Pour chaque groupe de sources dépendantes, répertorier tous les placements de capteurs qui pourraient casser les chemins causaux reliant les sources, rendant ces sources surveillables;
- ✓ Sélectionner les placements des capteurs qui réduisent le plus possible le nombre d'équations implicites entre les variables du modèle qui cassent le plus de boucles causales possible entre les éléments qui ne croisent aucune jonction connectée à un capteur.

4.6.3.5. Surveillance des composants

Afin de détecter les défaillances au niveau des composants pour des systèmes linéaires modélisés par bond graph, il existe principalement deux méthodes. La première méthode est basée sur l'estimation des paramètres et la seconde repose sur les relations de redondance analytique et la construction des signatures des différentes pannes probables. A partir des entrée/sortie du ce composant, on estime ces valeurs du paramètre.

Il existe principalement deux méthodes. La première se base sur la mesure directe de ces variables. Elle utilise un support essentiellement matériel, composé de deux capteurs (*un de flux et l'autre d'effort*) pour chaque composant à surveiller. Il suffit alors de comparer les valeurs mesurées avec les valeurs déduites de la caractéristique du composant. S'il existe un écart, cela que le composant est défaillant. L'inconvénient de cette méthode est très encombrant et coûteuse. La deuxième méthode, basée essentiellement sur un support logiciel, utilise la notion de bond graph bicausal pour exprimer les variables généralisées du composant en fonction des variables connues du système. Le bond graph bicausal permet de se servir du reste du modèle pour déterminer les valeurs d'effort et de flux, sans avoir à passer par la caractéristique du composant. Pour un bond graph mono-énergie, cela apporte deux équations supplémentaires, ce qui fait trois équations avec la caractéristique, pour deux inconnues. Le système est donc sur-déterminé, d'où une redondance de l'information qui pourra servir de comparaison afin de détecter une éventuelle défaillance. Parfois, le modèle bond graph est tel que si l'on veut éviter les boucles de causalité, qui posent des problèmes de parcours de chemins ainsi que des problèmes de simulation, il faut opter pour un regroupement des composants pour constituer un '*macro-composant*' ou une '*impédance*' composée. En effet, cette causalité peut engendrer des situations difficiles à résoudre sans faire appel à des calculs plus complexes, tels que la factorisation. La solution dans ce cas est de regrouper les composants incriminés. Généralement,

la causalité impose un certain nombre de règles de propagation du flux et d'effort à un composant dans le modèle, pour en trouver son paramètre constitutif

Cette causalité implique que si l'effort est connu dans un sens, alors le flux est connu dans le sens opposé. Ceci n'est vrai que si l'on connaît les valeurs des composants constituant le bond graph. Dans le cas contraire, il est nécessaire de définir d'autres règles d'affectation de la causalité en divisant le trait causal en deux, la moitié supérieure indique le sens de propagation de l'effort et la moitié inférieure le sens de propagation du flux.

4.6.3.6. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph

Une méthode de génération des RRAs à partir d'un noeud jonction dans le modèle bond graph exploiter tous les chemins causaux menant aux sources et/ou aux capteurs. Cette méthode est informelle (*comme celle de l'affectation de la causalité*) et se prête à une informatisation.

La complexité des systèmes physiques à étudier ou surveiller rend nécessaire l'automatisation des ces procédures d'analyse structurelle (*pour la génération des RRAs*) par l'intermédiaire d'un programme informatique.

4.7. Algorithme de placement de capteurs

4.7.1. Contraintes pour la surveillance des composants

La méthode développée ci-dessus consiste en un placement optimal de capteurs en vue de la surveillabilité des composants, c'est à dire assurer la détectabilité et l'isolabilité des défaillances des composants. Soit un modèle bond graphs issu d'un processus physique. On suppose qu'il n'existe pas une architecture d'instrumentation, les fautes sur les composants ne sont pas multiples et que les capteurs et les sources ne sont pas affectés. Puisque en bond graph, les détecteurs ne sont placés qu'aux jonctions, on considère un placement virtuel du capteur à la position j , ce qui est représenté par une variable booléenne. De plus, à chaque type de jonction, on peut connaître le type de détecteur, ce qui réduit la combinatoire d'affectation [2], [5].

Soient :

⇒ N_0 le nombre de jonction 0_{Ci} et N_1 le nombre de jonction 1_{Rj} ;

⇒ i le numéro des jonctions 0_{Ci} et j le numéro des jonctions 1_{Rj} ;

⇒ n le nombre de liens accrochés à la jonction 0_{Ci} ;

⇒ m le nombre de liens accrochés à la jonction 1_{Rj} ;

⇒ C l'ensemble des variables connus $C = \{Sf_1, Sf_2, De_i, De_j\}$;

⇒ X l'ensemble des variables inconnus $X = \{e_{Ci}, f_{Ci}, e_{Rj}, f_{Rj}\}$;

Les équations aux jonctions 0_{Ci} sont :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n a_k f_k = 0 & \text{où } a_k = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{Ci} & \text{pour } k = 1, \dots, n \end{cases} \quad \dots 4.5$$

Pour les fonctions non linéaires Φ_{Ci} et pour s est l'opérateur dérivé, les variables de flux et d'effort à déterminer sont :

$$\begin{cases} f_{Ci} = \Phi_{Ci} \left[s \left\{ (1-x_i)e_{Ci} + x_i D e_i \right\} \right] & \text{avec } i = 1, \dots, N_0 \\ e_{Ci} = \frac{1}{s} (1-x_i) \Phi_{Ci}^{-1} (f_{Ci}) + x_i D e_i \end{cases} \quad \dots 4.6$$

Les équations aux jonctions 1_{Rj}

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^m a_l e_l = 0 & \text{ou } a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_l = f_{Rj} & \text{pour } l = 1, \dots, m \end{cases} \quad \dots 4.7$$

Pour les fonctions non linéaires Φ_{Rj} , les variables de flux et d'effort à déterminer sont :

$$\begin{cases} e_{Rj} = \Phi_{Rj} \left[(1-y_j) f_{Rj} + y_j D f_j \right] & \text{avec } j = 1, \dots, N_1 \\ f_{Rj} = (1-y_j) \Phi_{Rj}^{-1} (e_{Rj}) + y_j D f_j \end{cases} \quad \dots 4.8$$

Les combinaisons des variable booléennes x_i et y_j permettent de générer des relations de redondance analytique qui donnent les structures des résidus. A partir de ces structures on obtient les vecteurs de signature de défaillance. La structure d'un résidu est caractérisée par le vecteur binaire dans lequel on associe à l'ensemble des relations de redondance analytique R , l'ensemble des variables connues.

$$sr(r, c) = \begin{cases} 1 & \text{si et seulement si } c \text{ apparait à la RRA } r \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \dots 4.9$$

Le vecteur signature de défaillance binaire sd_i associé à la relation f_i est défini par [13], [14]:

$$sd_i = [sr(r_1, f_i), sr(r_2, f_i), \dots, sr(r_K, f_i), \dots, sr(r_m, f_i)]^t \quad \dots 4.10$$

$$sr(r_K, f_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu } r_K \text{ utilise la relation } f_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \dots 4.11$$

La faute sur un composant i est surveillable si la relation f_i qui le représente l'est aussi. La relation f_i est détectable si seulement si le vecteur sd_i est différent du vecteur nul.

f_i est isolable si est seulement si elle détectable et :

$\forall f_i \in F / i \neq j \exists r_K \in R / sr(r_K, f_i) \oplus sr(r_K, f_j) = 1$ c'est-à-dire unique dans sa classe.

$$\begin{cases} f_i \text{ est détectable ssi le vecteur } sd_i \neq 0 \\ f_i \text{ est isolable ssi } \forall f_i \in F / \exists r_K \in R / sr(r_K, f_i) \oplus sr(r_K, f_j) = 1 \end{cases} \dots 4.12$$

4.8. Description du processus

Le processus considéré pour l'application de la méthode de surveillance est un condenseur d'une colonne de distillation discontinue UOP3BM qui a été détaillé au paragraphe 4.8 du chapitre 04. Le modèle Bond Graph correspondant avec le placement des capteurs (détecteurs d'effort, et de flux) est représenté par la figure 4.9.

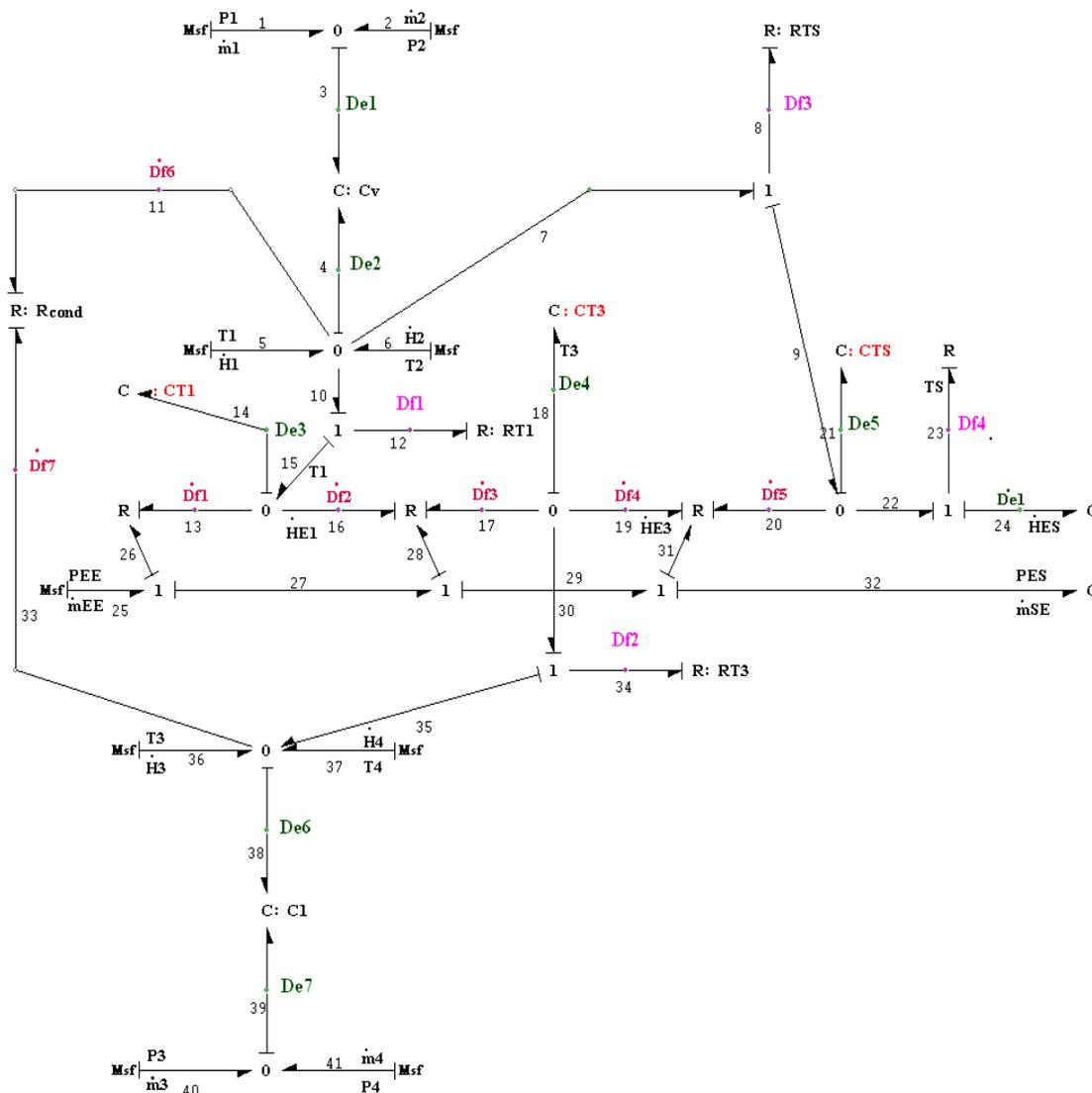


Figure 4.9 : Modèle bond graph d'un condenseur

Les équations aux jonctions :

$$\text{Jonction } 0_1 : \begin{cases} e_1 = e_2 = e_3 \\ f_3 - f_1 - f_2 = 0 \\ f_1 = sf_1, f_2 = sf \\ f_{CV} = f_3 = \phi_{CV} [s \{(1-x_1)e_3 + x_1De_1\}] \\ e_{CV} = e_3 = \frac{1}{s}(1-x_1)\phi_{CV}^{-1}(f_3) + x_1De_1 \end{cases} \dots 4.13$$

$$\text{Jonction } 0_2 : \begin{cases} e_6 = e_4 = e_5 = e_7 = e_{10} = e_{11} \\ f_4 - f_5 - f_6 + f_7 + f_{10} + f_{11} = 0 \\ f_{CV} = f_4 = \phi_{CV} [s \{(1-x_2)e_4 + x_2De_2\}] \\ e_{CV} = e_4 = \frac{1}{s}(1-x_1)\phi_{CV}^{-1}(f_4) + x_2De_2 \end{cases} \dots 4.14$$

$$\text{Jonction } 0_3 : \begin{cases} e_{13} = e_{14} = e_{15} = e_{16} \\ f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{13} = 0 \\ f_{CT1} = f_{14} = \phi_{CT1} [s \{(1-x_3)e_{14} + x_3De_3\}] \\ e_{CT1} = e_{14} = \frac{1}{s}(1-x_3)\phi_{CT1}^{-1}(f_{14}) + x_3De_3 \end{cases} \dots 4.15$$

$$\text{Jonction } 0_4 : \begin{cases} e_{17} = e_{18} = e_{19} = e_{30} \\ f_{17} + f_{18} + f_{19} + f_{30} = 0 \\ f_{CT3} = f_{18} = \phi_{CT3} [s \{(1-x_4)e_{18} + x_4De_4\}] \\ e_{CT3} = e_{18} = \frac{1}{s}(1-x_4)\phi_{CT3}^{-1}(f_{18}) + x_4De_4 \end{cases} \dots 4.16$$

$$\text{Jonction } 0_5 : \begin{cases} e_{20} = e_{21} = e_{22} = e_9 \\ f_{20} + f_{21} + f_{22} + f_9 = 0 \\ f_{CTS} = f_{21} = \phi_{CTS} [s \{(1-x_5)e_{21} + x_5De_5\}] \\ e_{CTS} = e_{21} = \frac{1}{s}(1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}(f_{21}) + x_5De_5 \end{cases} \dots 4.17$$

$$\text{Jonction } 0_6 : \begin{cases} e_{35} = e_{36} = e_{37} = e_{38} = e_{33} \\ f_{38} - f_{36} + f_{35} - f_{37} + f_{33} = 0 \\ f_{Cl} = f_{38} = \phi_{Cl} [s \{(1-x_6)e_{38} + x_6De_6\}] \\ e_{Cl} = e_{38} = \frac{1}{s}(1-x_6)\phi_{Cl}^{-1}(f_{38}) + x_6De_6 \end{cases} \dots 4.18$$

$$\text{Jonction } 0_7 : \begin{cases} e_{39} = e_{40} = e_{41} \\ f_{39} - f_{40} - f_{41} = 0 \\ f_{Cl} = f_{39} = \phi_{Cl} [s \{(1-x_7)e_{39} + x_7De_7\}] \\ e_{Cl} = e_{39} = \frac{1}{s}(1-x_7)\phi_{Cl}^{-1}(f_{39}) + x_7De_7 \end{cases} \dots 4.19$$

$$\text{Jonction } I_1 : \begin{cases} f_{10} = f_{12} = f_{15} \\ e_{12} - e_{10} - e_{15} = 0 \\ e_{12} = \phi_{RT1} [(1-y_1)f_{12} + y_1 Df_1] \\ f_{12} = f_{RT1} = (1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1 Df_1 \end{cases} \quad \dots 4.20$$

$$\text{Jonction } I_2 : \begin{cases} f_{30} = f_{34} = f_{35} \\ e_{34} - e_{30} - e_{35} = 0 \\ e_{34} = \phi_{RT3} [(1-y_2)f_{34} + y_2 Df_2] \\ f_{34} = f_{RT3} = (1-y_2)\phi_{RT3}^{-1}e_{34} + y_2 Df_2 \end{cases} \quad \dots 4.21$$

$$\text{Jonction } I_3 : \begin{cases} f_7 = f_8 = f_9 \\ e_8 - e_7 - e_9 = 0 \\ e_8 = \phi_{RTS} [(1-y_3)f_8 + y_3 Df_3] \\ f_8 = f_{RTS} = (1-y_3)\phi_{RTS}^{-1}e_8 + y_3 Df_3 \end{cases} \quad \dots 4.22$$

$$\text{Jonction } I_4 : \begin{cases} f_{22} = f_{23} = f_{24} \\ e_{23} - e_{22} + e_{24} = 0 \\ e_{23} = \phi_R [(1-y_4)f_{23} + y_4 Df_4] \\ f_{23} = f_R = (1-y_4)\phi_R^{-1}e_{23} + y_4 Df_4 \end{cases} \quad \dots 4.23$$

A partir de ces équations on obtient :

$$\left\{ \begin{aligned} & \phi_{CV} [s \{ (1-x_1)e_3 + x_1 De_1 \}] - sf_1 - sf_2 = 0 \\ & \phi_{RT1} [(1-y_1)f_{12} + y_1 Df_1] - \left[\frac{1}{s} (1-x_2)\phi_{CV}^{-1}f_4 + x_2 De_2 \right] - \left[\frac{1}{s} (1-x_3)\phi_{CT1}^{-1}f_{14} \right] - x_3 De_3 = 0 \\ & \phi_{CV} [s \{ (1-x_2)e_4 + x_2 De_2 \}] - \left[(1-y_3)\phi_{RT3}^{-1}e_8 + y_3 Df_3 \right] - \left[(1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1 Df_1 \right] - Df_7^* = 0 \\ & \phi_{RT1} [(1-y_2)f_{34} + y_2 Df_2] - \left[\frac{1}{s} (1-x_4)\phi_{CT3}^{-1}f_{18} + x_4 De_4 \right] - \left[\frac{1}{s} (1-x_6)\phi_{CT}^{-1}f_{38} \right] - x_6 De_6 = 0 \\ & \phi_{CT1} [s \{ (1-x_3)e_{14} + x_3 De_3 \}] - \left[(1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1 Df_1 \right] + Df_1^* + Df_2^* = 0 \\ & \phi_{RTS} [(1-y_3)f_8 + y_3 Df_3] - \left[\frac{1}{s} (1-x_2)\phi_{CV}^{-1}f_4 + x_2 De_2 \right] - \left[\frac{1}{s} (1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}f_{21} + x_5 De_5 \right] = 0 \\ & \phi_{CTS} [s \{ (1-x_4)e_{18} + x_4 De_4 \}] + \left[(1-y_2)\phi_{RTS}^{-1}e_{34} + y_2 Df_2 \right] + Df_3^* + Df_4^* = 0 \\ & \phi_R [(1-y_4)f_{23} + y_4 Df_4] - \left[\frac{1}{s} (1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}f_{21} + x_5 De_5 \right] + De_1 = 0 \\ & \phi_{CTS} [s \{ (1-x_5)e_{21} + x_5 De_5 \}] + \left[(1-y_4)\phi_R^{-1}e_{23} + y_4 Df_4 \right] + Df_5^* + \left[(1-y_3)\phi_{RT3}^{-1}e_8 + y_3 Df_3 \right] = 0 \\ & \phi_{CL} [s \{ (1-x_6)e_{38} + x_6 De_6 \}] + \left[(1-y_7)\phi_{RT3}^{-1}e_{34} + y_2 Df_2 \right] + Df_5^* - sf_{36} - sf_{37} = 0 \\ & \phi_{CL} [s \{ (1-x_7)e_{39} + x_7 De_7 \}] - sf_{40} - sf_{41} = 0 \end{aligned} \right. \quad \dots 4.24$$

4.9. Relations de redondance analytique des résidus

A partir des variables binaires x_i ($i=1, \dots, 7$) et y_i ($j=1, \dots, 4$) on peut déterminer la structure finale du système de surveillance comme suit :

➤ Pour $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [11011111110]$, les résidus sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = -sf_1 - sf_2 + \phi_{CV} [SDe_1] \\ R_2 = \phi_{RT1} [Df_1] - \frac{1}{s} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_1 - Df_3 - Df_6^* \right) \\ R_3 = \phi_{RT3} [Df_2] - De_4 - De_6 \\ R_4 = \phi_{CT1} [SDe_3] + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\ R_5 = \phi_{RTS} [Df_3] - \frac{1}{s} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_1 - Df_3 - Df_6^* \right) - De_5 \\ R_6 = \phi_{CT3} [SDe_4] + Df_2 + Df_3^* - Df_4^* \\ R_7 = \phi_R [Df_4] - De_5 + De_1^* \\ R_8 = \phi_{CTS} [SDe_5] + Df_3 + Df_4 - Df_5^* \\ R_9 = -sf_{36} - sf_{37} + \phi_{CL} [SDe_6] + Df_2 + Df_7^* \end{array} \right. \quad \dots 4.25$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le tableau 4.1.

	<i>CV</i>	<i>CL</i>	<i>CT1</i>	<i>RT1</i>	<i>CT3</i>	<i>RT3</i>	<i>CTS</i>	<i>RTS</i>	<i>R</i>
R_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R_2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R_4	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R_5	1	0	0	0	0	0	0	1	0
R_6	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R_8	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R_9	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 4.1 : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants *CV*, *CL*, *CT1*, *RT1*, *CT3*, *RT3*, *CTS*, *RTS* et *R* sont surveillables.

➤ Pour $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [01101111110]$, les résidus sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \phi_{RT1} [Df] - [SDe] - [SDe_3] \\ R_2 = \phi_{CV} [SDe_2] - [Df_3] - [Df_1] - sf_5 - sf_6 \\ R_3 = \phi_{CT1} [SDe_3] + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\ R_4 = \phi_{RTS} [Df_3] - De_2 - De_5 \\ R_5 = \phi_{CT3} [SDe_4] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_3^* + Df_4^* \\ R_6 = \phi_R [Df_4] - De_5 + De_1^* \\ R_7 = \phi_{CTS} [SDe_5] + Df_3 + Df_4 \\ R_8 = \phi_{CL} [SDe_6] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_7^* - sf_{36} - sf_{37} \end{array} \right. \quad \dots 4.26$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le tableau 4.2.

	<i>CV</i>	<i>CL</i>	<i>CT1</i>	<i>RT1</i>	<i>CT3</i>	<i>RT3</i>	<i>CTS</i>	<i>RTS</i>	<i>R</i>
R_1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
R_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R_5	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R_6	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R_8	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau 4.2 : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants *CV*, *CL*, *CT1*, *RT1*, *CT3*, *RT3*, *CTS*, *RTS* et *R* sont surveillables.

➤ Pour $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [00101111110]$, on obtient les résidus suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = -sf_5 - sf_6 + \phi_{CV} [SDe_1] - \phi_{RT1} [De_1 + De_3] - Df_1^* \\ R_2 = \phi_{CT1} [SDe_3] + \phi_{RT1} [De_1 + De_3] + Df_1^* + Df_2^* \\ R_3 = \phi_{RTS} [Df_3] + De_2 - De_5 \\ R_4 = \phi_{CT3} [SDe_4] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_3^* + Df_4^* \\ R_5 = \phi_R [Df_4] - De_5 + De_1^* \\ R_6 = \phi_{CTS} [SDe_5] + Df_3 + Df_4 + Df_5^* \\ R_7 = \phi_{CL} [SDe_6] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_7 - sf_{36} - sf_{37}^* \end{array} \right. \dots 4.27$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le tableau 4.3.

	CV	CL	CT1	RT1	CT3	RT3	CTS	RTS	R
R_1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R_2	0	0	1	1	0	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R_4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
R_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R_7	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau 4.3 : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulle, donc les composants CV , CL , $CT1$, $RT1$, $CT3$, $RT3$, CTS , RTS et R sont surveillables.

➤ Pour $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [01001111010]$, les résidus sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \phi_{RT1} [Df_1] - \left[\frac{1}{S} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_6^* - Df_1 - Df_3 \right) \right] - [De_3] \\ R_2 = \phi_{CT1} [SDe_3] + Df_1 + Df_1 + Df_2^* \\ R_3 = \phi_{RTS} [Df_3] - \left[\frac{1}{S} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_6^* - Df_1 - Df_3 \right) \right] - \left[\frac{1}{S} \phi_{CTS}^{-1} \left(Df_4 - Df_3 - Df_5 \right) \right] \\ R_4 = \phi_{CT3} [SDe_3] + Df_1 + Df_1 + Df_2^* \\ R_5 = \phi_R [Df_4] - \left[\frac{1}{S} \phi_{CTS}^{-1} \left(-Df_4 - Df_3 - Df_5 \right) \right] + De_1^* \\ R_6 = \phi_{CL} [SDe_6] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_7 - sf_{36} - sf_{37}^* \end{array} \right. \dots 4.28$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le tableau 4.4.

	<i>CV</i>	<i>CL</i>	<i>CT1</i>	<i>RT1</i>	<i>CT3</i>	<i>RT3</i>	<i>CTS</i>	<i>RTS</i>	<i>R</i>
R_1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R_3	1	0	0	0	0	0	1	1	0
R_4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
R_5	0	0	0	0	0	0	1	0	1
R_6	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau 4.4 : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles donc les composants *CV*, *CL*, *CT1*, *RT1*, *CT3*, *RT3*, *CTS*, *RTS* et *R* sont surveillables. D'après les résultats du tableau 4, on constate que la combinaison qui assure la surveillabilité des 9 composants avec le minimum de capteurs est [01001111010].

On voit que ces relations sont sensibles à plusieurs composants d'actionneurs et de capteurs.

Nombre de capteurs	Combinaisons	Surveillances	DéTECTABLES
9	11011111110	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ
9	10000100111	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ
9	01001111000	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ
8	01101111110	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ
7	00101111110	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ
6	01001111010	<i>CV,CL,CT1,RT1,CT3,RT3,CTS,RTS,R</i>	ϕ

Tableau 4.5 : Résultats de placement des capteurs

4.10. Application

4.10.1. Essais sur le processus et résultats

1.1.1. 4.10.1.1. Défaillance sur les détecteurs

On peut construire une base de simulation du modèle bond graph, ainsi que l'ensemble des relations de redondance analytique générées à l'aide du logiciel Symbols2000. Comme déjà vue, le bond graph permet une analyse du modèle de façon qualitative.

Pour cela, on prend des valeurs arbitraires unitaires pour la simulation du modèle pour cela on crée à l'aide de l'interface de simulation des coupures sur les composants comme des défaillances pour tester la sensibilité des résidus.

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. En fonctionnement normal, les résidus doivent être constamment nuls ce n'est pas toujours le cas, car les erreurs de modélisation introduisent des résidus différents de zéro.

➤ **La sensibilité du détecteur Df_1 :**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 2s, T_2 = 2.1s$ et intègre une défaillance à la jonction 1_{RT1} . Les sensibilités du détecteur Df_1 interviennent fortement dans les résidus $RRA1$, $RRA2$ et $RRA3$. On voit que les RRAs générées se réagissent rapidement par leurs déviations à ses valeurs (*près de 0*), comme le montre dans les figures 10,11 et 12.

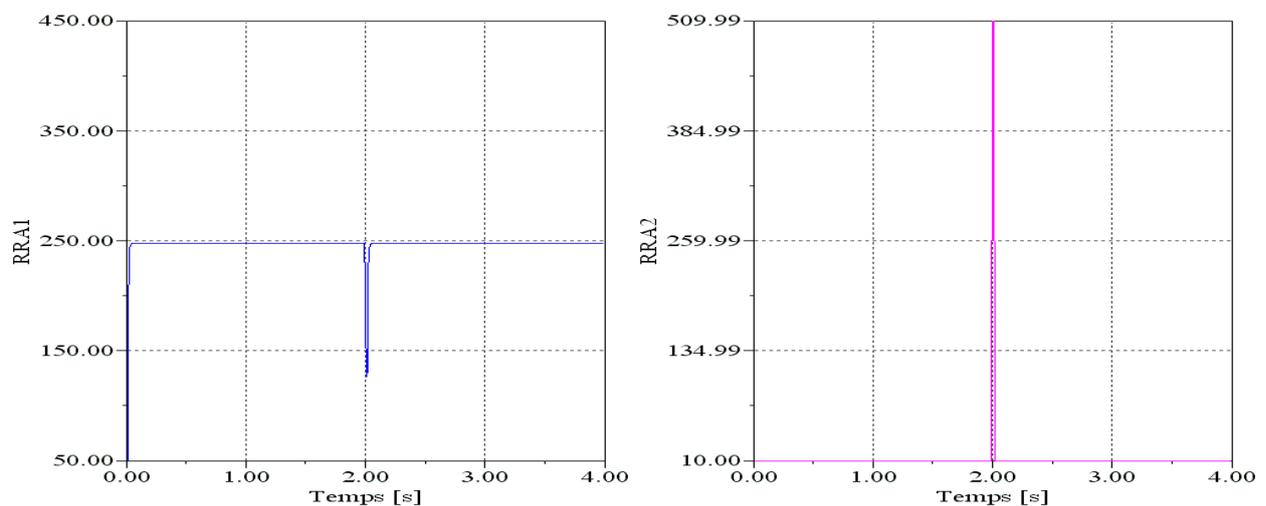


Figure 4.10 : Sensibilité du RRA1 et RRA2 à la défaillance du capteur Df_1

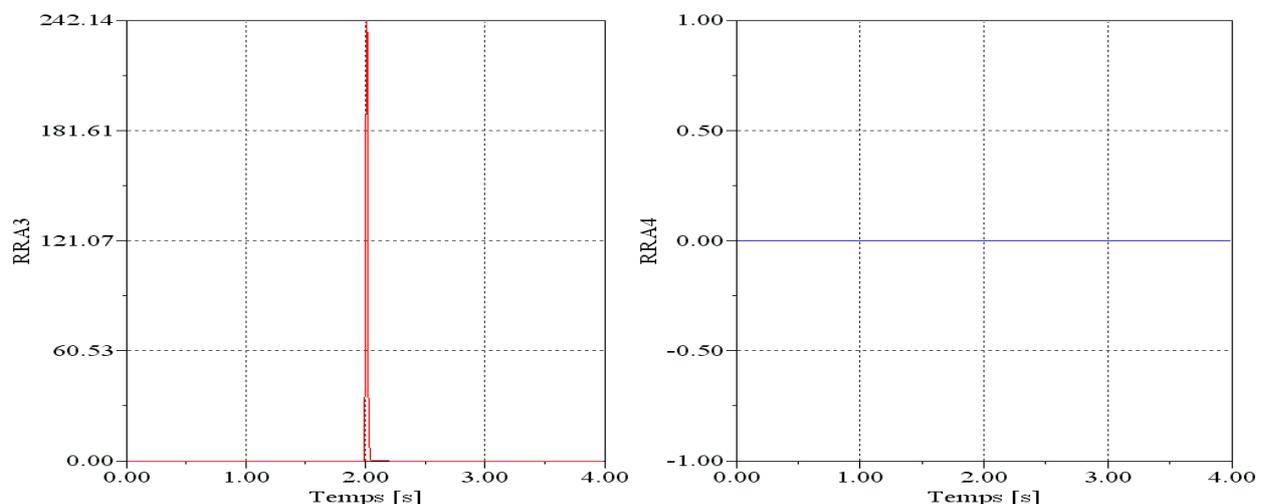


Figure 4.11 : Défaillance dans le résidu $RRA3$ et fonctionnement normal du résidu $RRA4$

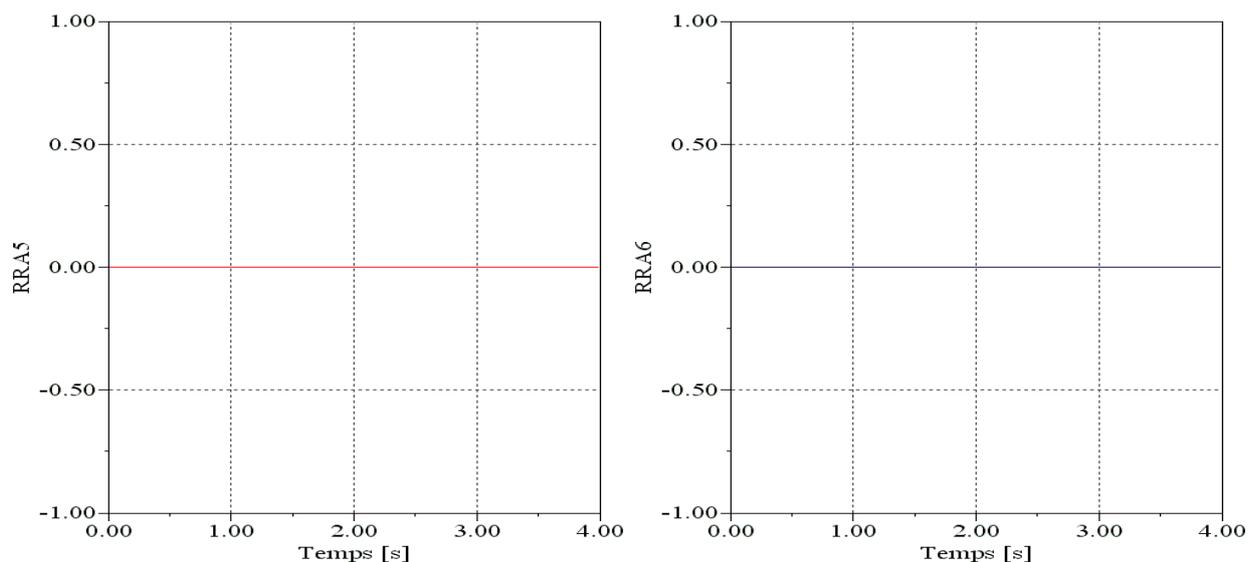


Figure 4.12 : Fonctionnement normal du résidu $RRA5$ et $RRA6$

On constate que les résidus $RRA1$, $RRA2$ et $RRA3$ sont sensibles aux défaillances du détecteur pour cette durée, parce que les deux résidus dépendent au détecteur De_3 , par contre les résidus $RRA4$, $RRA5$ et $RRA6$ sont nuls car, le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus parce que la puissance de l'information est trop faible, et elle diminue jusqu'à 1 et ce résidu est indépendant du détecteur Df_1 (le fonctionnement de ce résidu est normal).

➤ **La sensibilité du détecteur Df_3**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 2s$, $T_2 = 2.1s$ et intègre une défaillance à la jonction l_{RTS}

Les sensibilités du détecteur Df_3 interviennent dans les résidus $RRA1$, $RRA3$ et $RRA5$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures 13, 14 et 15.

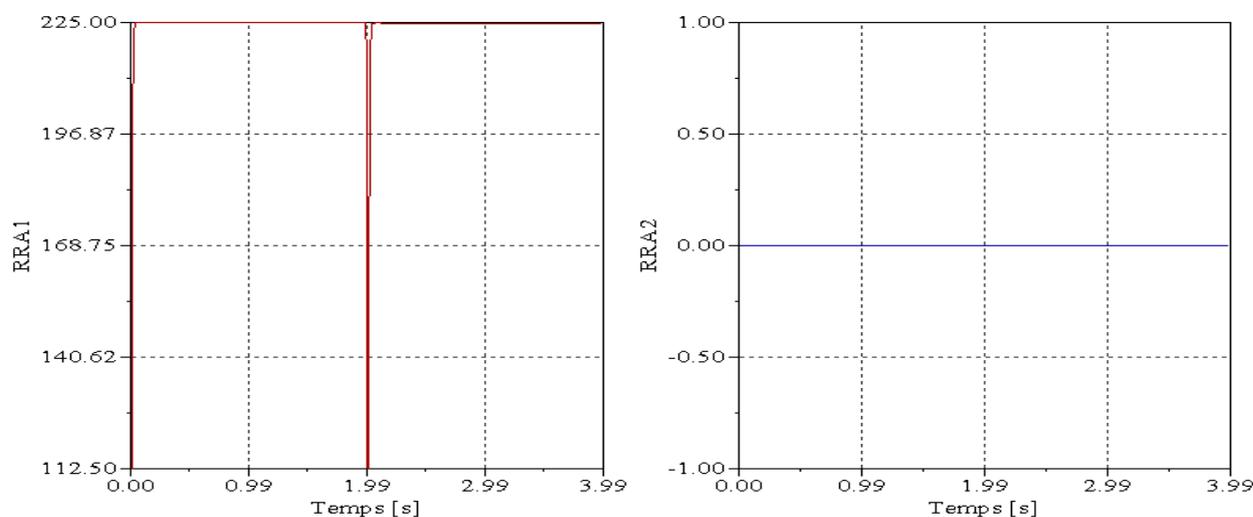


Figure 4.13 : Défaillance dans le résidu $RRA1$ et fonctionnement normal du résidu $RRA2$

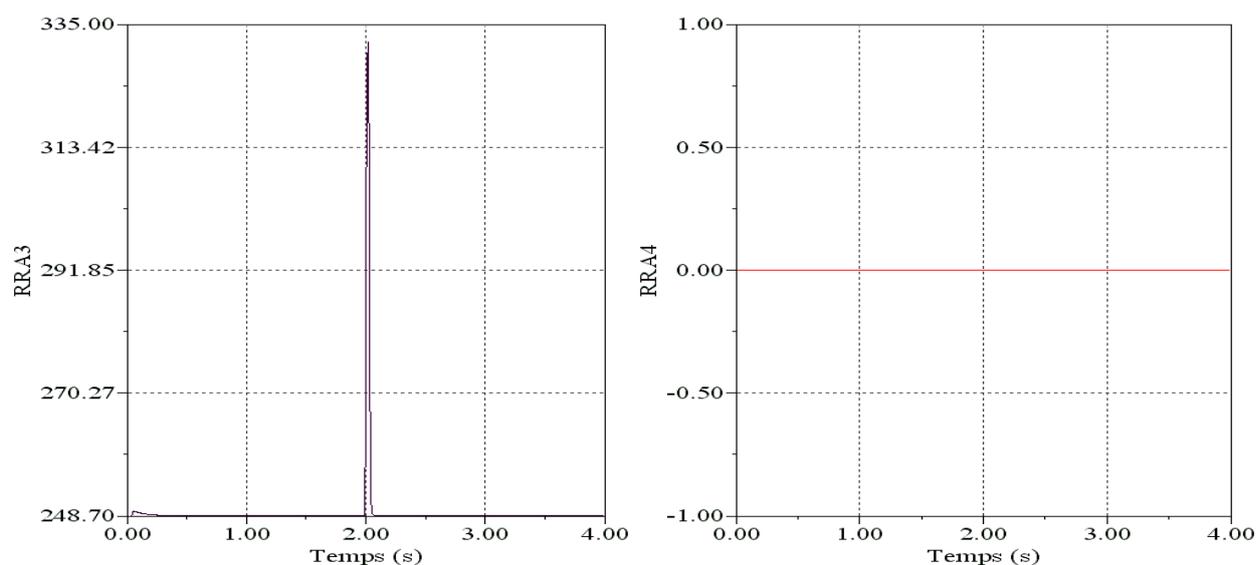


Figure 4.14 : Défaillance dans le résidu $RRA3$ et fonctionnement normal du résidu $RRA4$

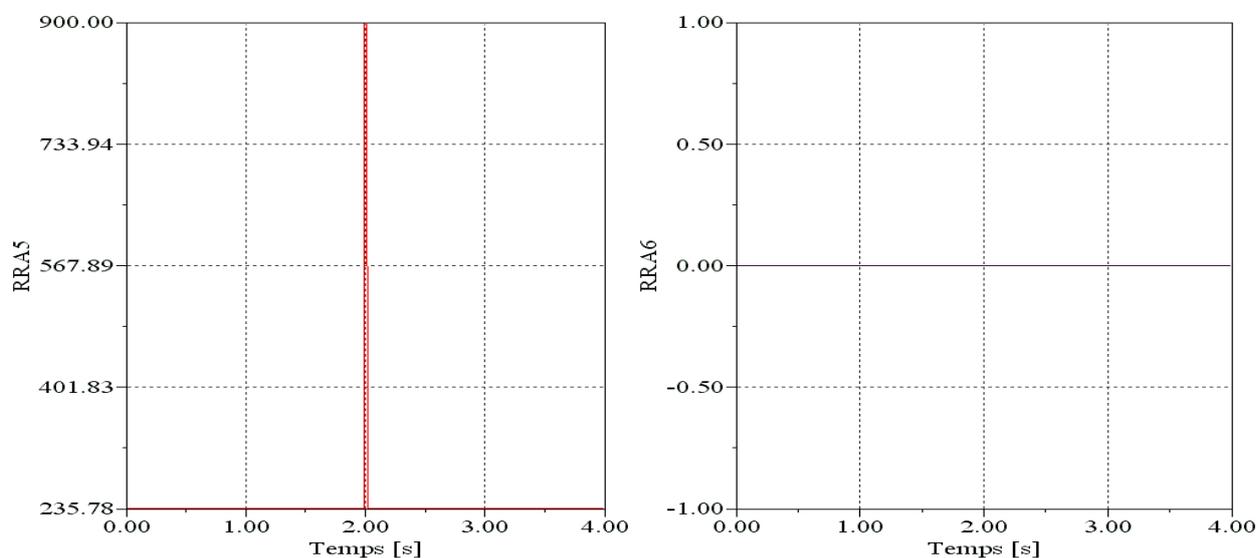


Figure 4.15 : Défaillance dans le résidu $RRA5$ et fonctionnement normal du résidu $RRA6$

On remarque que les résidus $RRA1$, $RRA3$ et $RRA5$ sont sensibles aux défaillances du détecteur, cela est dû au fait que le détecteur Df_3 intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus $RRA2$, $RRA4$ et $RRA6$ sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (*le fonctionnement de ces résidus est normal*).

➤ **La sensibilité du détecteur Df_4**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 2s$, $T_2 = 2.05s$ et intègre une défaillance à la jonction l_R .

Les sensibilités du détecteur Df_4 interviennent dans les résidus $RRA3$ et $RRA5$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures 16,17 et 18.

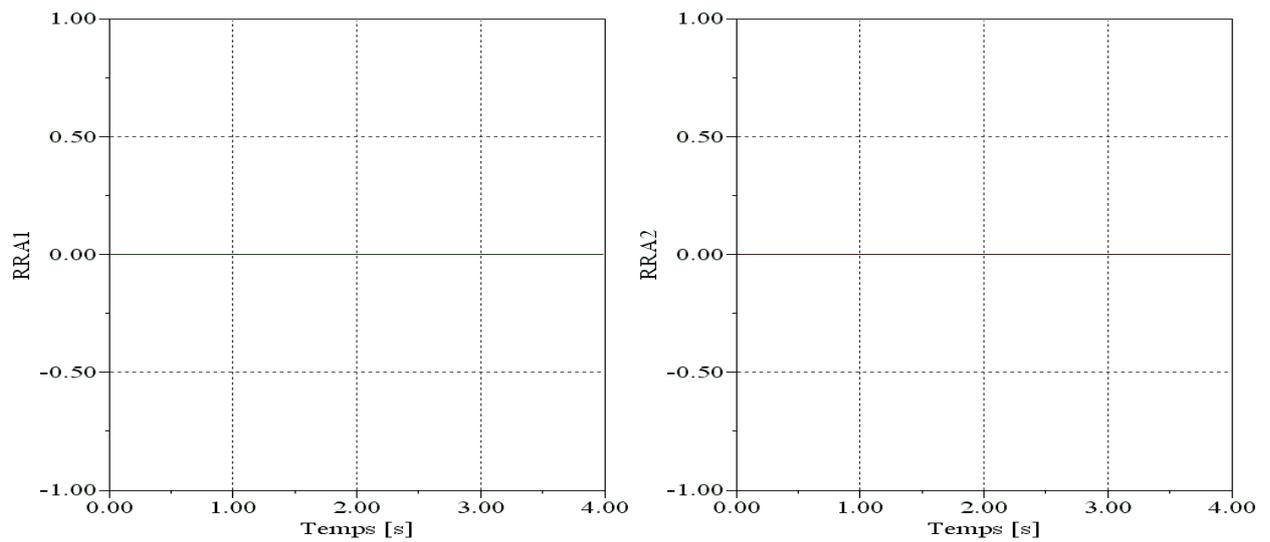


Figure 4.16 : Fonctionnement normal du résidu *RRA1* et *RRA2*

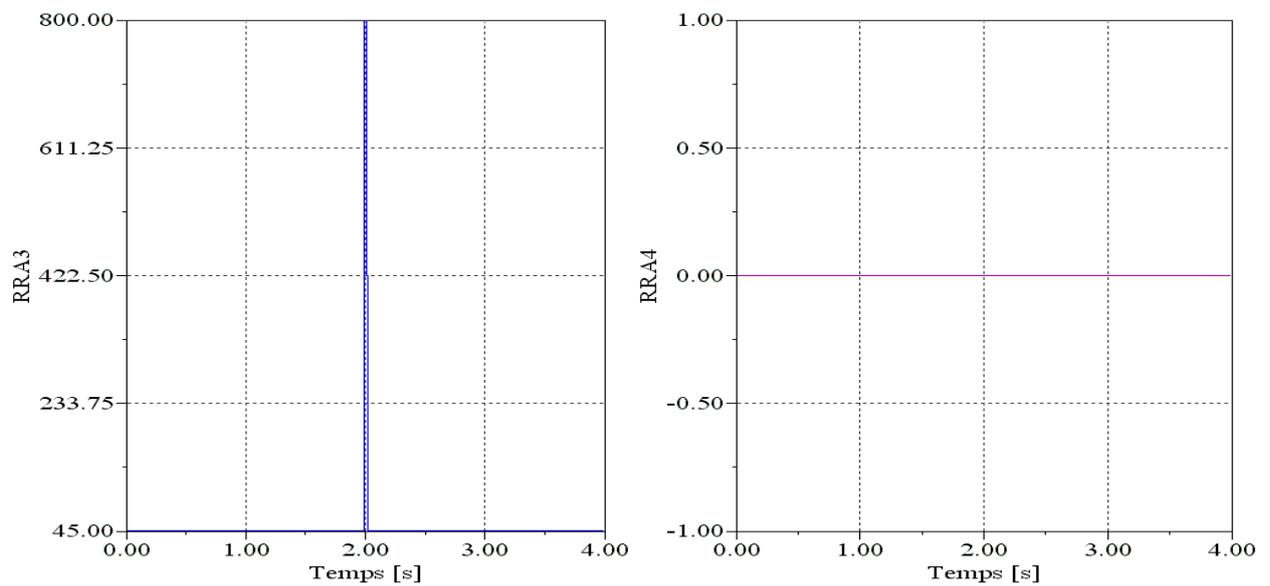


Figure 4.17 : Défaillance dans le résidu *RRA3* et fonctionnement normal du résidu *RRA4*

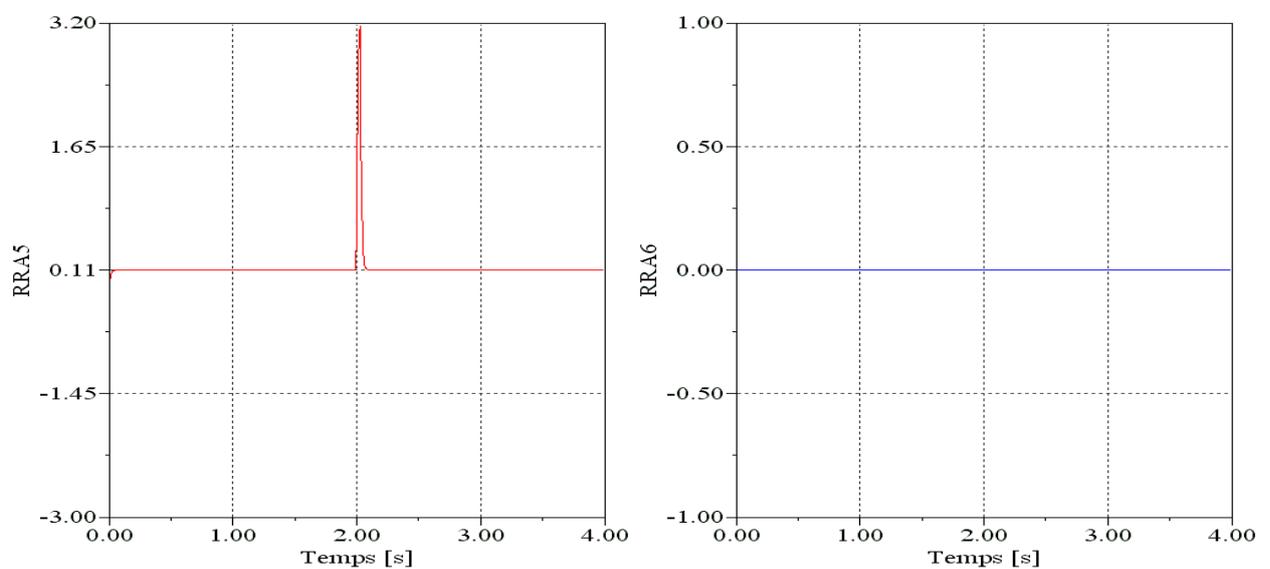


Figure 4.18 : Défaillance dans le résidu *RRA5* et fonctionnement normal du résidu *RRA6*

On constate que les résidus $RA3$ et $RA5$ sont sensibles aux défaillances du détecteur, cela est dû au fait que le détecteur Df_4 intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus $RA1$, $RA2$, $RA4$ et $RA6$ sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (*le fonctionnement de ces résidus est normal*).

➤ **La sensibilité du détecteur De_3**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 2s$, $T_2 = 2.1s$ et intègre une défaillance à la jonction 0_{CT1} .

Les sensibilités du détecteur De_3 interviennent dans les résidus $RA1$ et $RA2$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures 19, 20 et 21.

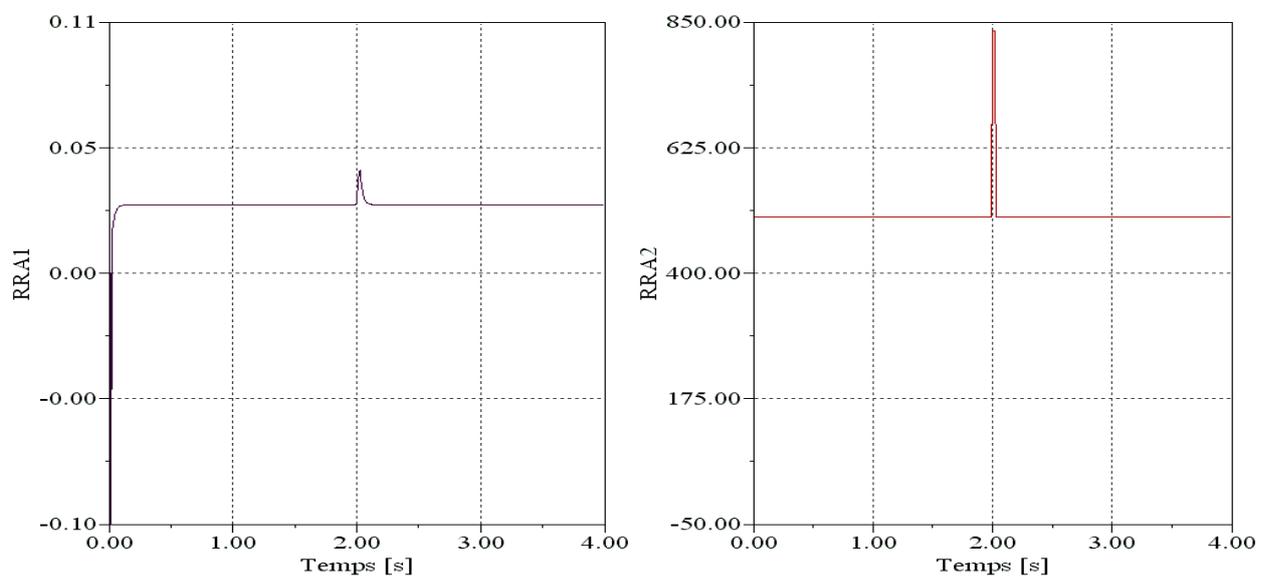


Figure 4.19 : Sensibilité du $RA1$ et $RA2$ à la défaillance du capteur De_3

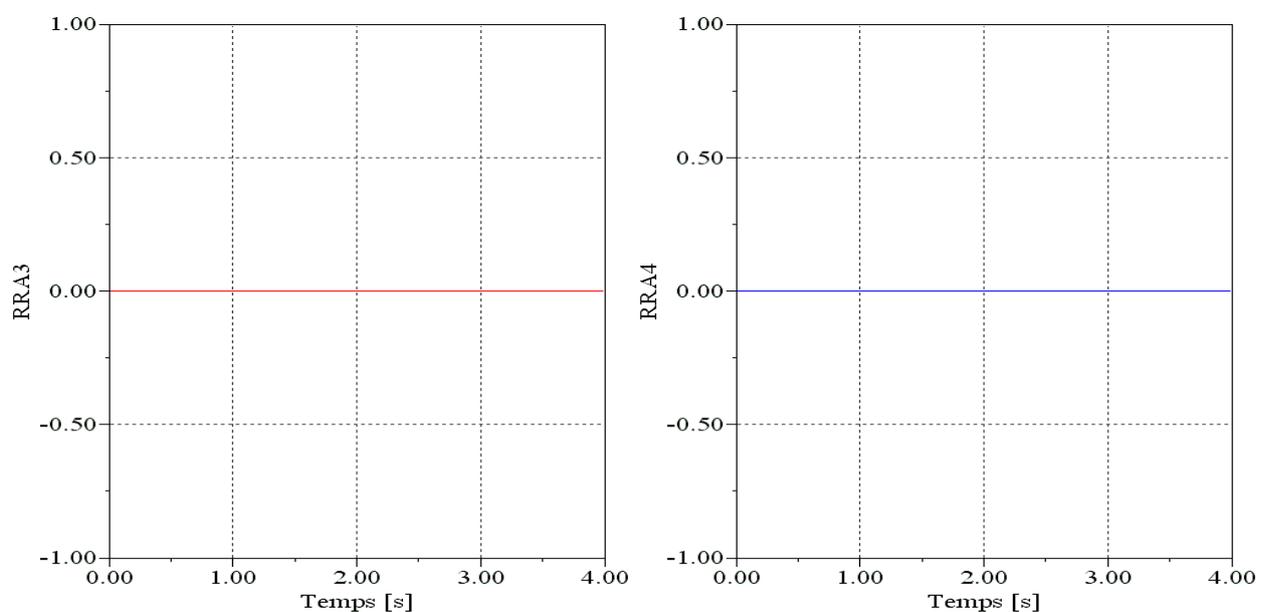


Figure 4.20 : Fonctionnement normal du résidu $RA3$ et $RA4$

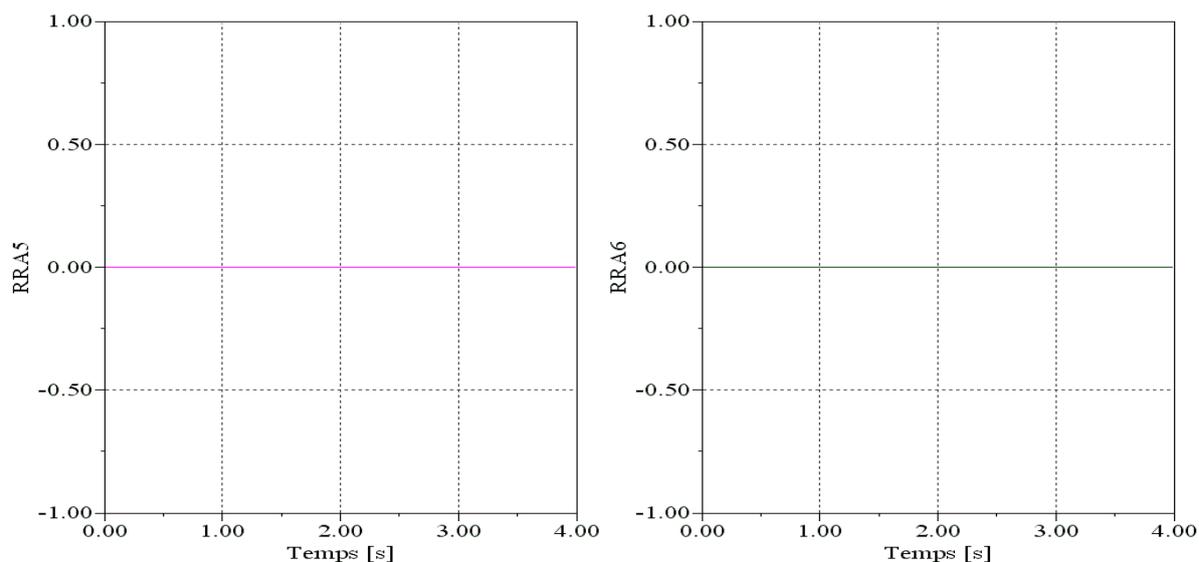


Figure 4.21 : Défaillance dans le résidu $RRA3$ et fonctionnement normal du résidu $RRA4$

On constate que les résidus $RRA1$ et $RRA2$ sont sensibles aux défaillances du détecteur, cela est dû au fait que le détecteur De_3 , intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus $RRA3$, $RRA4$, $RRA5$ et $RRA6$ sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

➤ **La sensibilité du détecteur De_4**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 1.5s$, $T_2 = 1.6s$ et intègre une défaillance à la jonction 0_{CT3} .

Les sensibilités du détecteur De_4 interviennent dans les résidus $RRA4$ et $RRA6$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures 22, 23 et 24

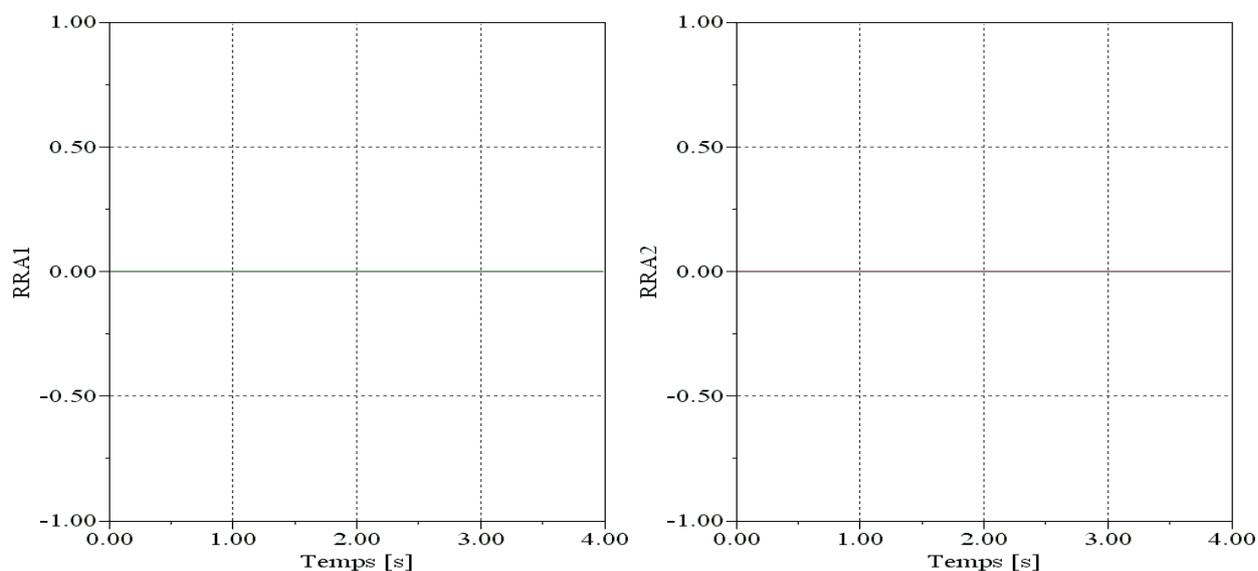


Figure 4.22 : Fonctionnement normal du résidu $RRA1$ et $RRA2$ du capteur De_4

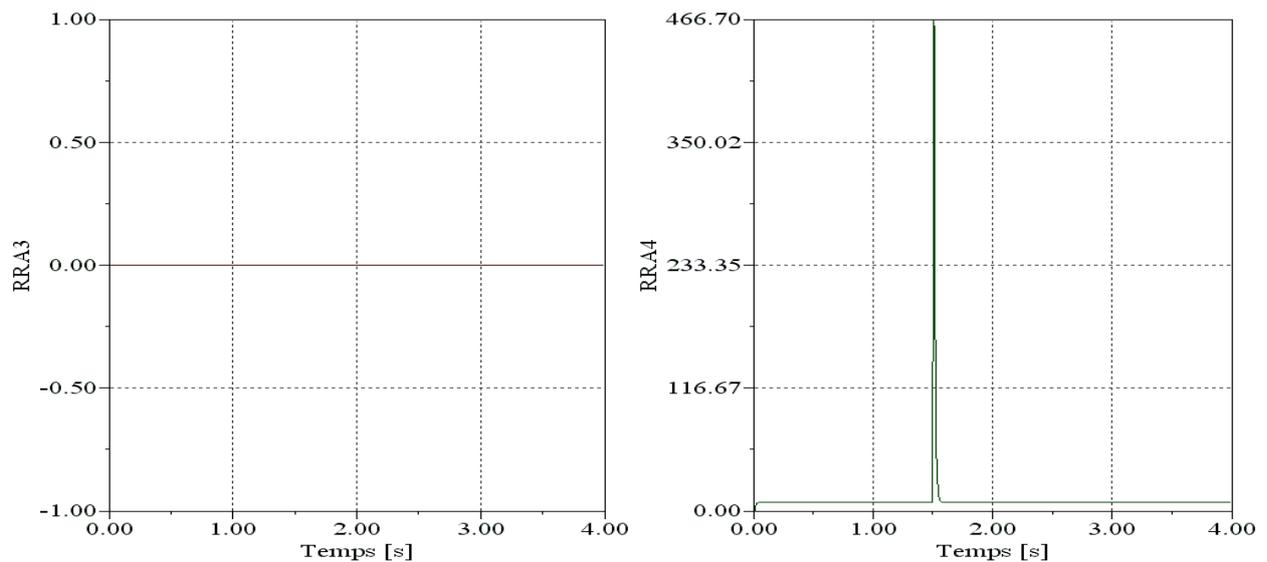


Figure 4.23 : fonctionnement normal du résidu $RRA3$ et défaillance dans le résidu $RRA4$

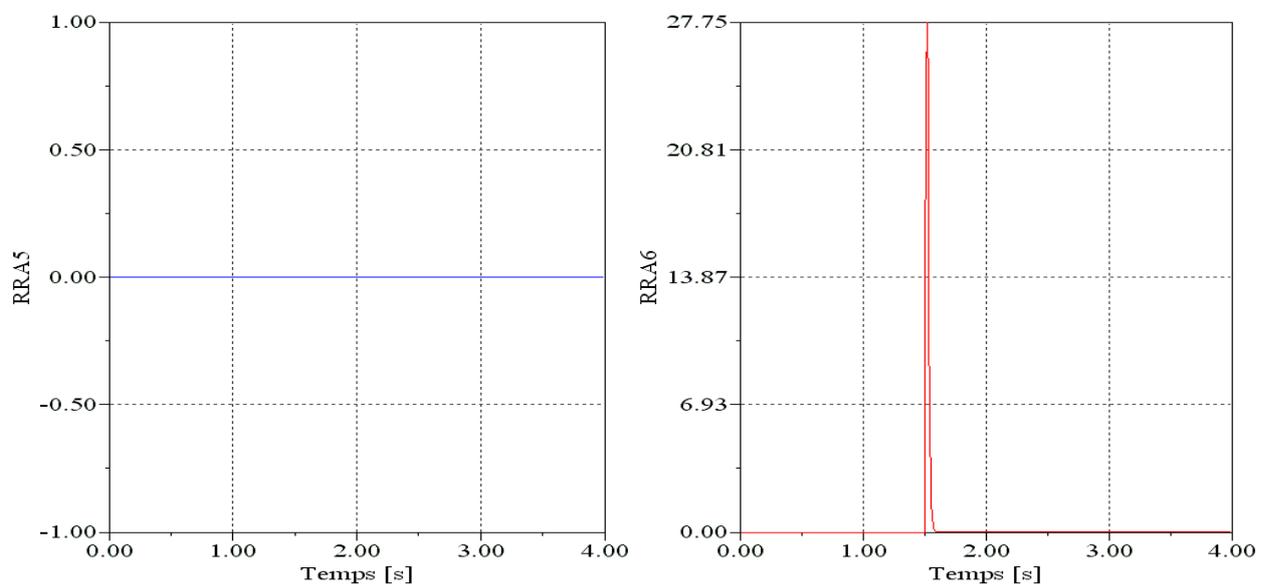


Figure 4.24 : Fonctionnement normal du résidu $RRA5$ et défaillance dans le résidu $RRA6$

On remarque que les résidus $RRA4$ et $RRA6$ sont sensibles aux défaillances du détecteur, cela est dû au fait que le détecteur De_4 intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus $RRA1$, $RRA2$, $RRA3$ et $RRA5$ sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (*le fonctionnement de ces résidus est normal*).

➤ **La sensibilité du détecteur De_6**

On crée un défaut entre le temps $T_1 = 2s$, $T_2 = 2.05s$ et intègre une défaillance à la jonction 0_{CL} .

Les sensibilités du détecteur De_6 interviennent dans les résidus $RRA4$ et $RRA6$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures 25, 26 et 27.

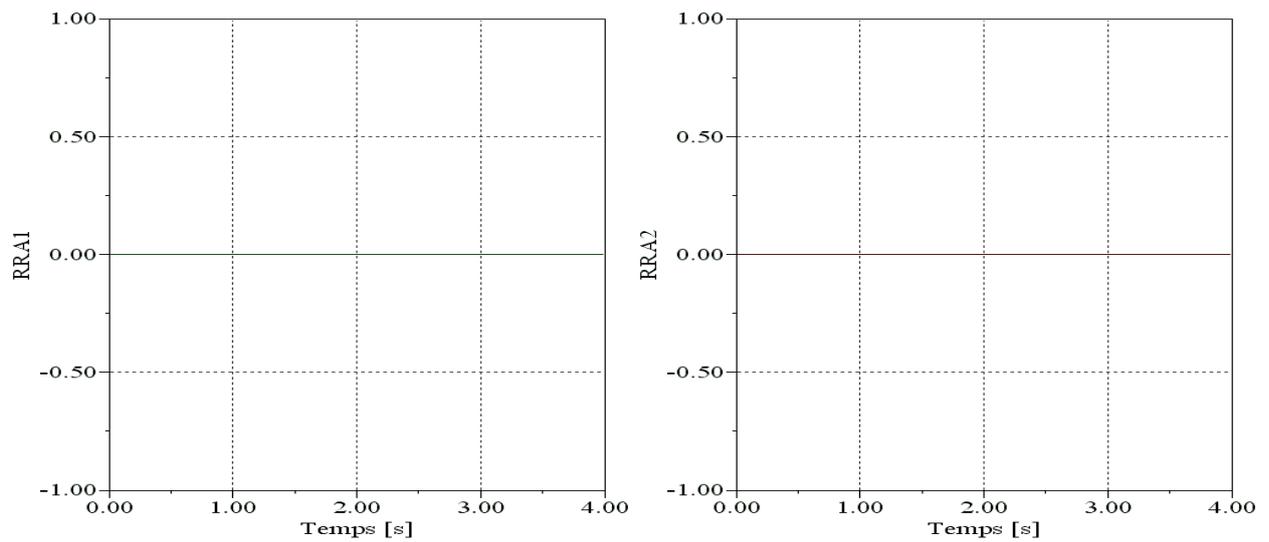


Figure 4.25 : Fonctionnement normal du résidu $RRA1$ et $RRA2$ du capteur De_6

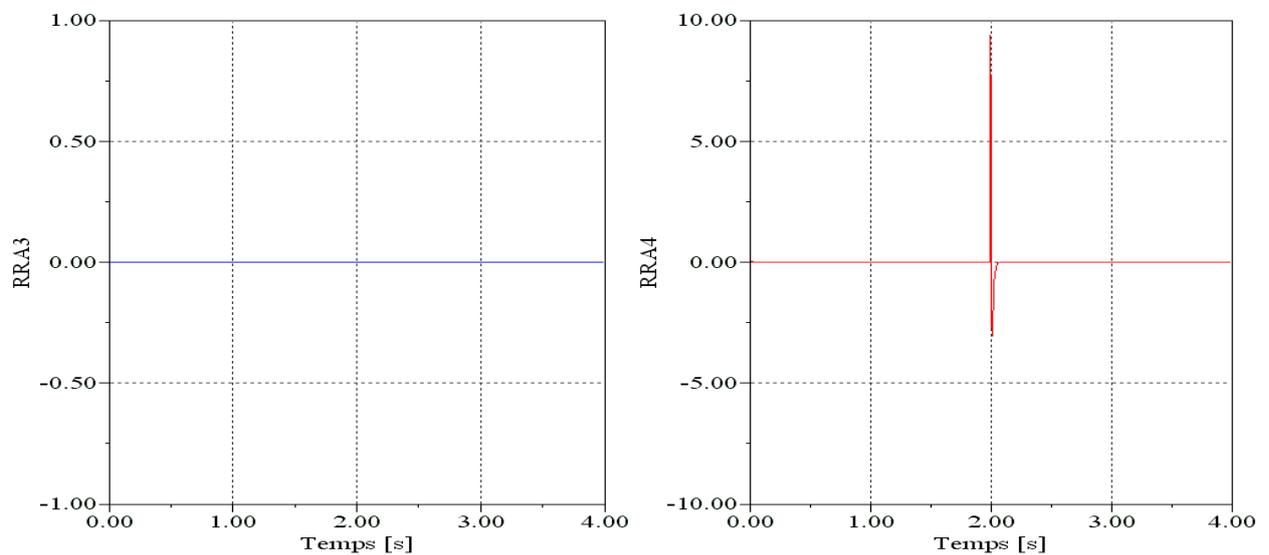


Figure 4.26 : Fonctionnement normal du résidu $RRA3$ et défaillance dans le résidu $RRA4$

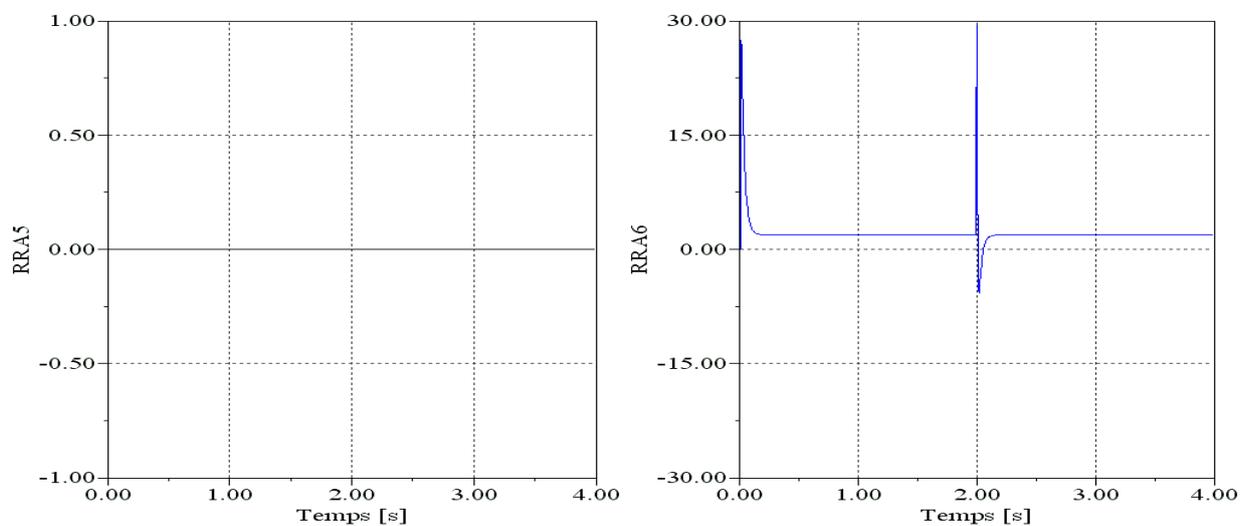


Figure 4.27 : Fonctionnement normal du résidu $RRA5$ et défaillance dans le résidu $RRA6$

On constate que les résidus $RRA4$ et $RRA6$ sont sensibles aux défaillances du détecteur, cela est dû au fait que le détecteur De_6 , intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus $RRA1$, $RRA2$, $RRA3$ et $RRA5$ sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (*le fonctionnement de ces résidus est normal*).

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

4.10. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre des approches complètement basées sur le bond graph pour la conception d'un système de surveillance à base de modèle qui consiste à utiliser les relations de structure de jonction pour générer les relations de redondance analytique (*indicateurs de défaillance*). Le placement des capteurs n'est pas clairement montré dans le processus. Les équations de contrainte ne sont pas déduites d'une façon systématique. Il n'existe pas dans la littérature de méthode générique et globale de génération des RRAs. Les simulations sont faites pour montrer l'efficacité de la méthode pour la détection des défauts.

L'outil bond graph permet de générer d'une façon systématique les RRAs directement à partir du bond graph. Dans la littérature les systèmes physiques concernés par cette méthodologie sont décrits par une simple énergie (*bond graph monoénergie*) et concernent des systèmes linéaires et en boucle ouverte. Les défaillances détectées sont de type source de contrôle (*source d'effort ou de flux*) et capteurs. La génération des RRAs sur le bond graph est basée sur le parcours de chemins causaux sur le modèle graphique pour le diagnostic des défauts affectant les sources de contrôle. Ceci est exprimé sur un graphe bi-parti orienté par l'ordre d'élimination des variables inconnues. Pour un système non linéaire la procédure est complexe et le choix des couplages est souvent intuitif. Le graphe devient rapidement complexe avec l'augmentation du nombre de variables.

Références Bibliographiques

- [1] M. ALHAJ DIBO, *Validation de données et diagnostic des systèmes incertains à l'aide de l'analyse par intervalle*. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 18 juillet 2005
- [2] Y. Boudjemline, K. Nemla, *Surveillance d'un système des réservoirs par Bond Graph*. Mémoire d'ingénieur d'état, institut d'électrotechnique, université de Sétif. Juin 2005
- [3] F. Busson. *Les Bond Graphs multienergie pour la modélisation et surveillance en génie des procédés*. France, 2002.
- [4] W. Elost, *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 2005.
- [5] M. Khemliche, B. Ouled Bouamama et H. Haffaf, *Sensors and actuators journal « sensors placement for diagnosability on Bond Graph model*, page 92-98, volume 4, Mars 2006.
- [6] C. Lurette, *Développement d'une technique auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives : Application à la supervision d'une presse hydraulique*. Thèse de Doctorat université de Lille, 2003.
- [7] K. Medjaher, *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels*. Thèse de Doctorat université de Lille, 2005.
- [8] A. Molina, *Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic*. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2005.
- [9] R. Mrani Alaoui Maître IIEEA, *Conception d'un module de diagnostic a base des suites de bandes temporelles en vue de la super vision des procédés énergétique, 'Application en ligne à un générateur de vapeur'*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 9 Novembre 2004.
- [10] W. Nuninger, *Stratégie de diagnostic robuste à l'aide de la redondance analytique*. Thèse de Doctorat université de Lorraine, 1997.
- [11] B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, R. Litwak, *Surveillance d'un générateur de vapeur, in: Automatique et statistiques pour le diagnostic*, B. Dubuisson, ed, 166-199, Hermès, Paris, décembre 2001.

- [12] S. Rimaux, Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph. Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995.
- [13] M. Tagina, *Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 1995.
- [14] S. Taouaf, *Diagnostic logique des systèmes complexe dynamiques dans un contexte multi agent*. Thèse de Doctorat université de Grenoble 1, 2005.
- [15] R. Toscano, *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques*. Ellipses, Paris, 2005.
- [16] M. Vergé et D. Jaune, *Détection de défauts par estimation d'état*. In AGI97, Angers, France, 1997.
- [17] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances*. Hermes, Paris, 1995.

Conclusions Générales et Perspectives

1. Conclusion

Les systèmes en génie de procédés sont caractérisés par la mise en œuvre d'énergies multiples. L'outil bond graph à vocation pluridisciplinaire permet de décrire par une approche unifiée ce type de procédé. Toutefois la complexité de ces phénomènes nécessite une analyse pour le choix des variables de puissance. L'application de cet outil sur un condenseur a permis de représenter clairement les phénomènes de stockage et de dissipation d'énergie au sein du système grâce au caractère graphique du modèle d'une part et de prédire l'évolution du système grâce à sa représentation dynamique d'autre part.

Dans ce travail on a réalisé une simulation sur un modèle d'un condenseur d'une colonne de distillation discontinue de type (UPO3A). On a vu que le condenseur est un élément essentiel permettant d'assurer l'échange thermique entre deux phases "*liquide et vapeur*". Ce modèle a été validé par l'utilisation du logiciel Symbols2000.

L'outil bond-graph et le logiciel Symplos2000 se sont avérés des moyens puissants et commodes pour élaborer des modèles en vue de la surveillance. Les résultats ont été satisfaisants, étant donné qu'on a simulé des processus avec les paramètres correspondants à une autre modélisation, et on a obtenu des résultats similaires. L'analyse des résultats obtenus a permis de mettre en évidence l'évolution des variables d'état du système au cours du temps. Cette analyse a permis de mieux comprendre les aspects dynamiques du système.

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.

La 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 d'une part et l'identification paramétrique d'autre part.

La surveillance par Bond Graph a déjà fait l'objet de divers travaux, la transformation du Bond Graph constitue une étape supplémentaire pour la génération des relations de redondance analytique. Il illustre l'application de Redondance Analytique de système non linéaire en industrie (le condenseur de vapeur) qui s'intéresse aux défauts du processus, on utilise un algorithme de placement de capteurs pour détecter et isoler ces défauts et assure la surveillance et la localisation des défaillances de ce processus avec le minimum de capteurs. Les résidus ont été produits à travers l'analyse structurelle des équations du système, publiée d'une modélisation Bond Graph.

Enfin, dans ce qui a été réalisé, les résultats trouvés dans la partie simulation sont intéressants car les courbes réagissent exactement aux défauts injectés à l'instant précis, ceci confirme l'efficacité de cette méthodologie.

2. Perspectives

Durant ce travail on a relevé quelques points méritant d'être développés plus tard :

- Usage de la notion de la bicausalité au lieu de la causalité sur chaque lien (*qui a été utilisée pour l'inversion des systèmes, estimations paramétriques et le dimensionnement des actionneurs*) pour exploiter tous les couplages possibles à la génération de RRAs.
- Détermination des seuils de déclenchement adaptatifs dans la procédure de décision.
- Etendre les procédures développées dans ce travail aux processus représentés par des modèles à paramètres distribués (*en utilisant l'outil bond graph*). Ainsi, nous serons en mesure de détecter des défaillances dépendant du temps et de l'espace.

Cette complexité présente dans les processus chimiques introduit une voie de recherche intéressante car elle s'inscrit dans le cadre de la protection de l'environnement.

ملخص: إن أنظمة هندسة الطرائق مميزة باستخدامها للطاقات المتعددة. إن أداة الربط البيانية بخصائصها الهيكلية و السببية من جهة و بأسلوبها المتعدد المجالات لانجاز النماذج بطريقة عملية من جهة أخرى يسمح للطبيعة البيانية للمساهمة في تصميم أنظمة المراقبة لهذا النوع من الصناعات. حيث تطبيق هذه الأداة على المكثف ترخص من جهة إظهار بوضوح ظواهر تخزين وضياع الطاقة داخل النظام بفضل الخصائص البيانية لهذا النظام و من جهة أخرى تنبأ تغير هذا النظام بفضل التمثيل الديناميكي.

العمل المتطرق إليه, يضم جزأين لنموذج لمكثف أنبوب التقطير: الأول نصف فيزيائي و يهتم بإيجاد نموذج بواسطة الرابطة البيانية, أما الثاني يتعلق بالبحث عن نموذج رياضي بواسطة تشخيص عنصري لمعطيات تجريبية. بعدها قمنا بمقارنة النموذجين مع الوضع في الحسبان قبل البدء في العمل استخراج الاختلاف الفيزيائي بين هاتين الطريقتين في عملية الحصول على نموذج كفاء, دقيق و عملي للنظام التارموديناميكي. في الأخير نهتم بالشوائب الزائدة حيث نستعمل خوارزمية لوضع الملتقطات (أجهزة المراقبة) المستندة على العلاقات التحليلية الزائدة لنضام غير خطي من أجل كشف, فصل الشوائب و ضمان المراقبة و حصر اعطاب هذا الجهاز بأقل عدد ممكن من الملتقطات.

الكلمات المفتاحية: الروابط البيانية, هندسة الطرائق, المكثف, عملية الحصول على النموذج, المراقبة, التشخيص, العلاقات التحليلية الزائدة و الملتقطات.

Abstract: The systems in process engineering are characterized by the implementation of multiple energies. The Bond graph tool by its structural, causal properties and multidisciplinary character for the realization of models in a generic way is introduced for the contribution to the design of the monitoring systems for this type of process. The application of this tool on a condenser permitted to represent the phenomena of storage and dissipation of energy clearly on the one hand within the system thanks to the graphic character of the model and to predict the evolution of the system on the other hand thanks to its dynamic representation.

The work developed here concerns two shutters of modelling of the distillation column. The first is semi-physical and it concerns the modelling by bond graph, on the other hand the second concerns the research of a mathematical model by the technique of parametric identification with a comparison between the two models has been taken in account in order to make take out again the physical difference between the two processes of modelling to find a model precise and exploitable of the thermodynamic system. It illustrates Analytical Redundancy Relations of non linear system in industry (*the condenser of steam*) that is interested in the faults of the process, one uses an algorithm of placement of sensors to detect and to isolate these faults and assure the monitoring and the localization of the failures of this process with the minimum of sensors.

Key-word: Bond Graphs, Process Engineering, Condenser, Modelling, Monitoring, Identification, Analytical Redundancy Relations and Sensors.

Résumé : Les systèmes en génie de procédés sont caractérisés par la mise en œuvre d'énergies multiples. L'outil bond graph à ses propriétés structurel et causal d'une part, et à caractères multi disciplinaires pour réaliser les modèles généraux d'autre part, permet la contribution pour designer les processus de surveillance pour ces types des procédés. L'application de cet outil sur un condenseur a permis de représenter clairement les phénomènes de stockage et de dissipation d'énergie au sein du système grâce au caractère graphique du modèle d'une part et de prédire l'évolution du système grâce à sa représentation dynamique d'autre part.

Le travail développé ici concerne deux volets de modélisation de la colonne de distillation. La première est semi-physique et elle concerne la modélisation par bond graph, par contre la seconde concerne la recherche d'un modèle mathématique par la technique d'identification paramétrique avec une comparaison entre les deux modèles a été prise en compte afin de faire ressortir la différence physique entre les deux procédés de modélisation pour trouver un modèle précis et exploitable du système thermodynamique. Il illustre les Relations de Redondance Analytique de système non linéaire en industrie (*le condenseur de vapeur*) qui s'intéresse aux défauts du processus, on utilise un algorithme de placement de capteurs pour détecter et isoler ces défauts et assure la surveillance et la localisation des défaillances de ce processus avec le minimum de capteurs.

Mots clés : Bond graph, Génie des procédés, Condenseur, Modélisation, Surveillance, Identification, Relations de Redondance Analytique et Capteurs.