

Liste des abréviations

<i>BG</i>	Bond Graph.
<i>De</i>	Détecteur d'effort.
<i>Df</i>	Détecteur de flux.
<i>Se</i>	Source d'effort.
<i>Sf</i>	source de flux.
<i>R</i>	Résistance.
<i>C</i>	Capacité.
<i>I</i>	Inertie.
<i>GY</i>	Gyrateur.
<i>TF</i>	Transformateur.
<i>MSe</i>	Sources modulées d'effort.
<i>MSf</i>	Sources modulées de flux.
<i>MGY</i>	Gyrateur modulé.
<i>MTF</i>	Transformateur modulé.
<i>SSe</i>	Source de signal.
<i>RRA</i>	Relation de redondance analytique.

<i>FDI</i>	Fault Detection and Isolation.
<i>FTC</i>	Fault Tolerant Control.
<i>BGI</i>	Bond graph en causalité intégrale.
<i>BGD</i>	Bond graph en causalité dérivée.
<i>e</i>	effort.
<i>f</i>	flux.
<i>B</i>	Gain d'une boucle causale.
<i>C</i>	Capacité.
<i>g</i>	Gravité.
<i>I</i>	Inductance.
<i>K</i>	Gain.
<i>P</i>	La puissance.
<i>T</i>	Constante du temps.
<i>τ</i>	Retard.
<i>MSF</i>	Matrice de Signature de Fautes

Liste des Figures

Liste des figures

Figure I.1 : Le sens de transmission de la puissance.	5
Figure I.2 : Représentation graphique de l'élément « R ».	7
Figure I.3 : Représentation graphique de l'élément « C ».	8
Figure I.4 : Représentation graphique de l'élément « I ».	9
Figure I.5 : Éléments actifs.(a): Sources d'effort et de flux. (b): Sources modulées d'effort et de flux.	10
Figure I.6 : Jonction « 0 ». (a): Système mécanique.(b): Système électrique.(c): Système hydraulique.....	11
Figure I.7 : Jonction « 1 ». (a): Système mécanique.(b): Système électrique.(c): Système hydraulique.....	12
Figure I.9 : (a): Gyrateur.(b): Gyrateur modulé.....	14
Figure I.13 : Causalités en bond graph	17
Figure I.14 : Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.....	19
Figure I.15 : Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.....	19
Figure I.16 : Chemin causal mixte indirect.....	19
Figure I.17 : Chaîne d'action	20
Figure I.18 : Boucle causal en suivant l'effort ou le flux	20
Figure I.20 : Boucle causale.....	21
 Figure II.2 : Schéma de principe d'un processus régulé.....	27
Figure II.3 : Exemple d'illustration pour la génération des RRAs	32
 Figure III.1 : Les éléments de SYMBOLS	38

Figure III.2 : Fenêtre du module (BondPad).....	39
Figure III.3 : Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS.	40
Figure III.4 : Fenêtre du simulateur.	40
Figure III.5 : Fenêtre de compilation.	41
Figure III.6 : Fenêtre des courbes.	42
Figure III.7 : Fenêtre de commande "Controls".....	42
Figure III.8 : Fenêtre du FDIPad.....	43
Figure III.9 : Utilisation de logiciel dédié FDIPad	43
Figure III.10 : Modèle bond graph.....	45
Figure III.11 : Vérification du modèle.....	45
Figure III.12 : Sauvegarde de capsule.....	46
Figure III.13 : Placement de la capsule.....	46
Figure III.14 : Résultats de la création de capsule.	47
Figure IV.1 : Le système étudié « CE105 » (Banc de régulation ».	49
Figure IV.2 : Le Contrôleur « CE120 »..	50
Figure IV.3 : Le système réel étudié.....	51
Figure IV.4 : Le modèle bond graph par logiciel Symbols shakti.	55
Figure IV.5 : Fenêtre de compilation.....	55
Figure IV.6 : Fenêtre d'expressions.....	56
Figure IV.7 : Fenêtre d'équations	56
Figure IV.8 : Réponse du modèle de Strejc pour $K=1$, $r=1$	58
Figure IV.9 : Méthode pour obtenir $T1$ et $T2$	59
Figure IV.10 : Courbe réelle approchée par un modèle de Broida.	60
Figure IV.11 : méthode de Broida..	61
Figure IV.12 : Le système étudié.....	63
Figure IV.13 : Entrée et sortie réelles du système..	64
Figure IV.14 : Entrée et sortie du système utilisée pour la validation du modèle..	64
Figure IV.15 : Fichier Simulink utilisé pour la validation du modèle..	66
Figure IV.16 : Schéma Simulink pour l'identification du système..	68
Figure IV.17 : Résultat de l'identification du système par Simulink...	69
Figure IV.18 : Résultat de la validation du système par Simulink...	70
Figure IV.19 : Réponses du système réel avec et sans défaut capteur.....	70

Figure IV.20 : Réponses du système réel devant un défaut réservoir.....	71
Figure IV.21 : le système modéliser par capsules sous Symbols... ..	72
Figure IV.22 : validation et compilation du modèle... ..	73
Figure IV.23 : v l'analyse de la monitorabilité... ..	74

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : variables utilisées dans la modélisation bon graph.....	6
Tableau I.2 : Causalité des éléments bond graph.....	17
Tableau I.3 : Gains des éléments bond graph.	22
Tableau II.1 : Matrice des signatures des fautes.	35
Tableau II.1 : Matrice des signatures des fautes « Msf » de l'exemple étudié.	35
Tableau IV.1 : Tableaux poue estimer l'ordre, la constante de temps et le retard du modèle de Strejc.....	59
Tableau IV.2 : Valeurs de l'entrée et la sortie utilisées pour l'identification du modèle.	65
Tableau IV.3 : Valeurs de l'entrée et la sortie utilisées pour la validation du modèle.	66
Tableau IV.4 : Valeurs des entrées sorties et du temps de la courbe réelle.	67
Tableau IV.5 : Matrice de signature de faute (MSF).	74

Liste des Matières

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I : Approche Bond Graph.	
I.1 Introduction	4
I.2 Représentation du langage.....	5
I.2.1 Notion de puissance et notations.....	5
I.2.2 Variables utilisées	5
I.2.2.1 Variables de puissance	5
I.2.2.2 Variables d'énergie	6
I.2.3 Éléments Bond Graph.....	7
I.2.3.1 Les éléments passifs.....	7
I.2.3.2 Les éléments actifs	9
I.2.3.3. Les éléments de jonction	10
I.3 Procédures de construction de modèles bond graph.....	14
I.4 Notion de causalité	15
I.5 Chemin causal.....	18
I.5.1 Longueur d'un chemin causal.....	20
I.5.2 Gain d'un chemin causal.....	21
I.5.3 Gain d'une boucle causale	22
I.6 Matrice de transfert.....	22
I.6.1 Règle de MASSON.....	23
I.6.2 Équations d'état d'un modèle Bond graph.....	23
I.7 Conclusion	24
Chapitre II : Diagnostic par Bond Graph.	
II.1 Introduction	25

II.2. Définitions et terminologies	26
II.3 Surveillance des systèmes par bond graph.....	29
II.3.1. L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph.....	29
II.3.2 L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph.....	30
II.4 Matrice de signature des défaillances.....	34
II.5 Conclusion.....	36

Chapitre III : Symbols Shakti.

III.1 Introduction.....	37
II.1 Caractéristiques principales du logiciel Symbols.....	37
III.3 Symbols.....	38
III.4 Modules du symbols Shakti	38
III.4.1 Le module BondPad (constructeur de modèles graphiques).....	39
III.4.2. Le module du simulateur (interface de simulation)	40
III.4.3 Le module de commande "Controls"	42
III.4.4 Le module « FDIPad »	43
III.5 Création et Incorporation des Capsules sous Symbols	44
III.5.1. Caractéristiques des capsules	44
II.6 Conclusion.....	47

Chapitre IV : Modélisation, Identification et détection de défauts du système.

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Présentation du système physique	48
IV.3 Modélisation du système	50
IV.3.1 Modélisation par les lois physiques	51
IV.3.2 Modélisation par bond graph	53
IV.3.3 Utilisation des bonds graph pour la modélisation.....	54
IV.4 Identification du système.....	56
IV.4.1 Rappel du principe de l'identification	56
IV.4.2 Rappel su quelques méthodes d'identification classiques	57
IV.4.2.1 La méthode de Strejc	57
IV.4.2.2 La méthode de Broida.....	59
IV.4.2.3 Identification du système par la méthode de Broida	60

IV.5 Détection des défauts par bond graph.....	71
IV.6 Conclusion	74
Conclusion générale.....	75
Bibliographie.....	77

Introduction Générale.

La complexité croissante des systèmes industriels automatisés et les contraintes de compétitivité en termes de coût de production, disponibilité et sécurité des installations, ont mobilisé durant ces dernières années un très grand nombre de chercheurs pour améliorer la surveillance de ces procédés. Il est en effet inutile de concevoir des installations industrielles plus complexes, si celles-ci doivent régulièrement présenter un danger pour les personnes, l'environnement et les biens voir même des pannes.

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts, connus sous l'expression anglaise « FDI » (*Fault Détection and Isolation*), qui consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de systèmes de référence décrivant le fonctionnement normal (pour la détection des défauts), ou décrivant différents genres de défauts (pour l'analyse et l'isolation des pannes), tout en réduisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. La dégradation des performances des algorithmes de surveillance est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires.

Les travaux sur le diagnostic des processus en génie des procédés ne sont pas traités d'une façon spécifiques, mais sont utilisés plus comme des applications. Les méthodes de surveillance sont délivrées en deux catégories : méthodes de surveillance avec modèle formel de l'équipement, et méthodes de surveillance sans modèle de l'équipement. Les modèles mathématiques formels des équipements industriels sont souvent entachés d'incertitudes et surtout difficiles à obtenir. Dans la deuxième méthode (sans modèle), les modèles utilisées font appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle.

La communication homme-machine est aussi un volet de la supervision [26] [27] où on tient compte des problèmes ergonomiques. Mais il est évident que même dans ce cas, la modélisation de l'opérateur humain et la mesure en ligne de sa charge mentale est nécessaire pour évaluer les moments de surcharge qui sont les moments à risque.

Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle pour la supervision et la surveillance des processus en génie de procédés en utilisant un outil unique : les bonds graphs.

L'outil Bond Graph a été initialement pour la modélisation des systèmes physiques. L'idée d'utiliser une seule représentation (Bond Graph) pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des lois de commande en exploitant la causalité est récente. Plusieurs travaux ont été développés dans ce domaine. La surveillance, avec ses aspects détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs, trouve aussi un intérêt à l'existence d'un tel modèle.

L'outil Bond Graph est un outil pluridisciplinaire qui permet par sa nature graphique, à l'aide d'un langage unifié, d'afficher explicitement la nature des échanges de puissance dans le système, tels les phénomènes de stockage, de transformation et de dissipation de l'énergie et de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'état.

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. C'est dans ce contexte que l'utilisation d'une seule représentation (le bond graph), pour la modélisation et le diagnostic a été développée. L'autre avantage de l'utilisation de l'outil bond graph est de pouvoir déduire directement du modèle graphique le nombre de variables (inconnues et connues) et le nombre de contraintes (ainsi que leur signification physique) nécessaires pour la génération des relations de redondance analytique. Enfin la structure causale et comportementale du modèle bond graph permet d'implémenter aisément la procédure de génération du modèle et des résidus.

Notre mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre de ce mémoire est illustrée la méthodologie par bond graph mono énergies pour la modélisation des systèmes. Le choix et l'analyse systématique des variables de puissance pour la modélisation. Nous allons présenter dans ce chapitre les différents algorithmes de construction des modèles bond graph, pour de différents systèmes physiques.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie par bond graph mono énergies pour la modélisation des systèmes. Le choix et l'analyse systématique des variables de puissance pour la modélisation. Nous allons présenter dans ce chapitre les différents algorithmes de construction des modèles bond graph, pour de différents systèmes physiques.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter le logiciel SYMBOLS SHAKTI, qui est un logiciel de simulation, modélisation et le contrôle de différents systèmes.

Finalement, dans le dernier chapitre, nous allons faire l'application sur le banc de régulation de niveau, ainsi que le rappelle de quelques méthodes d'identification en utilisant Matlab et Simulink. Ce chapitre est consacré à la mise en place de méthodes permettant de détecter et d'isoler les défaillances survenant au sein d'un système physiques modélisé par bond graph puis simulé par le logiciel « Symbols shakti ».

Chapitre I.

Approche Bond graph

I.1 Introduction

La méthodologie bond graph appelée aussi graphes à liens ou graphe de liaison, est un langage unifié pour tous les domaines de l'ingénierie.

Il a été inventé par H. Paynter[1], formalisé par D.Kannopp et R.Rosenberg[2] et [3]thème[4]est arrivé en Europe à la fin des années 1970 par les Pays-Bas (université de Twente) et la France (société Alsthom), utilisé dans l'industrie par différentes sociétés telles que : PSA, EDF, THOMSON,REUNAUT, AIRBUS, FORD,TOYOTA,GM, NASA et bien d'autre,etaussi dans les universités : ECL-LAGIS Lille, INSA Toulouse et Lyon (GEGELY,LAI,LGMT),universitéLyon 1 ESE Rems, université Mulhouse, ENSEEIHT-LEET Toulouse,...[5].

De nos jours, cette approche est trèsutilisée dans la conception des systèmes et l'étude physique et de commande, elle est appliquéeà tous les domaines que ce soit électrique, mécanique, hydraulique, thermique ..., etc.

La particularité des bonds graph est due au fait que cette théorie est basée sur la représentation des phénomènes de transfert d'énergie au sein du système.

La construction d'un modèle bond graph se fait sur 3 niveaux :

- ❖ Niveau technologie.
- ❖ Niveau physique.
- ❖ Niveau structurel et mathématique.

I.2 Représentation du langage

I.2.1 Notion de puissance et notations

La puissance est définie comme étant le produit de deux variables qui sont :

- La variable d'effort notée e .
- La variable de flux notée f .

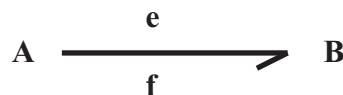
Par exemple, en mécanique de translation d'un corps de masse M , sous l'action d'une force $F(t)$, la vitesse est notée $v(t)$. Dans ce cas, l'effort est noté $e(t) = F(t)$, le flux est noté $f(t) = v(t)$.

La puissance est donnée par :

$$P(t) = f(t) \cdot e(t) \quad (\text{I.1})$$

Par convention, un lien est placé entre deux systèmes A et B échangeant de la puissance ou de l'énergie. Ce lien est matérialisé par un bond (un trait) qui se termine par une demi flèche, celle-ci montre le sens de transfert de la puissance.

Ce lien va porter les informations $e(t), f(t)$.



I.2.2 Variables utilisées

I.2.2.1 Variables de puissance

La puissance échangée « P » s'exprime par le produit de deux variables dites de puissance, l'effort « e » et le flux « f » : $P = e \cdot f$

Par convention, le flux est toujours représenté du côté de la demi-flèche :



Figure I.1 : Le sens de transmission de la puissance.

I.2.2.2 Variables d'énergie

L'énergie est calculée par intégration de la puissance par rapport au temps [6].

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

Domaines	Effort $e(t)$ [unités]	Flux $f(t)$ [unités]	Moment $p(t)$ [unités]	Déplacement $q(t)$ [unités]
Électrique	Tension	Courant	Flux magnétique	Charge électrique
	[Volt]	[Ampère]	[Weber]	[Colomb]
Mécanique de Rotation	Couple	Vitesse angulaire	Impulsion angulaire	Angle
	[N .m]	[Rad/s]	[N .s]	[Rad]
Mécanique de translation	Force	Vitesse linéaire	Impulsion	Distance
	[N]	[m/s]	[N .s]	[m]
Hydraulique	Pression	Débit volumique	Impulsion de pression	Volume
	[Pa]	[l/s]	[Pa .s]	[m ³]
Thermique	Température	Flux de chaleur	-	Énergie calorifique
	[K]	[J/s]		[J]
Thermodynamique	Température	Flux d'entropie	-	Entropie
	[k]	[J/(K.S)]		[J/K]
Chimique	Potentiel chimique	Débit molaire	-	Nombre de mole
	[J/Mole]	[Mole/S]		[Mole]
Économique	Prix unitaire des marchandises	Taux de flux des marchandises	Impulsion économique	Inventaire

Tableau I.1 : variables utilisées dans la modélisation bon graph.

I.2.3 Éléments Bond Graph

- Élément passifs : R, C, I.
- Éléments actifs : les sources Se, SF.
- Éléments de jonction : 0, 1, TF, GY.

I.2.3.1 Les éléments passifs

Ils dissipent de la puissance. La demi-flèche est normalement représentée entrante dans ces éléments. Ces éléments sont désignés par « R, C et I ».

• Élément « R »

L'élément « R » modélise tout phénomène physique liant l'effort et le flux. Citons à titre d'exemple résistance électrique, diode, restriction hydraulique, frottement, résistance thermique. La loi linéaire ou non linéaire est sous la forme suivante :

$$\Phi_R(e, f) = 0 \quad (\text{I.2})$$

La loi d'Ohm ($U = R \cdot I$) en électricité, ou de Bernoulli ($P = K_D \dot{V}^2$) en hydraulique, ou de Fourier ($\Delta T = K_C \dot{Q}$) en thermique.

Les représentations graphiques sont données par la figure (I.2) suivante :

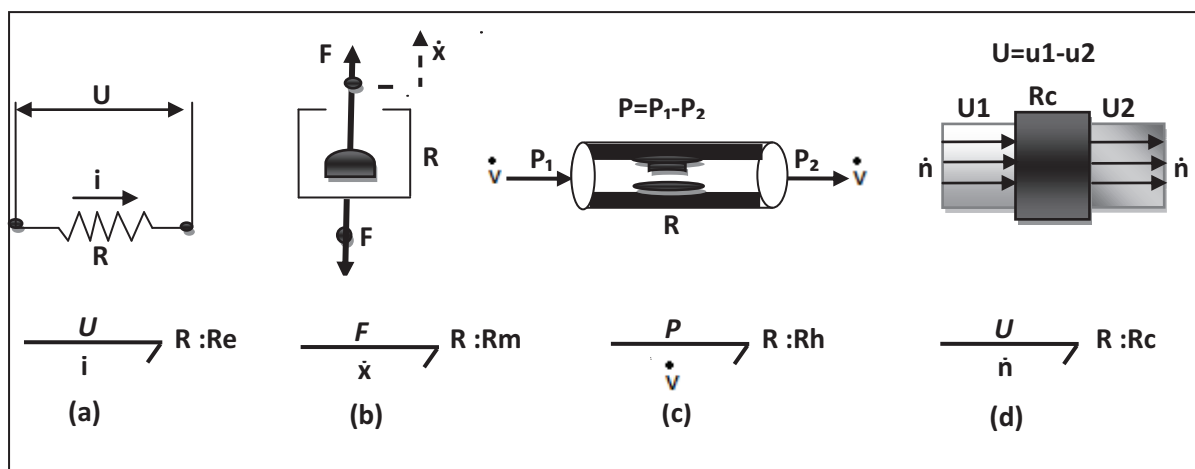


Figure I.2 : Représentation graphique de l'élément R.

- **Élément « C »**

L'élément « C » modélise tout phénomène physique liant l'effort au déplacement; exemple : ressort, condensateur, accumulateur, réservoir de stockage, phénomène de compressibilité. « C » est un élément de stockage d'énergie.

$$\Phi_C(e, q) = 0 \quad (\text{I.3})$$

$$\text{Ou} \quad \Phi_C(e, \int f(\tau) d\tau) = 0 \quad (\text{I.4})$$

La représentation générale est la suivante :



Les représentations graphiques sont données par la figure suivante :

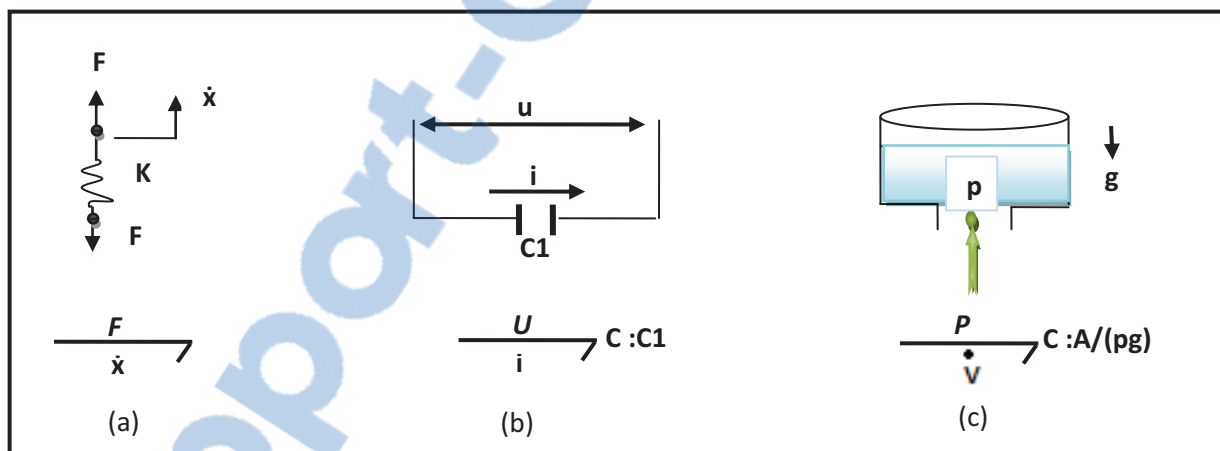


Figure I.3 : Représentation graphique de l'élément C.

- **Élément « I »**

Un élément « I » modélise tout phénomène d'inertie liant le flux à l'impulsion. I est un élément de stockage d'énergie. Exemple : masse en translation, inductance, inérence d'un liquide. La relation est de la forme:

$$\Phi_I(p, f) = 0 \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Ou} \quad \Phi_I(f, \int e(\tau) d\tau) = 0 \quad (\text{I.6})$$

La représentation générale est la suivante :

$$\begin{array}{c} e = \frac{dp}{dt} \\ \xrightarrow{\quad f \quad} I : I_i \end{array}$$

Les représentations graphiques sont données par la figure (I.4) suivante :

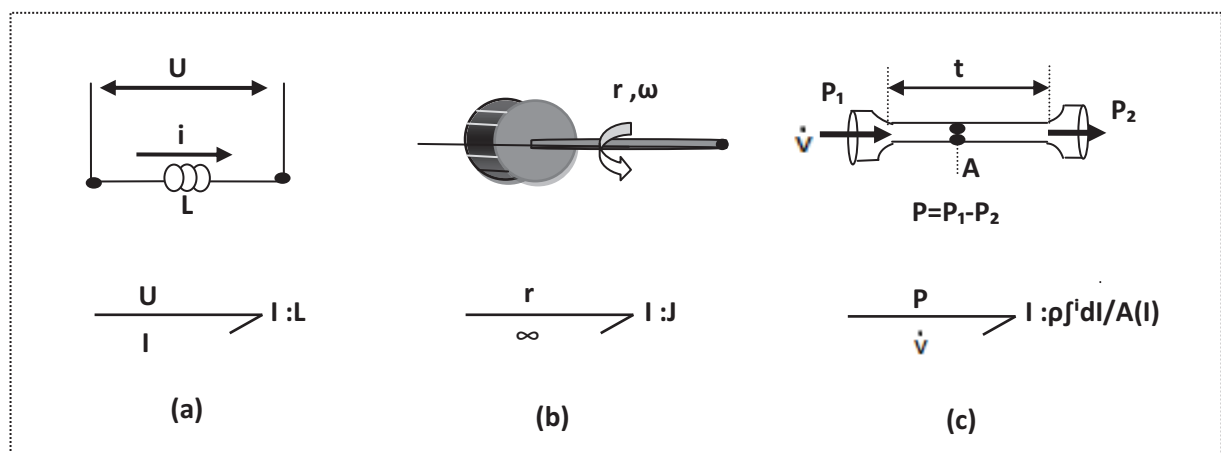


Figure I.4 : Représentation graphique de l'élément « I ».

I.2.3.2 Les éléments actifs

Les éléments actifs correspondent à une source idéale d'énergie capable d'imposer une variable d'effort (élément bond graph Se) ou une variable de flux (élément bond graph Sf).

Sur la figure(I.5) sont représentés les symboles de ces éléments. L'orientation de la demi-flèche est fixée, et est représentée sortant de la source. La variable effort ou flux fournie par la source est supposée indépendante de la variable complémentaire flux (pour Se) ou effort (pour Sf).

Si les sources appliquées sont indépendantes (gravité, tension ou courant d'alimentation, pompe...), elles seront représentées par Se ou Sf , si en revanche elles sont modulées par des variables externes (pompe commandée par exemple) on les désigne par Mse ou MSf (« M » pour modulée)[28] .

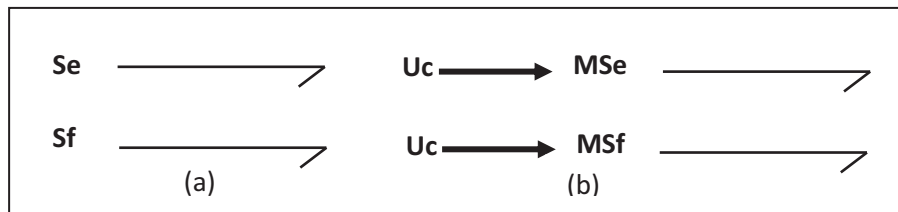


Figure I.5 : *Éléments actifs. (a): Sources d'effort et de flux. (b): Sources modulées d'effort et de flux.*

I.2.3.3. Les éléments de jonction

Quatre types de jonctions sont définis. Il s'agit des jonctions 0, 1, TF (transformateur) et GY (Gyrateur). Elles servent à coupler les éléments précédemment présentés R, C et I, et les sources.

- ***Jonction « 0 »***

Elle associe les éléments soumis au même effort, ce qui correspond à des éléments en série en mécanique (même force) et en parallèle en hydraulique et électricité (même tension, pression). La jonction et la loi constitutive sont données par la Figure (I.6).

Les relations qui caractérisent la jonction « 0 » sont :

- Égalité des efforts pour tous les liens.

$$e_1 = e_2 = e_3 = \dots = e_n \quad (\text{I.7})$$

- Somme algébrique des puissances est nulle.

$$f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n = 0 \quad (\text{I.8})$$

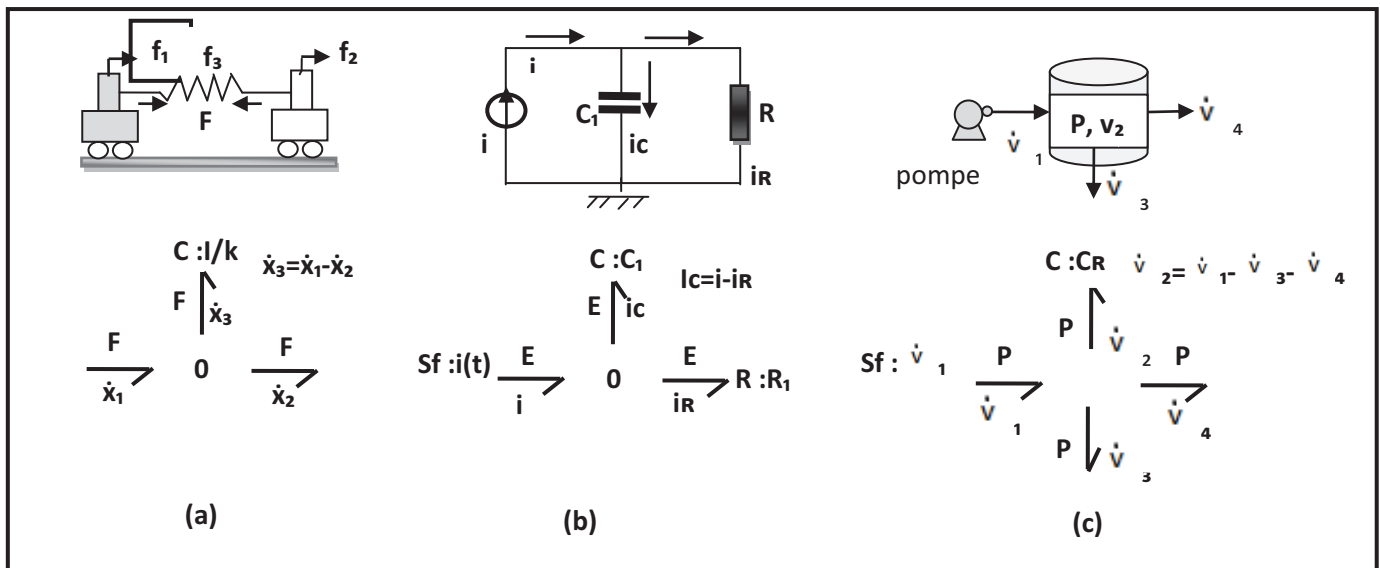


Figure I.6 : Jonction « 0 ». (a): Système mécanique. (b): Système électrique. (c): Système hydraulique

• Jonction « 1 »

Elle associe les éléments soumis à un même flux. Elle représente des éléments en parallèle en mécanique (même vitesse) et en série en électricité et en hydraulique (même courant ou même débit volumique).

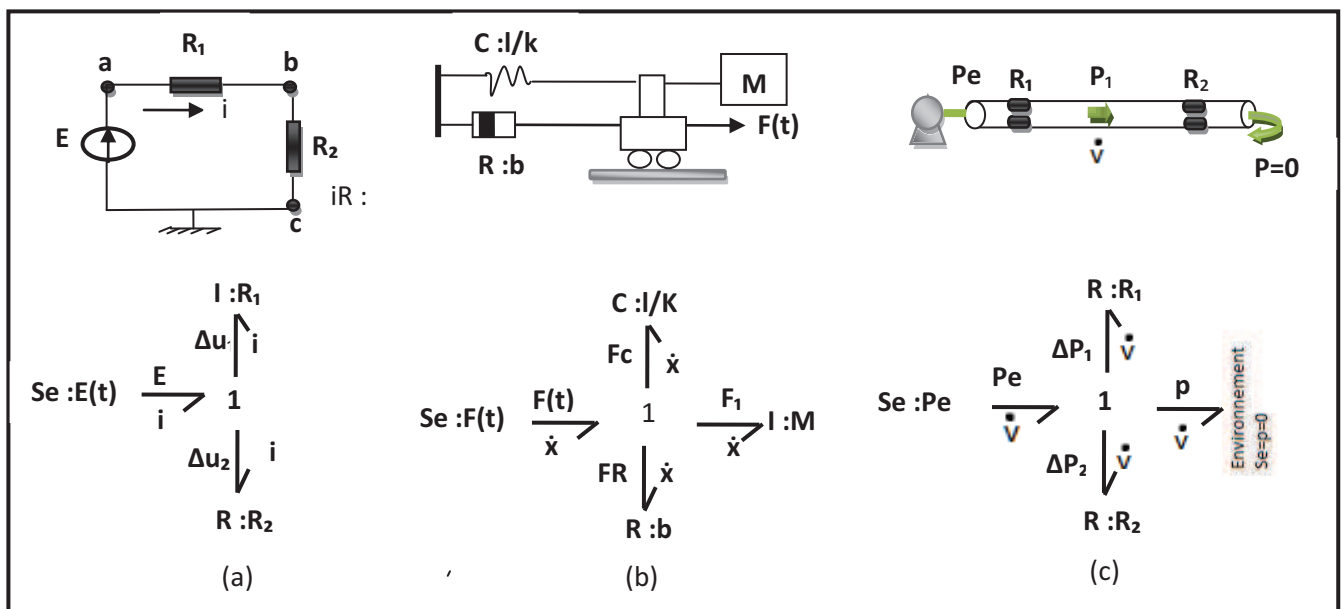


Figure I.7 : Jonction « 1 ». (a): Système mécanique. (b): Système électrique. (c): Système hydraulique.

Les relations qui caractérisent la jonction « 1 » sont :

- Égalité des efforts pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction

$$f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n \quad (\text{I.9})$$

- Somme algébrique des puissances est nulle.

$$e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = 0 \quad (\text{I.10})$$

- **Transformateur « TF »**

L'élément « TF » est un élément à deux ports qui modélise les éléments transformateurs de puissance tels qu'un transformateur électrique, un système d'engrenage ou un bras de levier (Figure (I.8)). Si le module « m » n'est pas constant, le transformateur est dit modulé et est noté par « mTF », la variable « m » peut alors être continue ou booléenne (0,1).

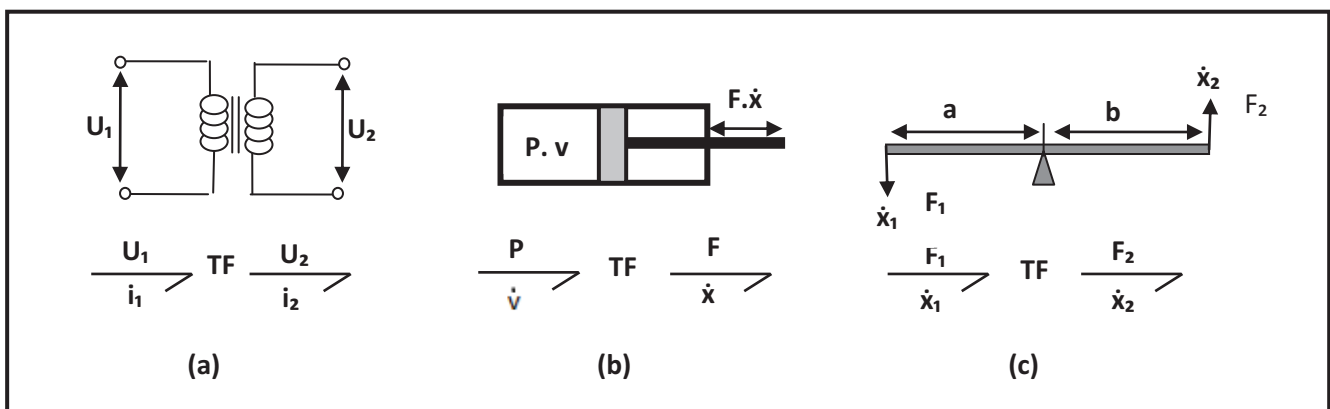


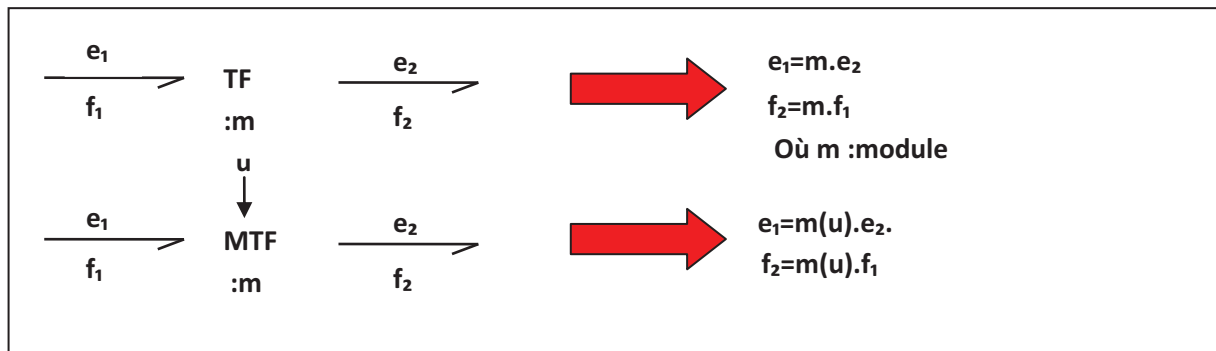
Figure I.8 : Elément TF. (a): Transformateur électrique. (b) : Piston hydraulique. (c) : Levier.

Le transformateur est un élément qui n'a que deux lien : l'un en entrée et l'autre en sortie.

Et aussi ; c'est un élément conservateur d'énergie :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2 \quad (\text{I.11})$$

Sa représentation par bond graph est :

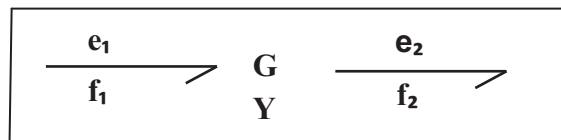


- **Gyrateur « GY »**

C'est un élément qui n'a que deux liens : l'un en entrée, l'autre en sortie, il conserve la puissance :

$$e_1 f_2 = e_2 f_1 \quad (\text{I.12})$$

Sa représentation par bond graph et comme suit :



r : est appelé le rapport du gyrateur.

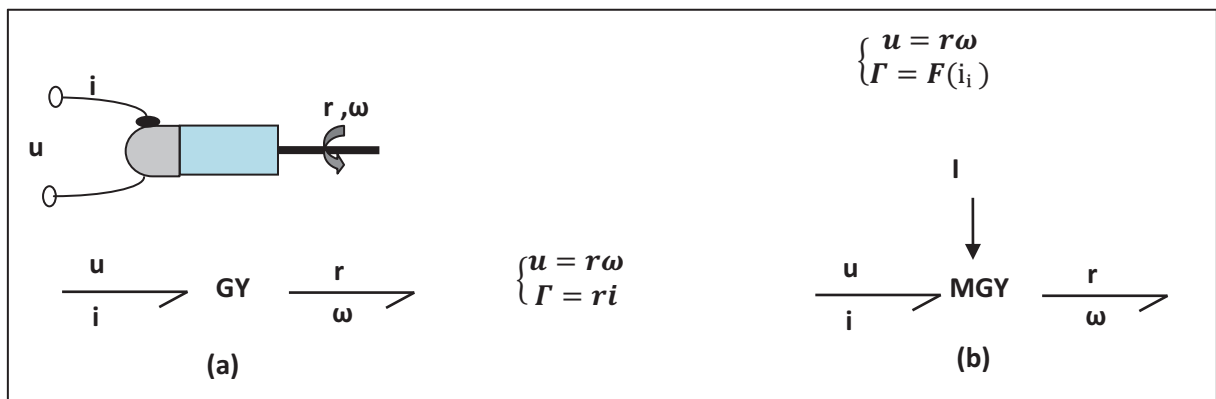


Figure I.9 : (a): Gyrateur. (b): Gyrateur modulé.

I.3 Procédures de construction de modèles bond graph

En réalité il existe pour chaque domaine un procédé pour obtenir son modèle bond graph. Nous avons essayé de les transcrire en un seul procédé général que voici :

Algorithme :

- Fixer un sens de circulation pour le flux.
- Rechercher tous les nœuds différents et placer une jonction 0 pour les domaines électriques et hydrauliques, et une jonction 1 pour le domaine mécanique.
- Placer une jonction 1 entre deux jonction 0 pour les deux systèmes électrique et hydraulique, et pour le système mécanique placer une jonction 0 entre deux jonction 1 et y attacher les éléments correspondants.
- Relier les jonctions par des liens en respectant le sens de transfert de la puissance.
- Simplifier le graph en condensant deux jonctions 1-0 en un seul.

Exemple :

Nous allons voir la construction d'un schéma bond graph pour un système hydraulique

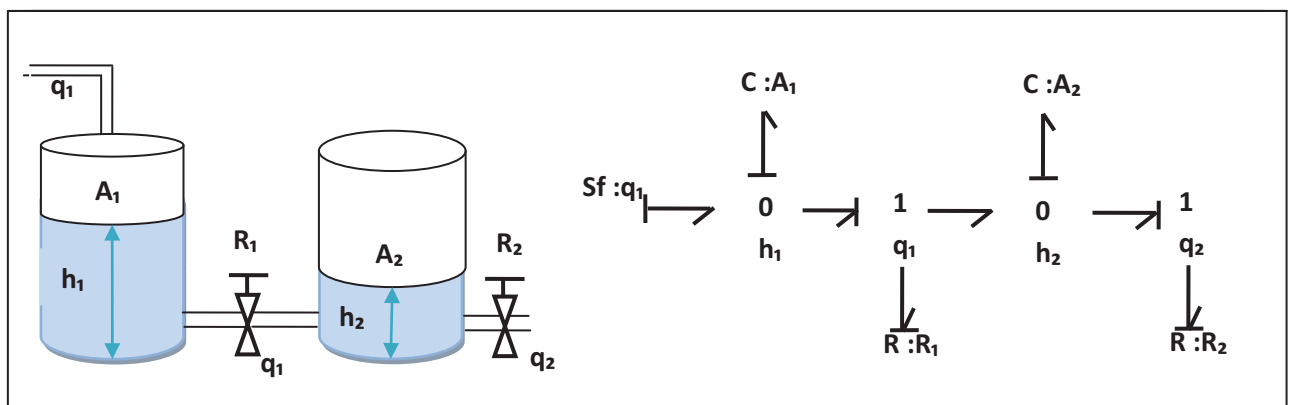


Figure I.10 : *Système hydraulique et son modèle bond graph.*

I.4 Notion de causalité

Le concept de causalité est central pour la résolution systématique des bonds graph dans une forme mathématique choisie par le concepteur.

L'affectation d'une orientation causale d'un bond donné dans un graphe signifie que, ou la variable d'effort, ou la variable de flux sur ce bond est connue. Dans l'approche graphique, la causalité est représentée par un trait causal qui par convention, indique le sens où lequel l'effort est dirigé sur le bond. Il est mis perpendiculairement au trait.

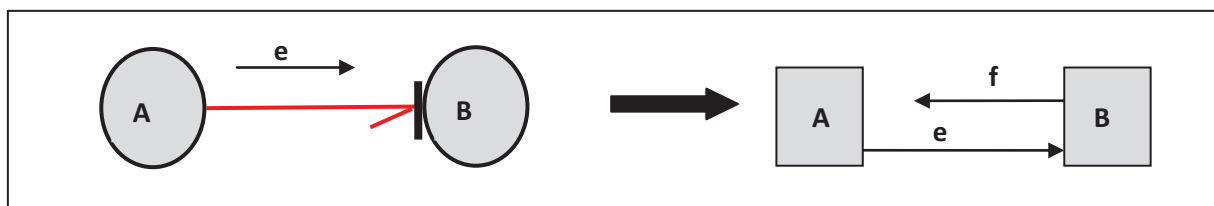


Figure I.11 : Causalités en bond graph

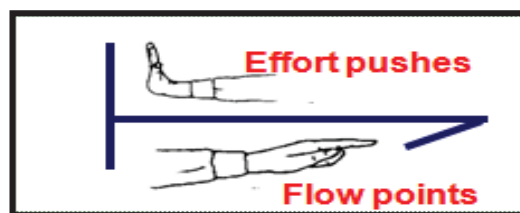


Figure I.12 : Causalités en bond graph

L'intérêt de la causalité est d'enrichir le modèle bond graph afin d'obtenir un ensemble d'équations orientées sous forme d'entrée/sortie (connues/inconnues).

Contraintes causales

La causalité exige certaines règles qui sont :

- Un Seul trait prêt de la jonction 0, qui impose cette valeur aux autres efforts. Le flux par lequel l'effort est connu, est inconnu. Il va être fonction des autres flux. A un moment donné, un seul effort est connu à la fois.
- Un seul trait causal en dehors de la jonction 1, tous les autres proches de la jonction 1.
- Un seul trait causal prêt du Transformateur.
- Deux traits causaux prêts d'un Gyrateur, ou aucuns.

Les seuls éléments qui peuvent forcer la causalité sont les sources d'énergie, et les éléments de structure.

La figure (I.13) ci-dessous montre les positions possibles du trait causal par rapport aux éléments de jonctions, des sources et des dissipateurs.

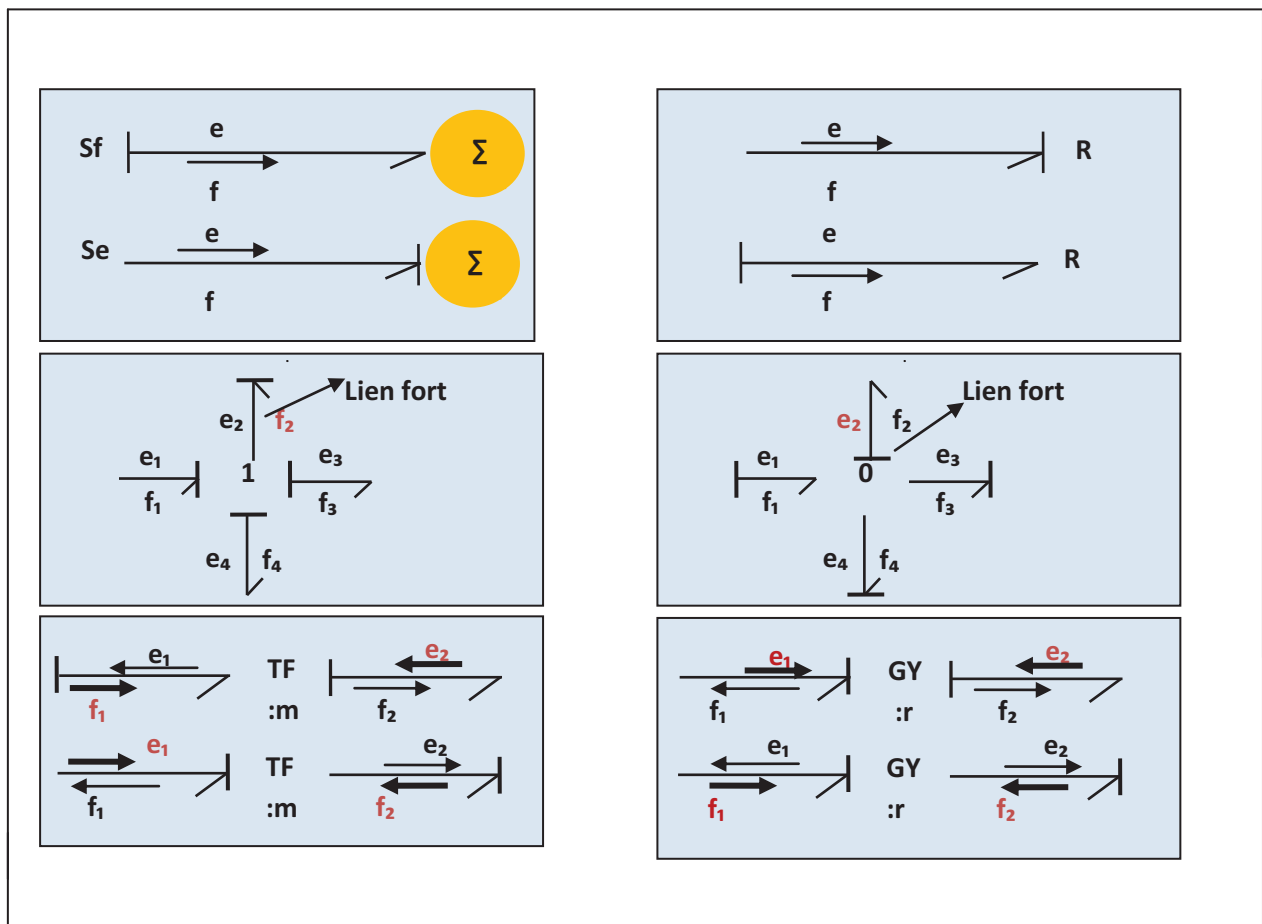


Figure I.13 : Causalités en bond graph

Règles d'affectation de la causalité

-Affecter la causalité aux sources.

-Mettre les éléments « I » et « C » en causalité intégrale et répercuter sur l'environnement. On essaiera toujours d'affecter aux éléments C et I une causalité associée à une loi de type intégrale car il est plus aisé et plus robuste d'intégrer que de dériver.

-Affecter les causalités obligatoires aux jonctions « 0,1, T F, GY ».

-Affecter les causalités aux éléments R en fonction des possibilités restantes.

-Rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifier la causalité sur l'élément « I » ou « C » origine du conflit. Quelquefois, on est contraint d'ajouter des éléments « C » ou « I » (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale [7].

Règles de causalités de différentes éléments de bond graph				
Element	Symboles	Equation causale	Bloc diagramme	Règles
Source d'effort Se	Se : e	e donné		L'effort(ou flux)imposé par la Source d'effort (ou le flux)est une donnée connue pour le système. <u>Règle</u> : la causalité est obligatoire.
Source de flux Sf	Sf : f	f donné		
Jonction 0		$\begin{cases} e_2 = e_1 \\ e_3 = e_1 \\ e_4 = e_1 \\ f_1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$		Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e ₁). <u>Règle</u> : un seul trait causal près d la jonction 0 .
Jonction 1		$\begin{cases} f_2 = f_1 \\ f_3 = f_1 \\ f_4 = f_1 \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$		Un seul flux peut donner sa valeur aux autres,(ici f ₁). <u>Règle</u> : un seul lien sans trait causal près de la jonction 1 .
TF		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \\ e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$		Un effort et un flux sont imposés au TF . <u>Règle</u> : un seul trait près de TF .

Tableau I.2 : Causalité des éléments bond graph.

I.5 Chemin causal

Le bond graph est un graph où l'on définit des boucles causales et de chemin causaux, qui sont parcourus en suivant la propagation de l'information effort /flux.

Définition 1 : Un chemin causal est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc pour une même séquence de liens et de nœuds, deux chemins en suivant soit l'effort soit le flux.

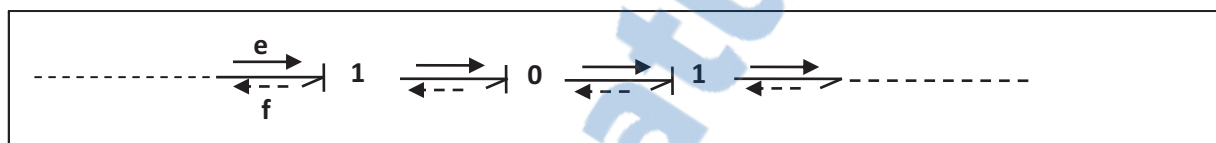


Figure I.14 : Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f

Définition 2 : Un chemin causal est mixte s'il faut changer de variable lors du parcours. C'est le cas en présence d'un GY, où le chemin est appelé mixte direct ou lorsqu'il faut traverser un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect.

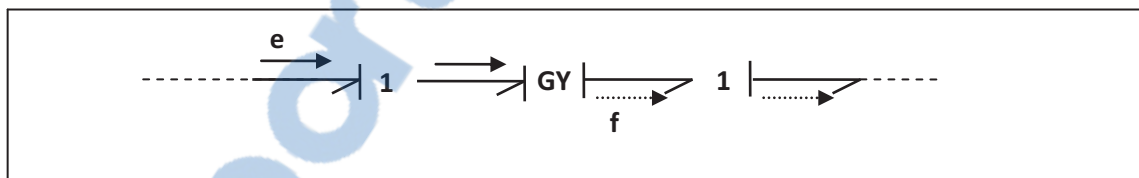


Figure I.15 : Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f

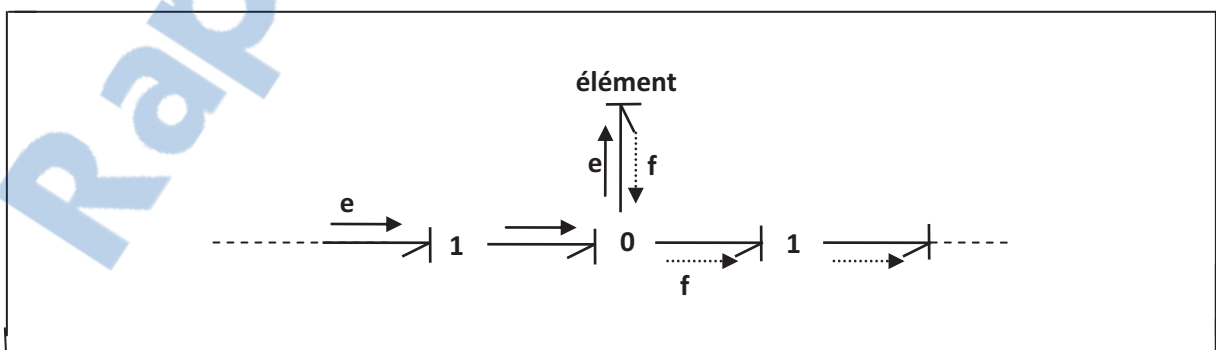


Figure I.16 : Chemin causal mixte indirect.

Définition 3 : Une chaîne d'actions est un chemin causal entre une source et une sortie (qui peut être représentée par un détecteur).

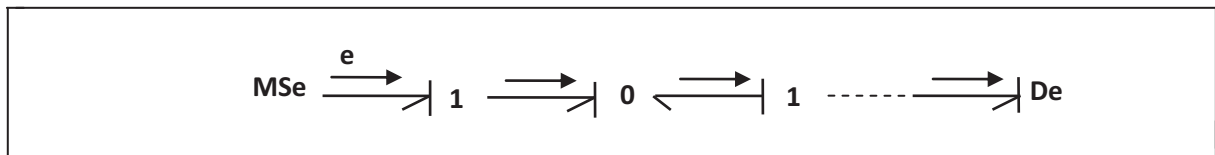


Figure I.17 : Chaîne d'action

Définition 4 : Une boucle causale est un chemin causale fermé entre deux éléments de type R, C ou I, sans lien parcouru en suivant la même variable plus une fois.

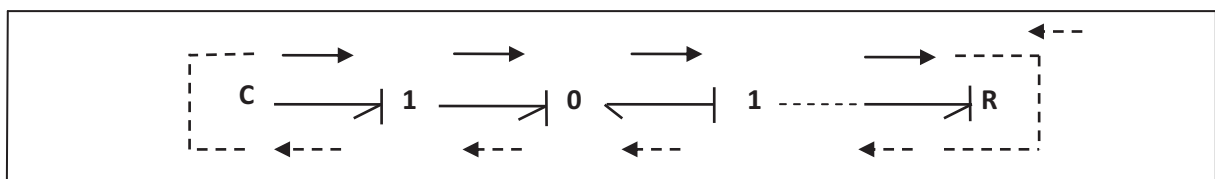


Figure I.18 : Boucle causale en suivant l'effort ou le flux

Définition 5 : Une maille est un chemin fermé parcouru en partant d'un élément et en revenant à cet élément, ayant suivi dans certains liens une seule variable.

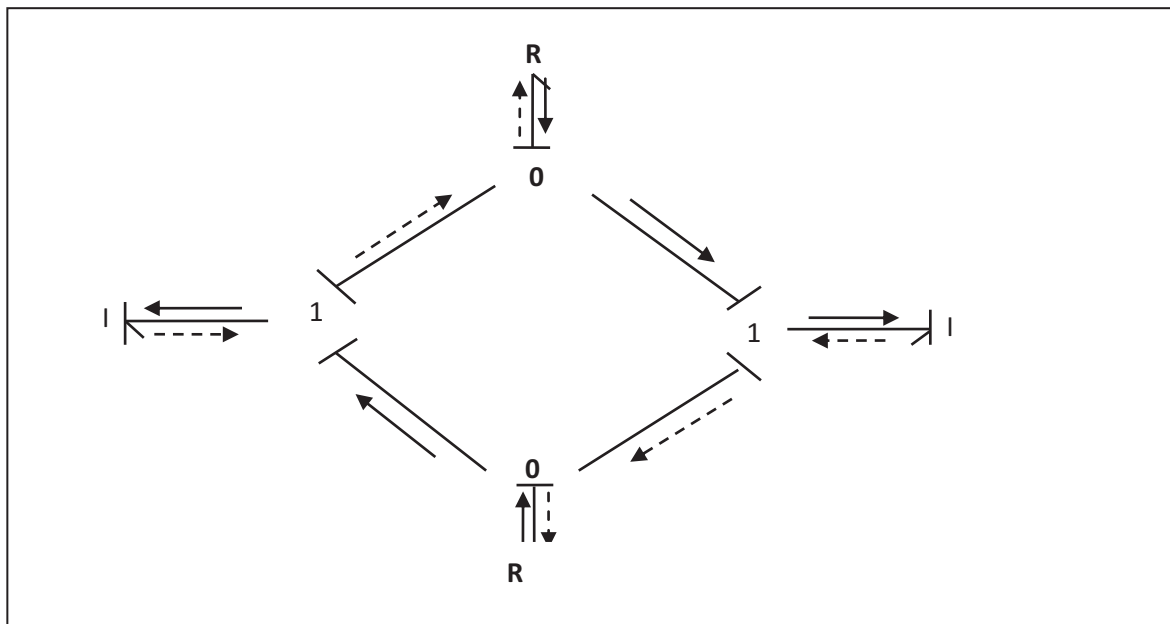


Figure I.19 : Maille.

Définition 6 : Une boucle causale est une succession de jonctions et de liens formant un chemin causal fermé.

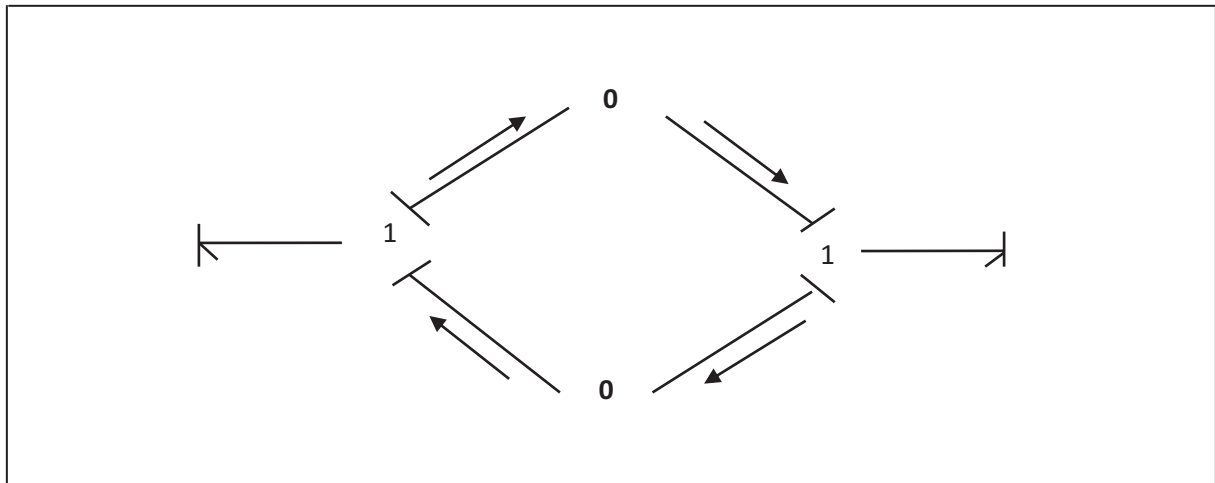


Figure I.20 : Boucle causale.

Cette structure causale pose des problèmes lors de la construction des modèles mathématiques, particulièrement quand le gain de la boucle vaut « 1 ». Le doit être évité ce qui va nous conduire à affecter des causalités dérivées a des éléments « I » ou « C ».

I.5.1 Longueur d'un chemin causal

Définition1 : Dans un bond graph ne comportant que des éléments en causalité intégrale, la longueur d'un chemin causal allant d'un élément de l'ensemble $\{Se, Sf, R, C, I\}$ vers un élément de l'ensemble $\{De, Df, R, C, I\}$ est égale au nombre d'éléments « I » et « C » traversés +1 si le point d'arrivée est un « I » ou « C ».

Définition2 : Dans un bond graph en causalité intégrale préférentielle comportant des éléments I et C en causalité intégrale et dérivée, la **longueur généralisée** d'un chemin causal est définie par :

$$lg = [\text{nombre (I et C en intégrale traversés)} - \text{nombre (I et C en dérivée traversée)} + 1 \text{ si le point d'arrivée est un I ou un C en intégrale}]$$

I.5.2 Gain d'un chemin causal

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

a. Chemin causal simple ou mixte

Le gain d'un chemin causal simple ou mixte direct se calcule par :

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \quad (\text{I.13})$$

- " m_i " et " r_j " sont les modules des éléments TF_i et GY_j parcourus
- " k_i " et " l_j " valent (+1) ou (-1) suivant la causalité du TF_i et GY_j
- " n_0 " et " n_1 " représentent le nombre total de changements d'orientation des liens respectivement aux jonctions « 0 » quand on suit la variable flux et aux jonctions « 1 » quand on, suit la variable effort.

b. Chemin causal indirect

Lorsque le chemin causal est indirect et passe par des éléments « R », « C » ou « I », le gain des éléments traversés est calculé par :

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \prod_e g_e \quad (\text{I.14})$$

Le tableau (I.3) ci-dessous regroupe les différents cas de causalités possibles pour les éléments « R, C et I » et leurs gains correspondants :

<i>Elément</i>	<i>Causalité</i>	<i>Gain</i>
<i>C</i>	<i>Intégrale</i> <i>Dérivée</i>	$\frac{1}{Cs}$ Cs
<i>I</i>	<i>Intégrale</i> <i>Dérivée</i>	$\frac{1}{Is}$ Is
<i>R</i>	<i>Inductance</i> <i>Résistance</i>	$\frac{R}{1}$ $\frac{1}{R}$

Tableau I.3 :Gains des éléments bond graph.

I.5.3 Gain d'une boucle causale

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

$$B = (-1)^{n_0+n_1} \Pi_i (m_i^2)^{k_i} \Pi_j (r_j^2)^{l_j} \Pi_e g_e \quad (\text{I.15})$$

- " n_0 " et " n_1 " sont déjà définis
- " $\Pi_e g_e$ " : le produit des gains des éléments de la boucle.

I.6 Matrice de transfert

Dans le cas où le modèle est linéaire, la règle de « MASON » appliquée au modèle bond graph permet d'obtenir directement toute fonction de transfert.

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

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_p(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} N_{11}(s) & \cdots & N_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{p1}(s) & \cdots & N_{pm}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_m(s) \end{bmatrix} \quad (\text{I.16})$$

I.6.1 Règle de MASSON

Soient u et y les variables choisies respectivement comme entrée et comme sortie. La relation entrée-sortie s'exprime, en notant « s » l'opérateur de Laplace.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_i T_i(s) D_i(s)}{D(s)} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$$D(s) = 1 - \prod_i B_i + \sum_{i,j} B_i B_j + \sum_{i,j,k} B_i B_j B_k + \dots \quad (\text{I.18})$$

I.6.2 Équations d'état d'un modèle Bond graph

Le modèle d'état issu d'un bond graph a une forme parfaitement définie, puisque les variables d'état sont fixées de manière systématique.

- **Vecteur d'état**

Les variables d'état sont les variables d'énergie associées aux éléments « I » et « C ».

$$x = \begin{bmatrix} p & 1 \\ q & c \end{bmatrix} \rightarrow \dot{x} = \begin{bmatrix} e & 1 \\ f & c \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

Méthode systématique de calcul du vecteur d'état

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

Cas linéaire :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ed \\ y = C_y x + D_u u + D_d \\ z = C_z x + R_u u + R_d d \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

Cas non linéaire :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, d) \\ y = g_y(x, u, d) \\ z = g_z(x, u, d) \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

Où « u et d » représentent les entrées de commande et de perturbation, regroupent les variables à commander et les mesures qui peuvent être différentes.

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

- Écrire les lois de structure aux jonctions en tenant compte de la causalité.
- Écrire les lois caractéristiques des éléments en tenant compte de la causalité.
- Combiner ces différentes lois pour expliciter les dérivées des variables d'état en fonction des variables d'état et des entrées.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation par l'outil bond graph, relativement récent est encore peu utilisé de manière systématique dans le monde industriel. 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 fonctionnement laissent envisager un développement important des applications industrielles.

Les bonds graphs ont initialement été inventé pour la modélisation des systèmes pluridisciplinaire, mais ça été constaté, par la suite qu'ils étaient également, un outil très puissant pour le diagnostic des systèmes, ce qui va être présenté dans le prochain chapitre.

Chapitre II.

Diagnostic par Bond graph

II.1 Introduction

Si le contrôle et la régulation industrielle sont largement maîtrisés par le monde industriel, la surveillance en ligne est peu développée. Une ambiguïté dans sa définition la réduit souvent à des tâches de suivi de paramètres (dit monitoring) ou de gestion d'alarmes par un seuillage des variables. L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts en ligne, connus sous l'expression anglaise Fault Detection & Isolation (FDI).

Des systèmes de surveillances sont mis en œuvre dont l'objectif est d'être capable, à tout instant, de fournir l'état de fonctionnement des différents équipements constitutifs d'un processus technologique. Tant au niveau de la détection et de l'isolation des fautes (FDI) qu'au niveau de la tolérance aux fautes (FTC: Fault Tolerant Control), l'opérateur de supervision gère deux types d'information. Le premier concerne la détection et l'isolation de défauts survenus sur l'installation, et le deuxième indique les possibilités de laisser fonctionner ou non le processus.

La Figure II.1 résume le principe de la « FDI » et de la « FTC ».

Au niveau de la FTC, deux approches sont à distinguer: l'approche passive et l'approche active [8]. L'approche passive est basée sur la commande robuste qui vise à définir pour les systèmes contrôlés en boucle fermée, des régulateurs insensibles aux fautes [9]. Aucune information sur les défaillances fournies par les algorithmes de « FDI » n'est utilisée, ainsi que la structure du système n'est pas modifiée.

Par contre, l'approche active, comme son nom l'indique, utilise les informations du module « FDI » en temps réel pour adapter le système à sa nouvelle situation en cas d'occurrence de défaillances [10]. Dans notre travail, on s'intéresse uniquement à la partie « FDI ». Pour plus de détail sur la « FTC », le lecteur pourra se référencer à [11].

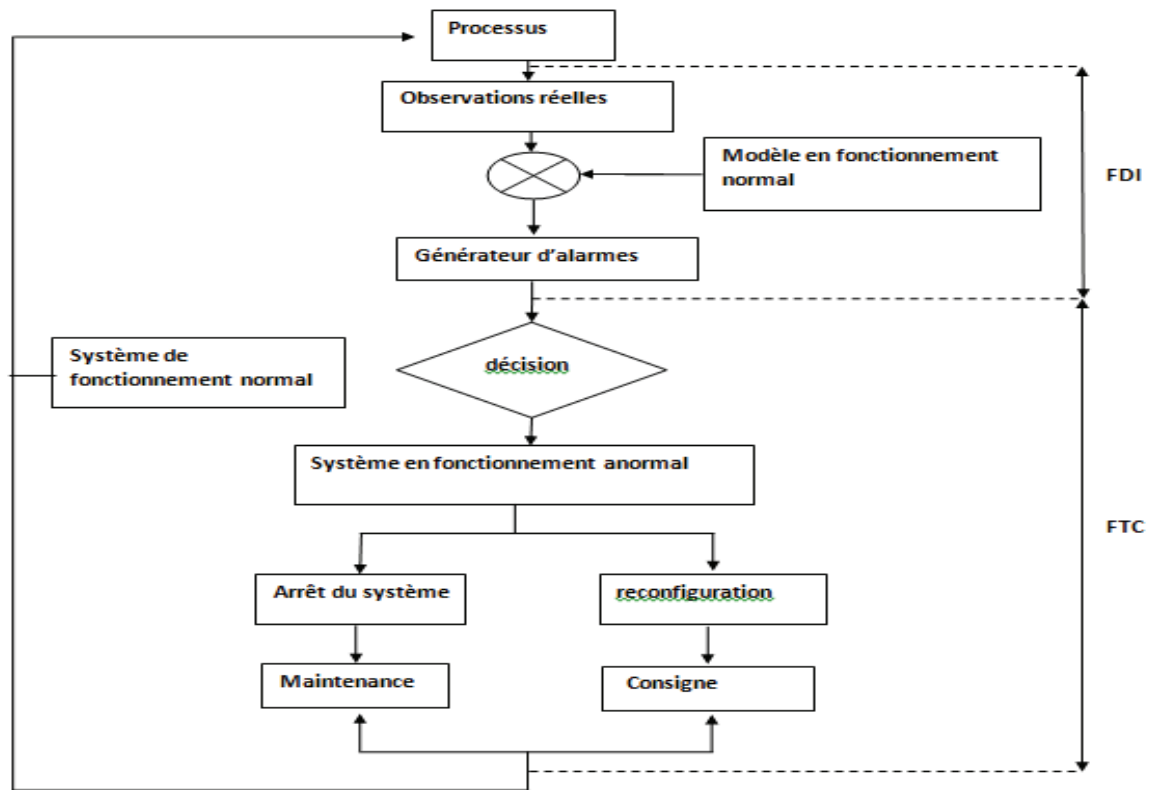


Figure II.1 : Schéma de principe de la supervision

II.2. Définitions et terminologies

- **Définition 1** : 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 (i.e générateur de vapeur, colonne de distillation, moteur électrique...). Au sens large, un processus assure la fabrication d'un produit ou fournit un service [12].

Un processus est appelé aussi système (nous utilisons indifféremment ces deux termes dans la suite), qui peut être défini comme un ensemble, susceptible d'évaluer dans le temps, composé d'éléments réagissant entre eux et avec le milieu extérieur. Un système est composé de trois ensembles de variables [13] (Figure (II.2)).

Il s'agit des variables d'état « x » (représentant la mémoire du système) et associés aux variables d'énergies stockées par le système, des variables de sortie « y » (représentant des grandeurs mesurées par les capteurs) et des variables d'entrée « u » (représentant des sources d'énergie fournies par des actionneurs commandés U_2 ou non, ou des signaux de commande délivrés par des contrôleurs U_1). Ces entrées peuvent être connues ou non (perturbations). L'évaluation de ces variables se fait suivant les lois physiques sous l'influence des perturbations ou des entrées inconnues non contrôlées.

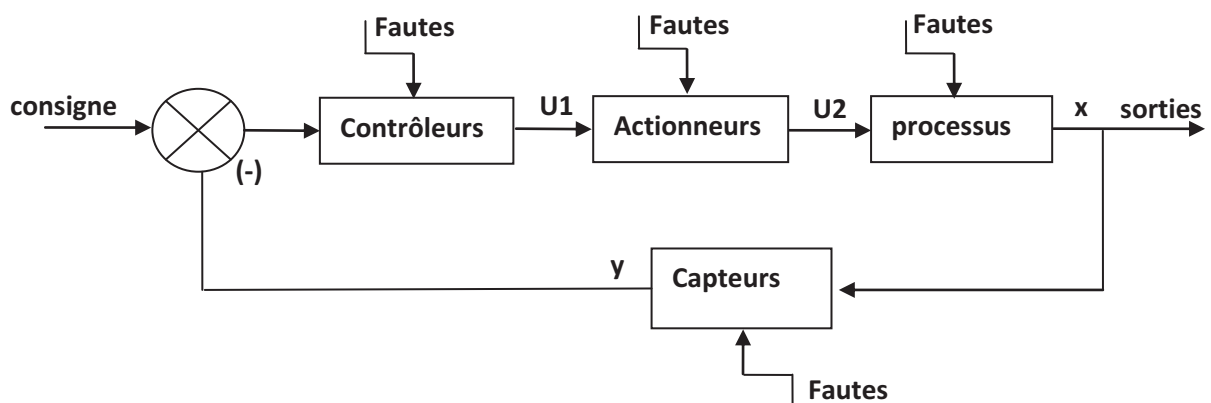


Figure II.2 : Schéma de principe d'un processus régulé.

- **Définition 2 :** Un composant industriel est un organe technologique qui forme une partie du processus industriel (réservoir, conduite, pompe ...). Ce dernier peut être affecté par des pannes (voir Figure(II.2)).
- **Définition 3 :** P.I.D (Piping and Instrumentation Diagrams) Un « P.I.D » définit un Plan des Instruments Détaillés ou un diagramme d'acheminement et d'instrumentation. 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 (selon des normes ISO).

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'informations pour les capteurs et les correcteurs.

- **Définition 4 :** Le terme faute (ou 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. Un défaut peut être invisible pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance.
- **Définition 5:** La défaillance est une modification indésirable du système se traduisant par une variation d'un ou de plusieurs paramètres par rapport à une valeur de référence. Les défaillances peuvent provenir des actionneurs, des capteurs, des contrôleurs ou du processus lui-même (pannes physiques)[14].
- **Définition 6:** Une panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser fonction requise.
- **Définition 7:** Une erreur est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et la vraie valeur spécifiée par le modèle d'un capteur jugé théoriquement correcte.
- **Définition 8:** Un dysfonctionnement est une irrégularité intermittente dans la réalisation d'une fonction désirée du système [15].
- **Définition 9:** Les contraintes sont les limitations imposées par la nature (lois physiques) ou l'opérateur.
- **Définition 10:** Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).

➤ **Définition 11 :** Le diagnostic des systèmes permet d'identifier les causes possibles de la défaillance. Il a pour objectif de fournir les informations sur l'instant et sur l'amplitude de la défaillance [15].

II.3 Surveillance des systèmes par bond graph

D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph. On distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie « formée par le processus et l'ensemble des actionneurs », alors que la seconde représente les signaux « le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation » [16].

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graph usuels « R, C, I, et les jonctions ». Les actionneurs « *source électrique, source thermique, ...* » sont modélisés par des sources « *d'effort ou/et de flux* ». Les sources peuvent être simples « *Se, Sf* » ou modulées « *MSe, MSf* », c'est-à-dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur.

Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de puissance) traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche) qui est le même utilisé dans les blocs diagrammes classiques.

On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus: l'approche quantitative et l'approche qualitative.

II.3.1. L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis. Contrairement aux représentations de connaissances conventionnelles permettant de décrire la structure du système et son état par le biais de divers outils (schéma bloc, équations différentielles, ...), les bond graphs qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions.

La surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif s'avère plus simple en comparaison avec les méthodes quantitatives car elle ne nécessite pas un modèle précis. [17].

Ces modèles qualitatifs sont construits sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) définies par l'ensemble $\{[1] [+][0] [-][-1] [?]\}$ représente la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs sont ainsi qualitatifs, ils peuvent être définis 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. [17][20].

D'autres utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance [18][20].

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.

II.3.2 L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres. Depuis 1995 on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance [16][20].

Les avantages que présente cette approche par rapport aux approches basées sur les observateurs sont : la simplicité de la compréhension des relations de redondance analytique

(RRA) 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.

➤ PROCEDURE GENERATION des « RRAs »

L'algorithme suivant permet de générer des RRAs de façon systématique à partir d'un modèle bond graph :

1. Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle BGD (en inversant la causalité des détecteurs si possible).
2. Ecrire les équations du modèle obtenues : de comportement des jonctions de mesure des sources et de commande.
3. Pour toute équation de jonction 0 et 1 contenant au moins un détecteur :
 - Eliminer les variables inconnues en parcourant les chemins causaux sur le bond graph,
 - Pour tout détecteur dont la causalité est inversée une RRA est déduite,
 - Pour tout détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature (redondance matérielle).
4. Une RRA est obtenue à partir de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.
5. refaire les étapes 3 et 4.

➤ Application

Nous allons appliquer à présent, cet algorithme sur un exemple représenté par le système hydraulique de la figure (II.3) et son modèle bond graph en causalité intégrale.

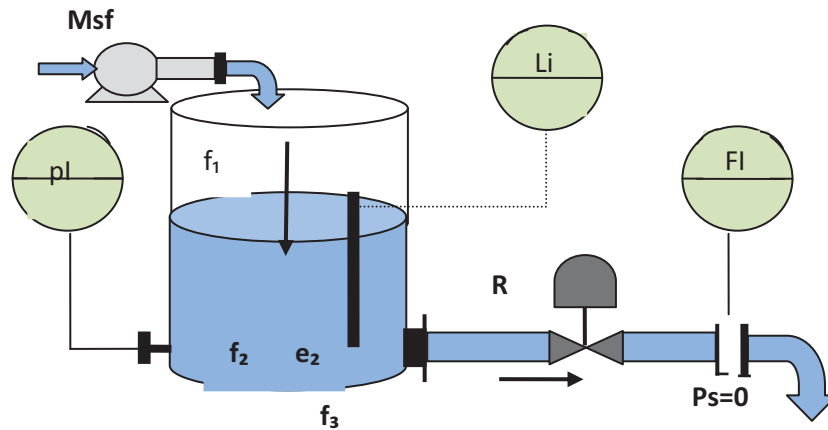
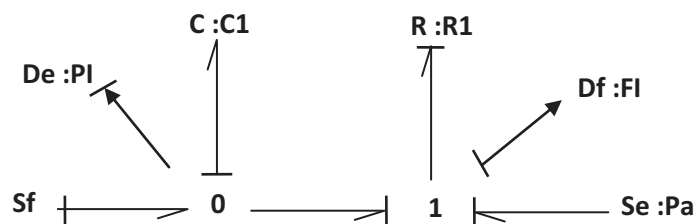
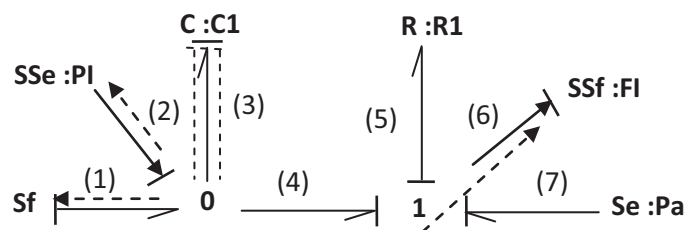


Figure II.3 : Exemple d'illustration pour la génération des RRAs.

- 1- Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle en employant la notion de la dualisation des détecteurs (De, SSe, Df, SSf).



(a) : Modèle BG en causalité intégrale



(b) : Modèle BG en causalité dérivée

2- Les RRAs sont déduites à partir des équations aux jonctions associées aux détecteurs .
dans notre cas avons les équations issues des jonctions « 0 » et « 1 » (voir figure(II.3).

Jonction « 0 » :

$$f_1 - f_3 - f_4 = 0 \quad (\text{II.1})$$

Jonction « 1 » :

$$e_6 = e_4 - e_5 - e_7 \quad (\text{II.2})$$

En parcourant les chemins causaux pour éliminer les variables inconnues présentes dans les équations de structure ci-dessus, nous obtenons par conséquent :

$$f_1 = Sf, f_3 = C_1 \frac{dPI}{dt}, f_4 = FI \quad (\text{II.3})$$

$$e_7 = -Pa, e_4 = PI, e_5 = \varphi_R(FI) \quad (\text{II.4})$$

Les résidus suivants sont déduits :

$$RRA1 = Sf - FI - C_1 \frac{dPI}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$RRA2 = -pa - \varphi_R(FI) - PI \quad (\text{II.6})$$

Proposition 1.

Dans un modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle et observable, pour chaque jonction, « 0 » ou « 1 » avec un seul détecteur, correspond une RRA.

Proposition 2.

Dans le cas où n détecteurs de même nature (effort ou flux) sont présents sur une seule jonction, « $n-1$ » RRAs directes sont obtenues en mettant simplement à égalité les valeurs fournies par chaque détecteur.

Proposition 3.

Dans un modèle bond graph totalement observable, le nombre de RRAs est égal au nombre de détecteurs. En outre, les RRAs obtenues sont structurellement indépendantes.

II.4 Matrice de signature des défaillances

La structure des RRAs forme une matrice binaire S_{ij} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique. Les éléments de la matrice sont définis comme suit:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i\text{ème RRA contient des variables du } j\text{ème composant} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La matrice « S_{ij} » est appelée matrice de signature des défaillances qui fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système. L'objectif de la procédure de localisation (isolation) est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants. Chaque composant a une signature représentée par un vecteur colonne de la matrice. Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA (résidu r correspondant). Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, i.e. différente des signatures des autres composants [19] [21].

En analysant cette matrice, on voit que la variable associée à chaque composant est présente dans au moins un résidu. En plus, la signature de chaque composant est unique (différente des autres). Donc, toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b=1$) et non isolables ($I_b=0$).


	Défaillances affectant les composants				
	COMP ₁	.....	COMP _j	.....	COMP _k
RAA ₁	S ₁₁		S _{j1}	0	S _{k1}
..	
RAA _i	S _{1i}	.....	S _{ji}	.....	S _{ki}
..
RAA _m	S _{1m}	.....	S _{jm}	.....	S _{km}

Tableau II.1 : Matrice des signatures des fautes.

En effet, la matrice des signatures des fautes de notre exemple est la suivante :

	f ₁ :sf	f ₂ :PI	f ₃ :C ₁	f ₄ :R ₁	f ₅ :FI	f ₆ :Pa
r ₁	1	1	1	0	1	0
r ₂	0	1	0	1	1	1

Db	1	1	1	1	1	1
Ib	0	0	0	0	0	0

Tableau II.2 : Matrice des signatures des fautes « MSf » de l'exemple étudié.

« Sf » et « C » ont la même signature $S(Sf)=S(C_1) = (1,0)^t$, et par conséquence une faute au niveau de la pompe et une faute paramétrique au niveau du réservoir (déformation du réservoir par exemple), ne sont pas surveillables, par contre, deux fautes paramétrique au niveau de la vanne (vanne bloquée). Et au niveau du réservoir sont surveillables ($S(R_1) \neq S(C_1)$). Toutes les défauts sont détectables mais ne sont pas isolable.

II.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons montré comment l'outil bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissances de systèmes physiques pluridisciplinaires, peut être aussi un excellent support pour la conception des systèmes de surveillance. Du point de vue industriel, un gain en coût est évident car les propriétés graphiques et causales du bond graph permettent d'analyser les conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et localiser les défauts pouvant affecter les équipements pertinents) avant conception et ensuite dans une deuxième phase à générer les algorithmes de diagnostic en ligne d'une façon générique. De plus ces procédures sont automatisées par des outils logiciels dédiés tels que les logiciels 20sim et SYMBOLS, ce dernier va être présenté dans le prochain chapitre.

Chapitre III.

Symbols Shakti

III.1 Introduction

Ce chapitre consiste en une étude analytique du logiciel de modélisation de bond graphs :

SYMBOLS, comportant ses utilisations, ses avantages et ses inconvénients.

Les progrès technologiques de pointe nécessitent de se développer du jour en jour, ainsi que leurs applications dans différents secteurs, notamment le secteur de l'industrie.

Le logiciel **SYMBOLS** (pour **S**ystem **M**odeling by **B**ondgraph **L**anguage and **S**imulation), créé par l'institut indien de la technologie; consultant High Tech, est un logiciel de simulation, de modélisation et de contrôle des systèmes divers pour une variété d'applications scientifiques et d'ingénierie.

Nous commençons par présenter et détailler l'environnement bond pad SYMBOLS. de nouvelles entités ont été introduites par SYMBOLS, les capsules, on donnera leurs avantages et les limites de leur usage. Par la suite, nous détaillerons et proposerons une amélioration de l'analyse structurelle des propriétés.

III.2 Caractéristiques principales du logiciel Symbols

Les caractéristiques principales du logiciel Symbols sont les suivantes:

- ❖ Deux niveaux d'interconnexion sont pris en compte : le niveau des équations et le niveau graphique et structurel.
- ❖ Adapte la causalité (en ajoutant ou en supprimant des capteurs, composants,...etc.).

- ❖ Détecte et localise les défaillances dans le modèle.
- ❖ Facilite le regroupement des sous modèles pour construire de nouvelles classes de composants.

III.3 Symbols

Lors du changement du logiciel symboles, ce dernier offre la possibilité à l'utilisateur d'ouvrir un grand nombre d'environnements indépendants

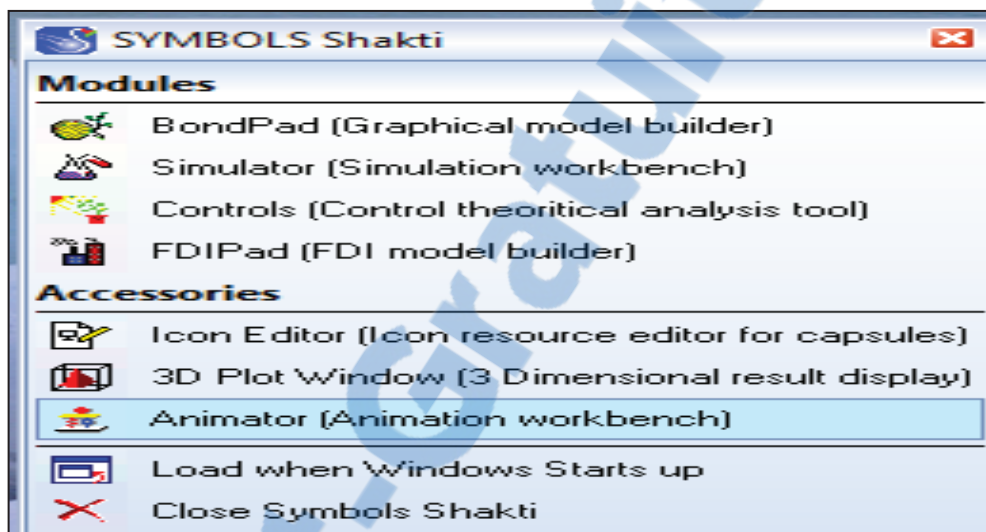


Figure III.1 : Les éléments de SYMBOLS

L'utilisateur doit sélectionner l'un d'entre eux selon ce qu'il désire, par un simple clique sur le nom de la procédure correspondante. Chacune de ces procédures procède un environnement spécifique à elle et indépendant de celui des autres procédures.

III.4 Modules du symbols Shakti

Symbols contient plusieurs algorithmes d'intégration avancés, il garantit une simulation rapide et donne des résultats satisfaisants. La construction de tous les modèles dans un chemin graphique est réalisée d'une manière très facile par l'utilisation du module " Bond Pad ", les sous modèles sont combinés dans un modèle global. Symbols shakti contient des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe.

Symbols est composé des modules suivants :

III.4.1 Le module BondPad (constructeur de modèles graphiques)

C'est le premier module que va rencontrer un utilisateur pour modéliser un système. Quand on ouvre BondPad, la fenêtre principale apparaît comme le montre Figure(III.2). La zone d'objet contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph et contient aussi une bibliothèque de capsules. Les capsules et les outils disponibles dans la zone d'objet permettent de concevoir un modèle bond graph dans la zone de dessin. La zone des expressions permet d'afficher les équations correspondantes au modèle bond graph.

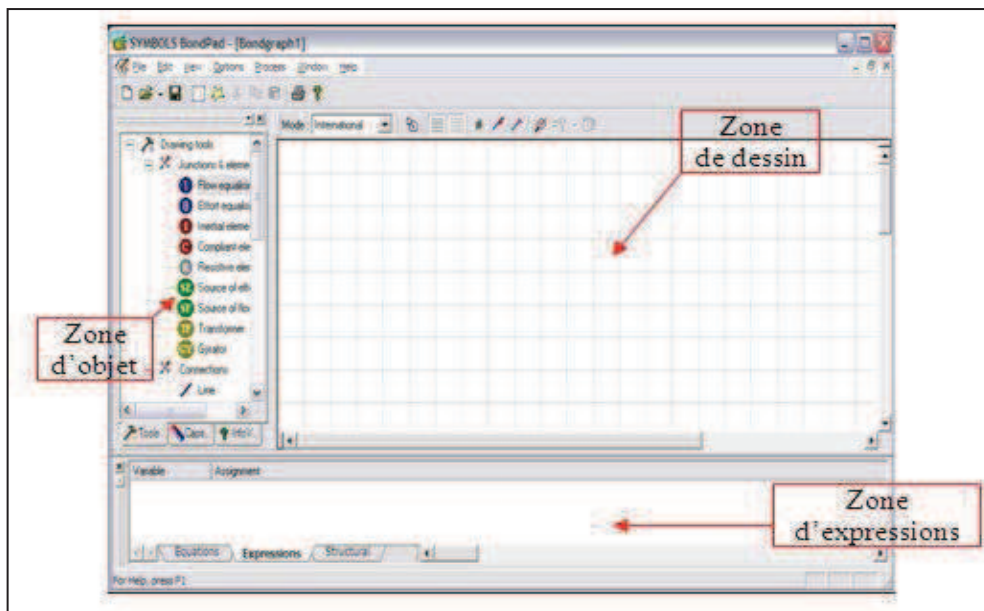


Figure III.2 : Fenêtre du module (BondPad).

L'interface graphique de SYMBOLS contient cinq fenêtres (Tools, Capsules, Equations, Expressions, Structural), elles sont décrites dans la Figure III.3.

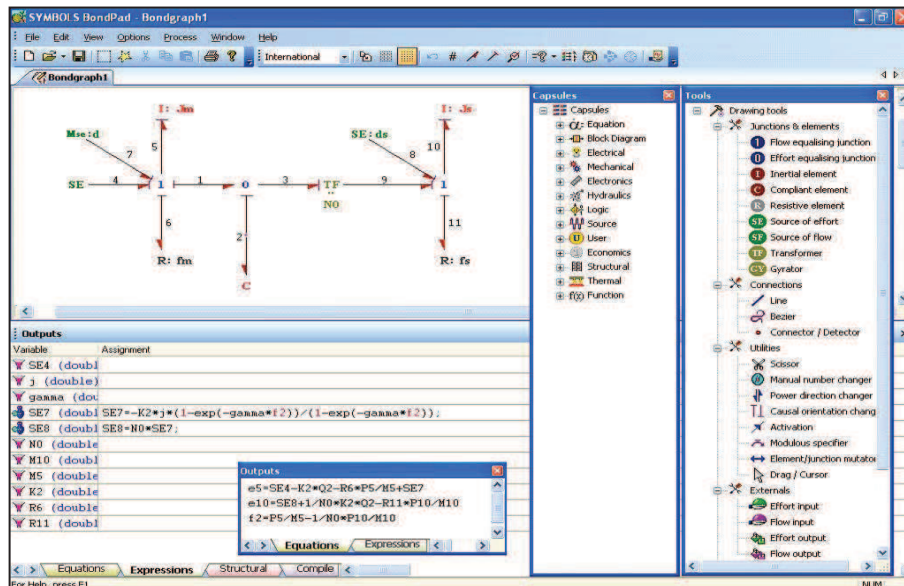


Figure III.3 : Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS.

III.4.2. Le module du simulateur (interface de simulation)

Le module du simulateur permet de résoudre les équations dynamiques. C'est le module dans lequel les utilisateurs peuvent intervenir pour la simulation. La fenêtre du simulateur est montrée par :

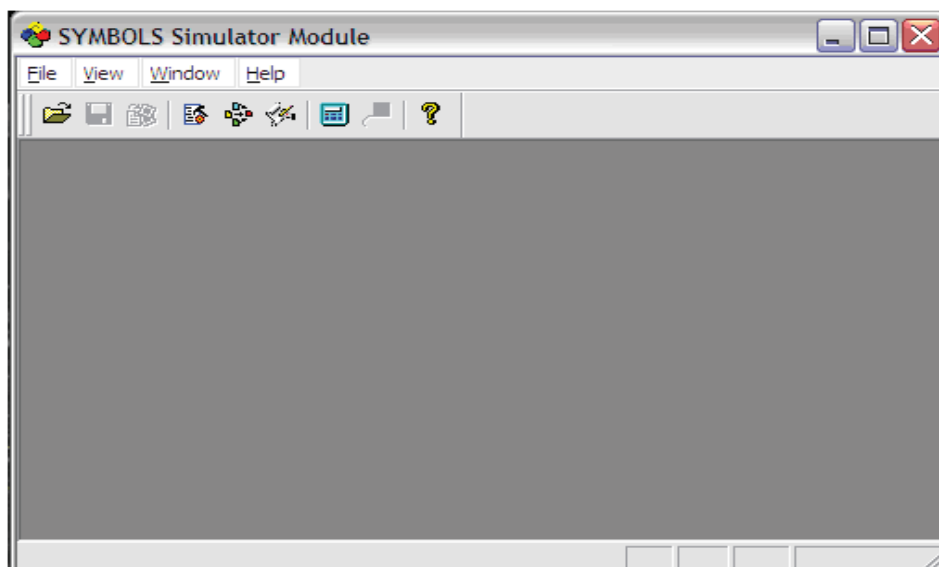


Figure III.4 : Fenêtre du simulateur.

Le point d'entrée du simulateur est le fichier de définition de module (*fichier.sym*) généré à partir du module (*Bond Pad*). Ce fichier doit être compilé pour créer un fichier d'expérimentation du simulateur. Une fois la compilation démarrée, l'état de compilation, les messages d'erreurs et d'avertissement sont affichés par la fenêtre de compilation comme le montre la Figure III.5.

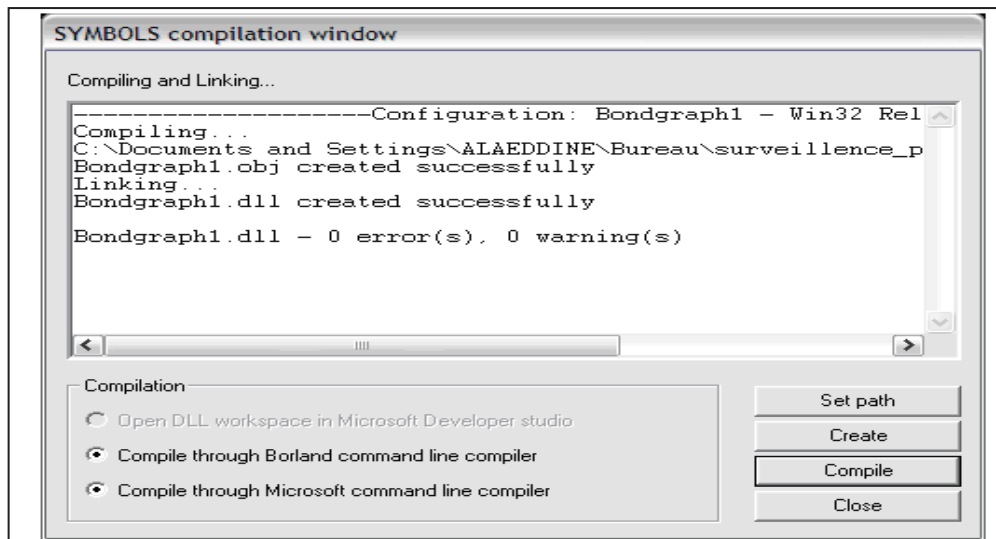


Figure III.5 : Fenêtre de compilation.

Après la compilation, il faut passer par trois étapes pour tracer les courbes de simulation :

- ❖ Affecter les valeurs des composants.
- ❖ Affecter les valeurs initiales et les valeurs finales des courbes de simulation.
- ❖ Appuyer sur la commande " *START* " pour faire la simulation. Les courbes tracées sont montrées dans la Figure III.6.

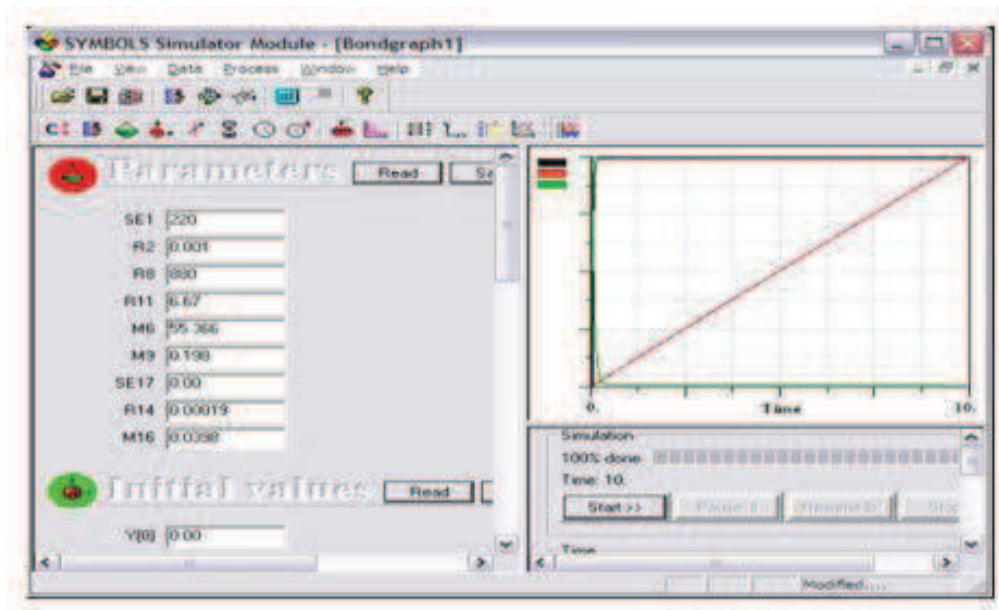


Figure III.6 : Fenêtre des courbes.

III.4.3 Le module de commande "Controls"

Notons que *SYMBOLS* contient aussi un module de commande "Controls" (outil d'analyse théorique de commande) qui nous permet d'effectuer l'analyse des systèmes linéaires continus ou discrets. Dans ce module le système étudié doit être décrit par sa fonction de transfert ou par son modèle d'état.

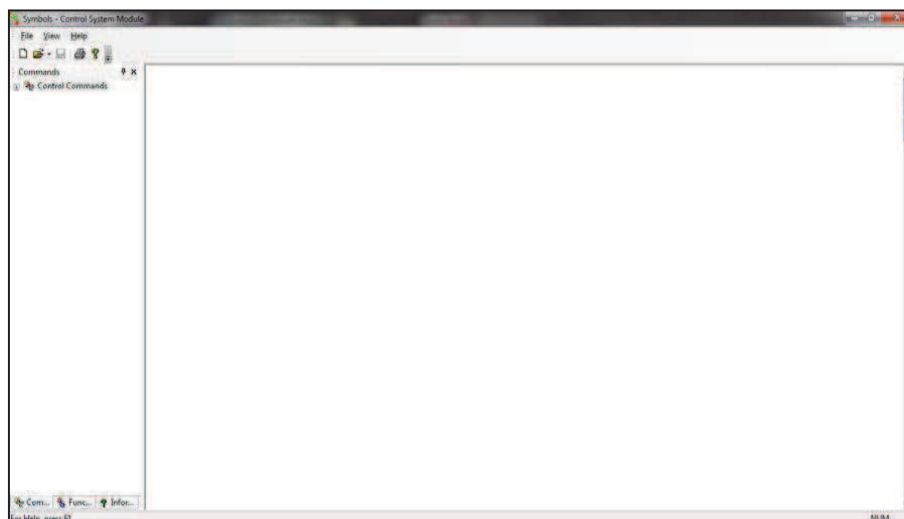


Figure III.7 : Fenêtre de commande "Controls".

III.4.4 Le module « FDIPad »

Le dernier module "FDIPad" (constructeur de modèles graphiques pour le FDI). Cette boîte à outils concerne les RRAs déterministes.

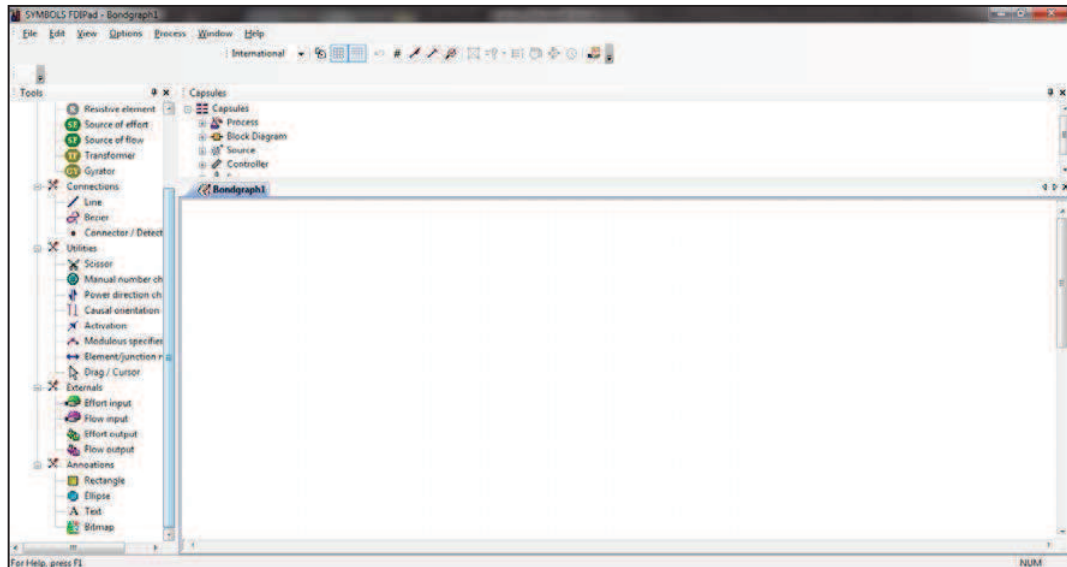


Figure III.8 : Fenêtre du FDIPad.

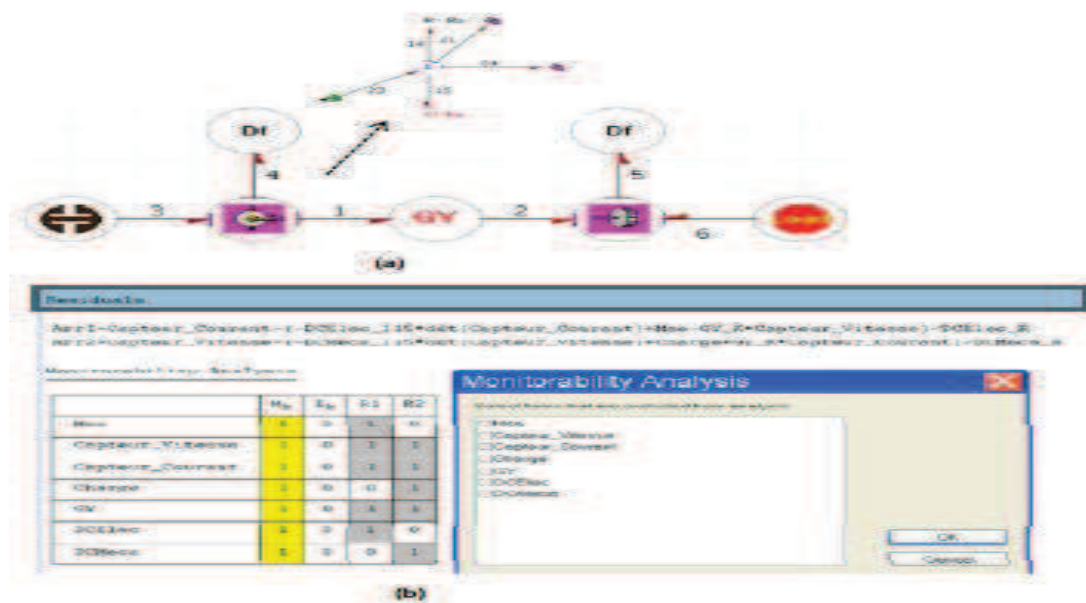


Figure III.9 : Utilisation de logiciel dédié FDIPad

Il est a noté que fdi pad ne fonctionne qu'en présence des capsules.

III.5 Création et Incorporation des Capsules sous Symbols

L'outil bond graph permet la décomposition d'un système complexe en système beaucoup plus simple qui vont être appliqués bond graph à mot. Dans ce but, les éléments constitutifs simplifiés en génie des procédés ont été introduits sous forme de capsules dans le logiciel Symbols.

Les capsules sont des sous système d'un modèle beaucoup plus simple pour l'interprétation et pour la lisibilité du modèle.

III.5.1. Caractéristiques des capsules

SYMBOLS permet la création de capsules avec les caractéristiques suivantes :

- ❖ Une capsule peut être incorporée dans un modèle avec un nombre quelconque d'occurrences.
- ❖ Une capsule peut en contenir d'autres.
- ❖ Une capsule doit être complète, c'est à dire les paramètres de ses équations constitutives non linéaires doivent être décrits soit directement par des expressions ou par des appels de fonction de la bibliothèque.
- ❖ La numérotation des capsules est faite selon la direction du transfert d'énergie.
- ❖ La modélisation acausale est effectuée par le biais de capsules génériques. Ces capsules représentent les différents choix de causalités possibles. Lors de l'implantation dans le modèle, la capsule adéquate est insérée.

Nous présentons dans ce qui suit les démarches à suivre pour créer une capsule sous symbols, et nous prenons à titre d'exemple un simple modèle de suspension :

- 1- Réaliser le modèle bond graph de notre exemple sous BondPad comme le montre la Figure (III.10) :

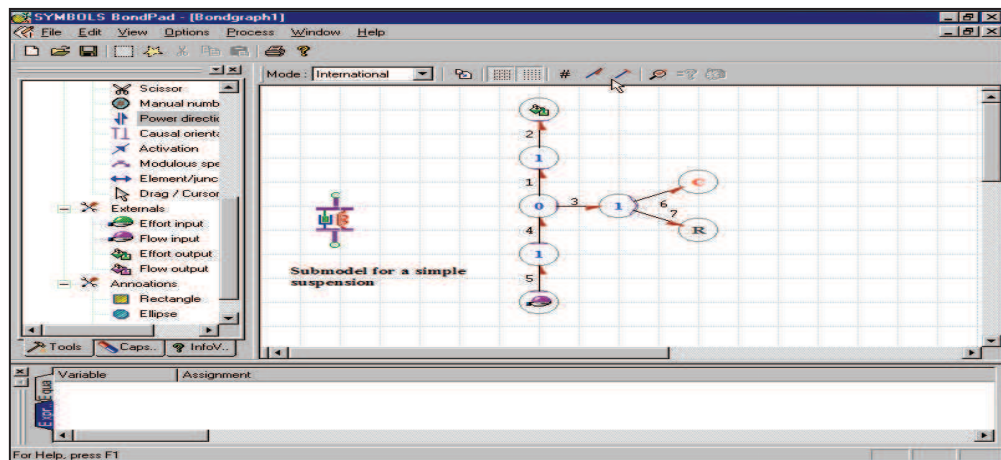


Figure III.10 : Modèle bond graph.

- 2- Compiler le modèle et vérifier qu'il n'y a pas d'erreurs

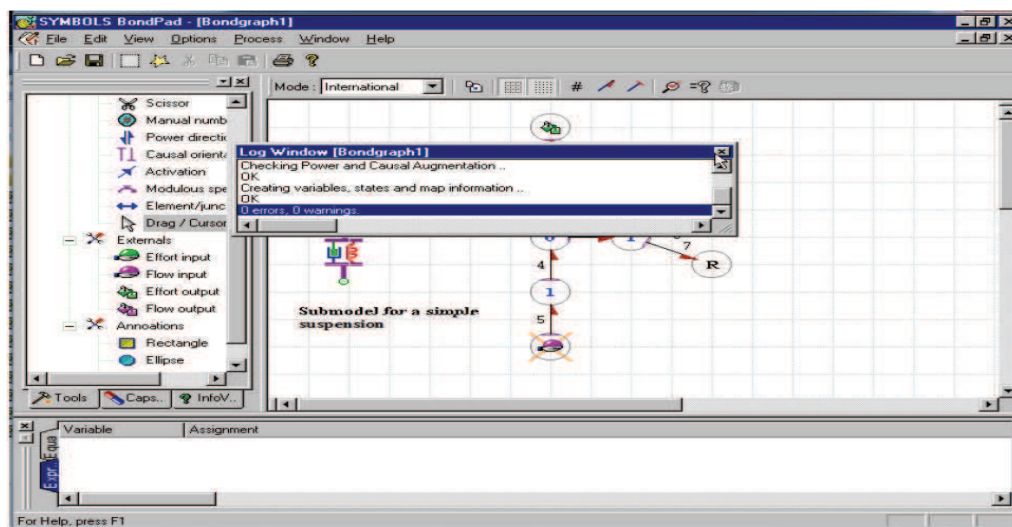


Figure III.11 : Vérification du modèle.

- 3- Enregistrer le modèle sous le type 'Capsule file' dans le dossier relatif aux capsules.

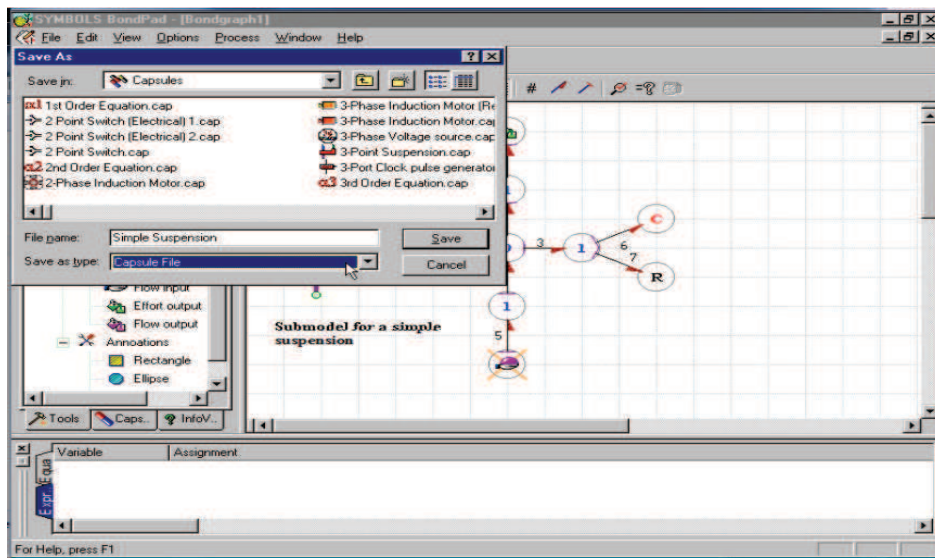


Figure III.12 : Sauvegarde de capsule.

- 4- Sélectionner le groupe où la capsule doit être enregistrée, puis sauvegarder.

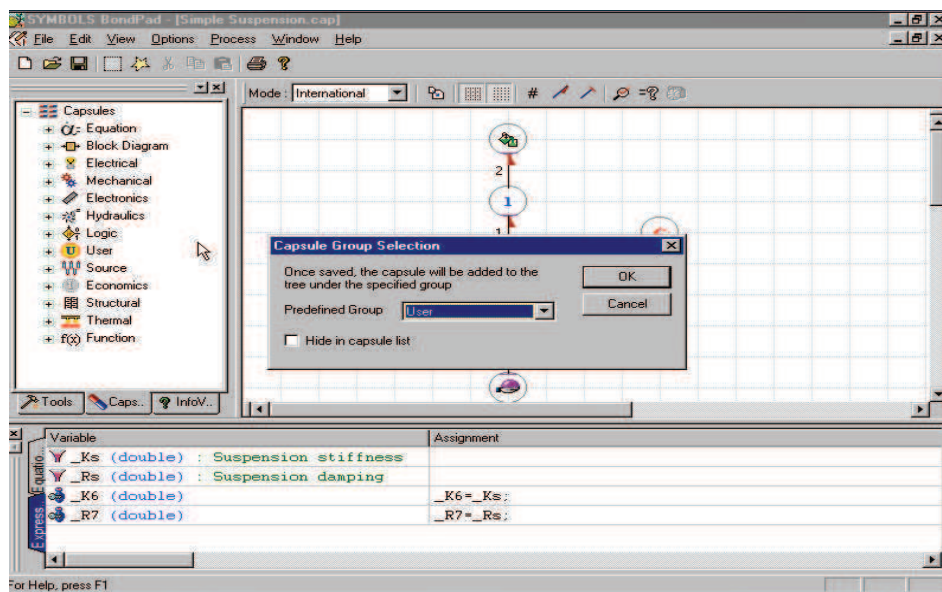


Figure III.13 : Placement de la capsule.

La capsule créée sera placée dans le groupe des capsules choisi comme le montre la figure III.14.

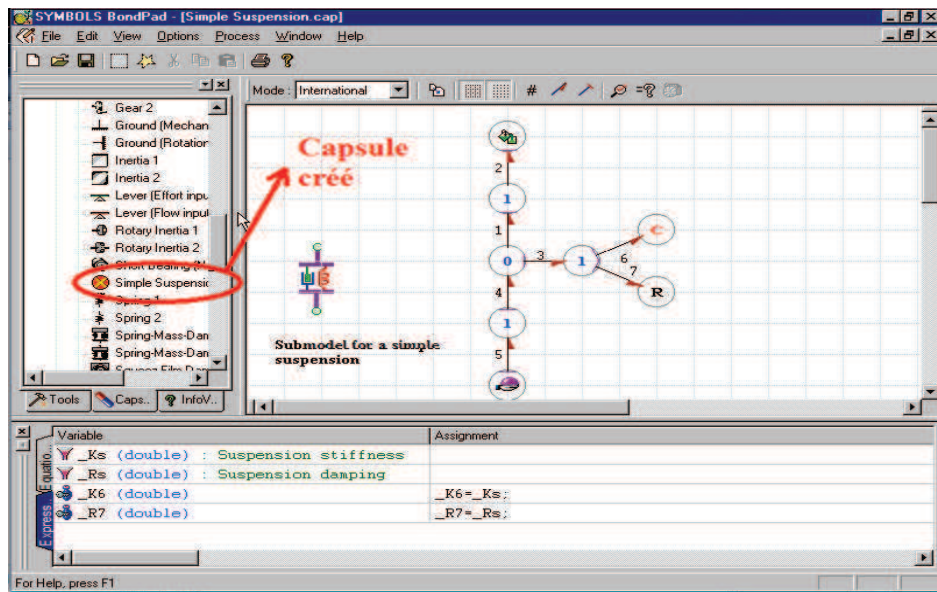


Figure III.14 : Résultat de la création de capsule.

La génération des capsules est nécessaire pour la compilation, si on veut générer les relations de redondance analytiques et aussi les matrices de signatures des fautes. Les capsules sont indispensables pour l'analyse de la diagnosticabilité dans le système.

III.6 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons donné une présentation du logiciel Symbols, qui est un logiciel de modélisation, d'analyse, de contrôle de différents systèmes et de simulation, mais qui répond partiellement aux besoins des exigences technologiques.

Nous avons détaillé l'utilité pour les capsules parce qu'elles sont nécessaires pour la diagnosticabilité des systèmes ce qui va être dans le chapitre suivant.

Chapitre IV.

Modélisation, Identification et détection de défauts du système

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la partie pratique de notre travail, qui est complémentaire à la théorie donnée dans les chapitres précédents. La première partie est consacrée à la présentation du système réel « Banc de régulation de niveau dans un réservoir ». Ensuite, nous faisons la modélisation du système en utilisant les lois physiques et bond graph. Dans une troisième partie, nous identifions le modèle du système par quelques méthodes classique et enfin, nous tentons d'appliquer la théorie Bond Graph pour la détection de défauts dans le système.

IV.2 Présentation du système physique (Banc de régulation de niveau)

Le système étudié est un banc de régulation de niveau dans un réservoir « CE 105 » qui se trouve au niveau du laboratoire de travaux pratiques en Automatique de la faculté de Technologie à Tlemcen. Cette manipulation didactique permet l'étude théorique et pratique des principes et des techniques de contrôle automatique (identification, modélisation, régulation, asservissement, PID,...).

Le système complet CE105 + CE120 permet de réaliser des boucles de régulation analogique et numérique, en utilisant le logiciel installé sur PC. Nous présentons sur la figure IV.1 (la photo du dispositif).



Figure IV.1 : *Le système étudié « CE105 » (Banc de régulation ».*

Le système comprend :

- Deux réservoirs reliés par un canal d'écoulement à fermer ou à ouvrir par une vanne manuelle A. Ceci permet de modifier les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs.
- Deux autres vannes sous chaque réservoir pour vider.



Figure IV.2 : *Le Contrôleur « CE120 ».*

Le contrôleur CE120, illustré par la figure IV.2 est utilisé pour commander le système. IL contient principalement les éléments suivant :

- Un générateur de signaux (carré, sinusoïdal, dents de scie).
- Un voltmètre numérique.
- Des alimentations à courant continu (+10,-10V).
- Des potentiomètres.
- Des sommateurs ou comparateurs.
- Des correcteurs P, PID, avance de phase.
- Des convertisseurs A/N et N/A.

IV.3 Modélisation du système

Afin de pouvoir Contrôler et superviser le système, on doit tout d'abord obtenir son modèle mathématique. Ce dernier peut être calculé à partir des lois physiques ou en utilisant les bon graphs. Le schéma du système est donné par la figure IV.3.



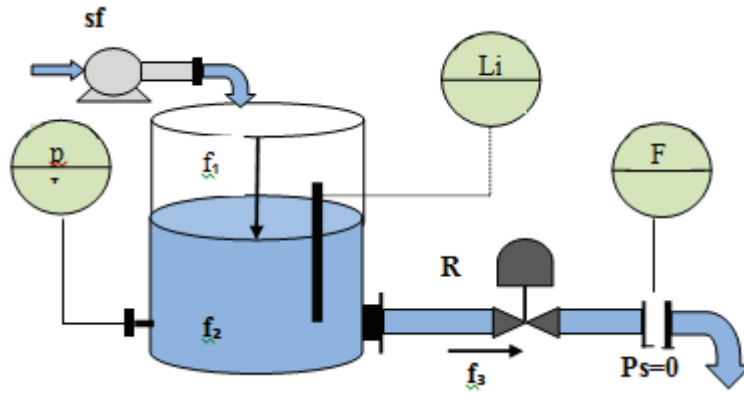


Figure IV.3 : Le système réel étudié.

IV.3.1 Modélisation par les lois physiques

Dans cette section, nous présentons la modélisation du système par les lois physiques.

D'après la figure IV.3, on a :

V = le taux de variation du volume.

$$Q_e - Q_s = \frac{dV}{dt} = A \frac{dH}{dt} \quad (\text{IV.1})$$

A : la section du fluide dans le réservoir (i.e. $V=A.H$).

Q_e = le débit d'entrée du réservoir.

Q_s = le débit de sortie du réservoir.

En général, le terme Q_s dans l'équation (IV.1) est une fonction non linéaire du niveau H .

$$Q_s = f(H) \quad (\text{IV.2})$$

Par exemple, nous pouvons choisir :

$$Q_s = C_{bd} \cdot ab \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (\text{IV.3})$$

En combinant les équations (IV.1) et (IV.2) on trouve :

$$A \frac{dH}{dt} + f(H) = Q_s \quad (\text{IV.4})$$

Cette équation est un modèle mathématique qui décrit la relation entre l'entrée et la sortie du système.

Pour obtenir la fonction de transfert entrée/sortie, nous devons d'abord linéariser l'équation (IV.4) autour d'un point d'équilibre, où les grandeurs d'entrée, de sortie et de commande subissent de petites variations, comme suit :

$$H = H' + h \quad (\text{IV.5})$$

$$Q_s = Q'_s + q_s \quad (\text{IV.6})$$

$$Q_e = Q'_e + q_e \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

H' , Q'_e et Q'_s sont respectivement le niveau, le débit d'entrée et le débit de sortie à l'équilibre.

h , q_e et q_s sont respectivement les petites variations de H , Q_s et Q_e autour de l'équilibre.

Calculons d'abord les équilibres, en posant la dérivée de l'équation (IV.4) égale à zéro, d'où :

$$f(H') = Q'_s = Q'_e \quad (\text{IV.8})$$

Utilisons maintenant le développement à l'ordre 1 de la fonction non linéaire $f(H)$ dans l'équation (IV.4).

$$f(H) = f(H') + h \frac{\delta f(H')}{\delta H} \quad (\text{IV.9})$$

Substituons les équations (IV.9) et (IV.10) dans l'équation (IV.4), ce qui donne :

$$A \cdot \frac{d(H' + h)}{dt} + Q_{s'} + h \frac{\delta f(H')}{\delta H} = Q'_e + q_e \quad (\text{IV.10})$$

Après simplification, nous obtenons le modèle linéaire suivant :

$$A \cdot \frac{d(h)}{dt} + h \frac{\delta f(H')}{\delta H} = q_e \quad (\text{IV.11})$$

Il s'agit en fait d'un système de premier ordre (équation différentielle du premier ordre).

Application la transformée de Laplace à l'équation (IV.11), en considérant les conditions initiales nulles, nous obtenons la fonction de transfert suivante [22] :

$$h(s) = \frac{Ks}{Ts+1} q_e(s) \quad (\text{IV.12})$$

K= le gain statique du système.

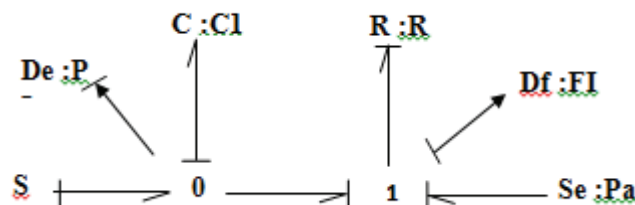
T= la constante du temps de système.

Il nous faudra identifier ces deux constantes K et T du modèle afin de pouvoir l'utiliser dans la supervision et le contrôle du système réel. Mais avant cela, nous tentons dans la section suivante de retrouver le même modèle par la technique de Bond Graph.

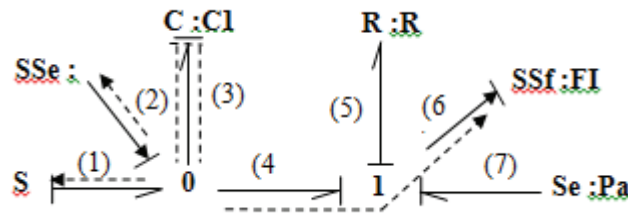
IV.3.2 Modélisation par bond graph

Dans cette section, nous appliquons directement la théorie de modélisation par Bond Graph à notre système (banc de régulation).

- 1- Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle en employant la notion de la dualisation des détecteurs (DE, SSe, Df et SSf).



a: Modèle BG en causalité intégrale



b : Modèle BG en causalité

2- Les RRAs sont déduites à partir des équations aux jonctions associées aux détecteurs, dans notre cas avons les équations issues des jonctions « 0 » et « 1 ».

Jonction 0 :

$$\sum f = 0$$

$$\phi_{j0}: f_1 - f_3 - f_2 = De \neq 0$$

$$f_1 = sf$$

$$f_2 = \phi_c(dDe dt)$$

$$f_3 = Df$$

$$ARR_1: Sf - Df - \phi_c(dDe) dt$$

Jonction 1:

$$\sum e = 0$$

$$\phi_{j1}: e_3 - e_4 - e_5 = Df \neq 0$$

$$e_3 = De$$

$$e_5 = Se$$

$$e_4 = \phi_R(Df)$$

$$ARR_2: De - Se - \phi_R(Df)$$

IV.3.3 Utilisation des Bond Graph pour la modélisation

Une fois, nous franchissons les deux étapes précédentes, nous passons maintenant à l'implémentation de notre modèle sous SYMBOLS, comme il est montré sur la figure IV.4.

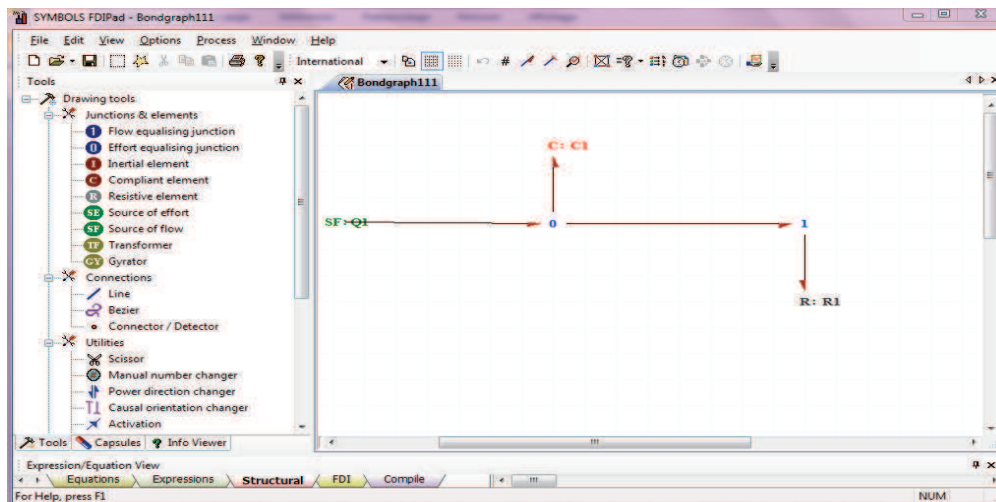


Figure IV.4 : Le modèle bond graph par logiciel Symbols shakti.

La compilation de notre modèle est effectuée sans aucune erreur :

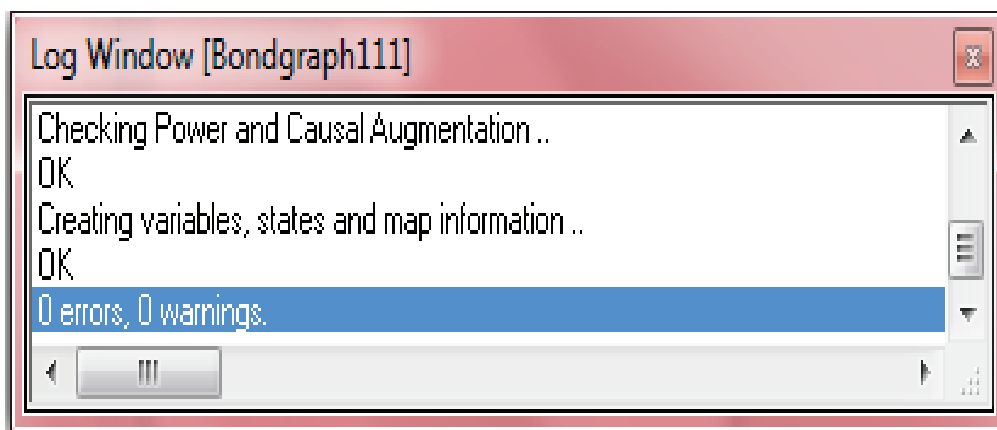


Figure IV.5 : Fenêtre de compilation.

Après la compilation, des expressions des sources et paramètres modulés sont créés.

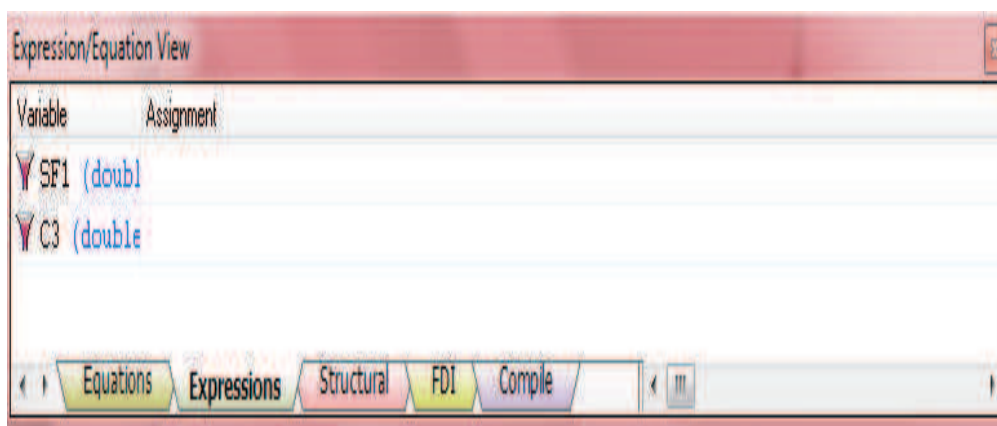


Figure IV.6 : Fenêtre d'expressions.

La figure suivante représente notre modèle d'état :

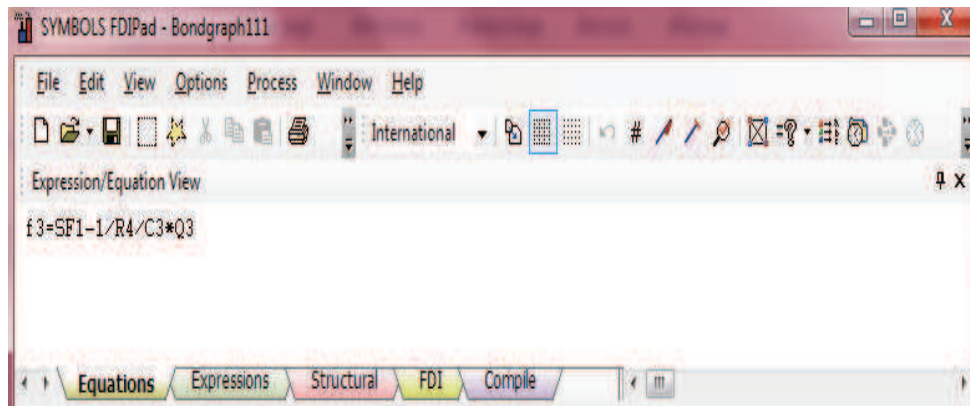


Figure IV.7 : Fenêtre d'équations.

IV.4 Identification du système

IV.4.1 Rappel du principe de l'identification

Si les paramètres du modèle d'un système ne sont pas connus, ou s'il n'est pas possible d'obtenir le modèle lui-même à partir des lois physiques (complexité, processus en fonctionnement, système en boîte noire, ...), alors on fait appel à l'identification du système. Il s'agit de trouver le modèle ou fonction de transfert à partir des essais expérimentales entrée/sortie. Le modèle recherché, appartenant à une classe de modèles connue, doit avoir un comportement le plus proche possible au comportement réel du système physique.

L'identification d'un système consiste à exciter les entrées de ce dernier par des signaux test persistants et, à récupérer ses sorties (graphes, données). Selon la forme des réponses, le type du modèle recherché et la richesse des données, diverses méthodes d'identification existent, dont chacune peut être appliquée dans un cas particulier.

En fait, on distingue les méthodes d'identification classiques (Broïda, Strej'c, premier et deuxième ordre, ...), et des méthodes d'identification modernes (ARX, ...).

Dans le cadre de notre projet, nous avons appliqué une méthode d'identification classique pour trouver le modèle du système étudié. Il s'agit de la méthode de Broïda,

dont nous présentons par la suite le principe et l'application directe sur le système [23].

IV.4.2 Rappel sur quelques méthodes d'identification classiques

IV.4.2.1 La méthode de Strejc

Cette méthode peut s'appliquer aux systèmes dont la réponse indicielle ne présente pas de dépassement. On identifie à une fonction de la forme :

$$T(p) = \frac{K e^{-r \cdot p}}{(1 + \tau \cdot p)^n} \quad (\text{IV.13})$$

Les paramètres à identifier sont donc :

- Le gain statique « K ».
- Le retard « r ».
- La constante de temps « τ ».
- Et l'ordre « n ».

La figure IV.8 représente les réponses indicielles pour plusieurs jeux de paramètres.

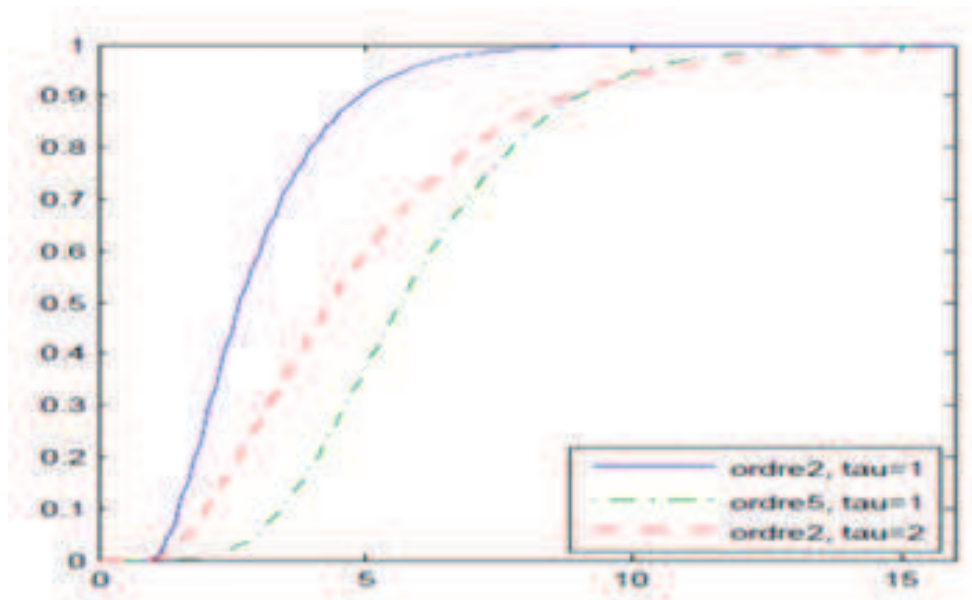


Figure IV.8 : Réponse du modèle de Strejc pour $K=1$, $r=1$.

Pour identifier le système, la méthode utilisée est la suivante :

- Le gain statique est mesuré directement par la valeur finale de la sortie. Celle-ci vaut $K.E_0$ ou E_0 est l'amplitude de l'échelon d'entrée.
- On trace la tangente au point d'inflexion I pour déterminer deux valeurs : T_1 et T_2 . Voir figure IV.9 pour la mesure de ces deux temps.
- Relever T_1 et T_2 en déduire l'ordre n en utilisant le tableau IV.1. Entre deux lignes du tableau, on choisit la valeur de n la plus petite.
- Déterminer la constante de temps τ à partir de T_2/τ du tableau.
- Déterminer le retard r quand il existe à partir de la différence entre la valeur de T_1 mesurée et celle donnée par la colonne T_1/T_2 du tableau

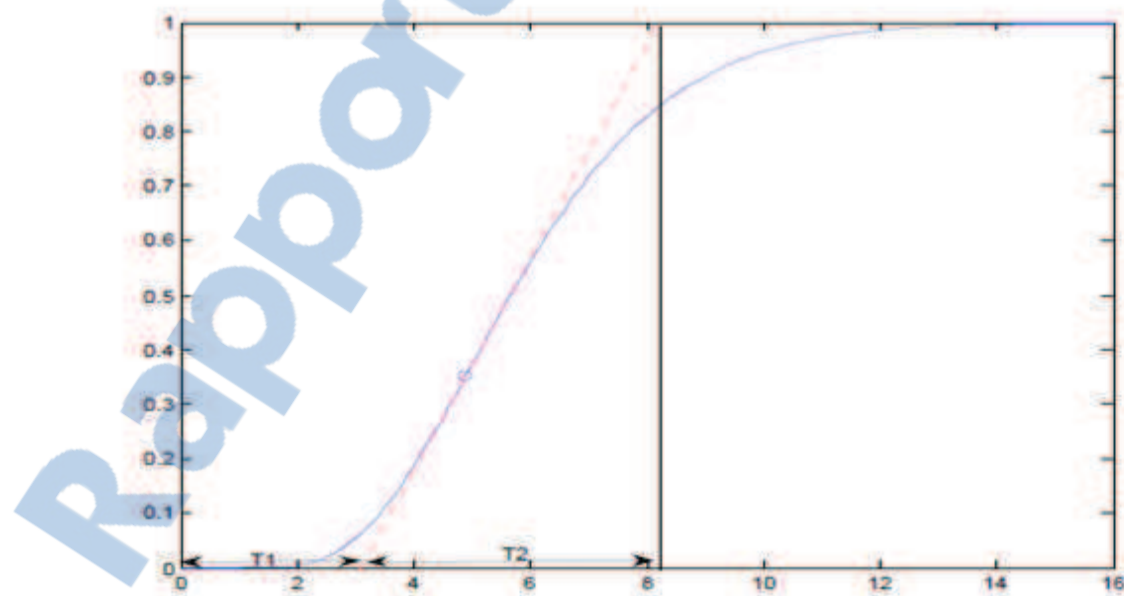


Figure IV.9 : Méthode pour obtenir T_1 et T_2

N	T ₁ /T	T ₂ /T	T ₁ /T ₂
1	0	1	0
2	0.28	2.72	0.1
3	0.8	3.7	0.22
4	1.42	4.64	0.32
5	2.10	5.12	0.41
6	2.81	5.70	0.49

Tableau IV.1:Tableau pour estimer l'ordre, la constante de temps et le retard du modèle de Strejc.

IV.4.2.2 La méthode de Broïda

Le modèle proposé pour approcher le comportement du système est un premier ordre avec un retard pur. Sa fonction de transfert est :

$$T(p) = \frac{K e^{-r.p}}{1+\tau.p} \quad (\text{IV. 14})$$

Le principe n'est pas de faire coïncider la tangente au point d'inflexion (souvent imprécis) mais d'ajuster les paramètres τ et r pour que les courbes de réponse du modèle et du processus aient deux points communs judicieusement choisis. Les points communs C1 et C2 habituellement utilisés correspondent respectivement à 28% et 40% de la valeur finale. Le modèle de Broïda donne les points C1 et C2 pour les temps suivants :

$$\frac{s(t)}{K.E_0} = 0.28 \quad (\text{IV. 15})$$

$$\frac{s(t)}{K.E_0} = 0.40 \quad (\text{IV. 16})$$

La méthode d'identification s'appuie sur les résultats précédents. Soient t_1 et t_2 les temps au bout desquels la réponse expérimentale atteint respectivement 28% et 40% de la valeur finale. On va simplement résoudre le système donné par :

$$\frac{t_1 - r}{\tau} = 0.328 \quad ==> t_1 - r = 0.328 \tau \quad (\text{IV.17})$$

$$\frac{t_2 - r}{\tau} = 0.328 \quad ==> t_2 - r = 0.510 \tau \quad (\text{IV.18})$$

La résolution de ces équations donne :

$$\tau = 5.5. (t_2 - t_1) r = 2.8 t_1 - 1.8 t_2 \quad (\text{IV.19})$$

Le gain K est déterminé comme dans la méthode de Strejc avec la valeur finale de la sortie.

La figure IV.10 donne les courbes de réponse du système réel et du modèle de Broida. La concordance des deux points C1 et C2 est bien vérifiée [24] [25].

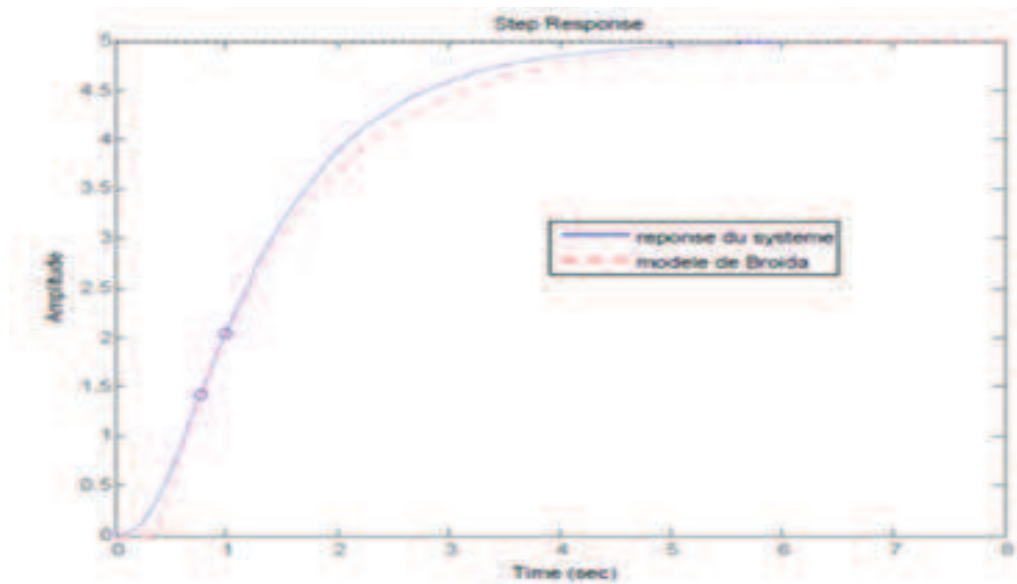


Figure IV.10: Courbe réelle approchée par un modèle de Broida.

IV.4.2.3 Identification du système par la méthode de Broïda

La méthode de Broïda est utilisée pour les systèmes d'ordre élevé, présentant une réponse du premier ordre avec retard pur. La fonction de transfert proposée est de la forme :

$$T(p) = S(p)/E(p) = \frac{K e^{-r.p}}{1 + \tau.p} \quad (\text{IV.20})$$

Avec :

$E(p)$: l'entrée du système.

$S(p)$: la sortie du système.

K : le gain statique du système.

r : le retard du système.

τ : la constante de temps du système.

Le principe consiste à ajuster les paramètres τ et r pour que les courbes de réponse du modèle et du processus aient deux points communs $C1$ et $C2$, judicieusement choisis. Ces points correspondent respectivement à 28% et 40% de la valeur finale de la réponse comme il est montré par la figure IV.11.

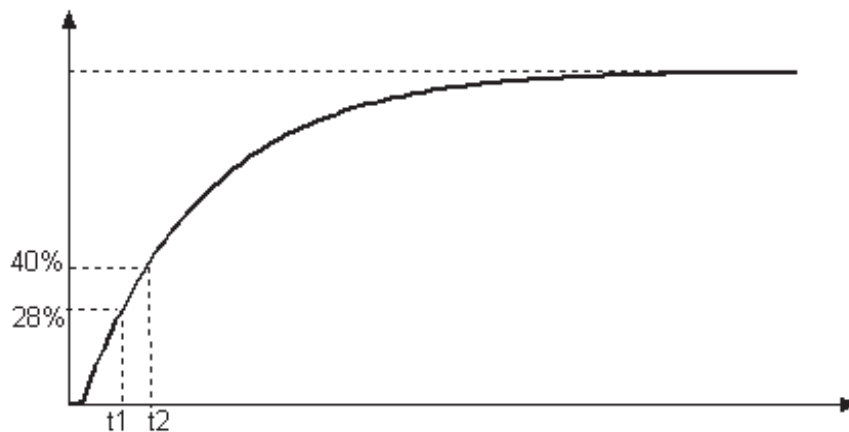


Figure IV.11 : méthode de Broida.

Cette méthode d'identification s'appuie sur la résolution du système d'équations donné par :

$$\frac{t_1 - r}{\tau} = 0.328 \quad \Rightarrow \quad t_1 - r = 0.328 \tau \quad (\text{IV.21})$$

$$\frac{t_2 - r}{\tau} = 0.510 \quad \Rightarrow \quad t_2 - r = 0.510 \tau \quad (\text{IV.22})$$

La résolution de ces équations donne :

La constante de temps :

$$\tau = 5.5(t_2 - t_1) \quad (\text{IV.23})$$

Le retard :

$$r = 2.8 t_1 - 1.8 \quad (\text{IV.24})$$

Le gain K_s

est déterminé par le régime stationnaire. Il est donné par le rapport suivant :

$$K_s = |S(\infty)|/|E(\infty)| \quad (\text{IV.25})$$

➤ Application sur le banc de régulation

Nous avons effectué une expérience en boucle ouverte sur le banc de régulation de niveau, afin d'appliquer la méthode de Broïda. Nous résumons la procédure effectuée dans les points suivants :

1 - Le système a été préparé comme il est représenté sur la figure IV.12. En fait, la vanne de vidange a été ouverte à la position 2 (partiellement ouverte).

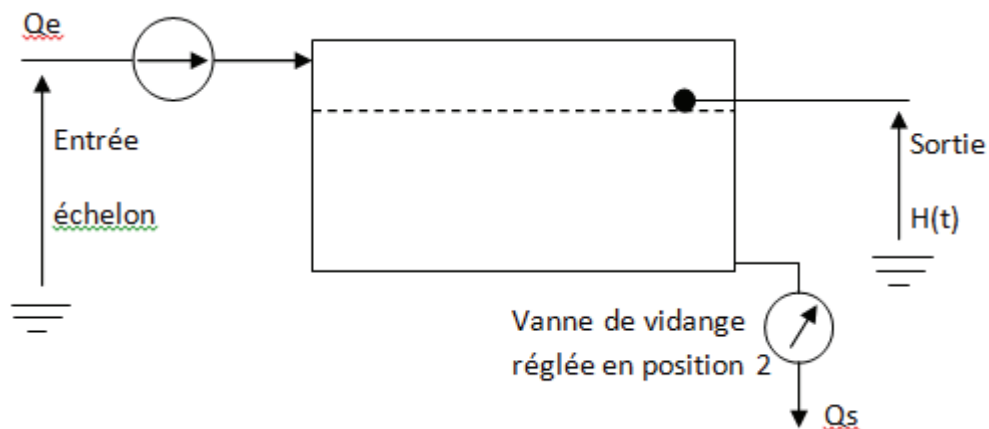


Figure IV.12 : Le système étudié.

2 - Nous avons excité le système par un échelon en entrée de 4 à 7 V (tension d'alimentation de la pompe).

3 - Nous avons enregistré les données d'entrée et de sortie de l'instant initial jusqu'à ce que le système a atteint son régime permanent. Ces données vont être utilisées pour l'identification du modèle.

4 - Nous avons appliqué de nouveau à l'entrée du système un échelon de 4 à 8 V et nous avons récupéré les données sur l'entrée et la sortie de la même manière de l'étape précédente. Ces données vont être utilisées pour la validation du modèle.

L'entrée appliquée et la réponse obtenue dans l'étape 2 sont représentées sur la figure IV.9. Nous remarquons bien que le système présente un comportement en premier ordre, donc la méthode de Broïda lui convient bien pour l'identification.

Les deux points respectivement C1 à 28% et C2 à 40% de la valeur finale de la réponse sont montrés sur la figure IV.13, d'où les temps t_1 et t_2 correspondants sont :

$$t_1 = 9,35 \text{ sec}$$

$$t_2 = 15,20 \text{ sec}$$

En utilisant les formules (VI.23) et (VI.24) de r et t_0 , nous obtenons :

$$\tau = 32,17 \text{ sec}$$

$$r = 1,18 \text{ sec}$$

Enfin, le gain statique K peut être calculé facilement par sa formule donnée ci-haut par (IV.25).

$$K = \frac{1,68 \text{ v}}{4 \text{ v}} = 0,42$$

La fonction de transfert identifiée s'écrit donc :

$$T(p) = \frac{0,42 \cdot e^{1,18 \cdot p}}{1 + 32,17 \cdot p}$$

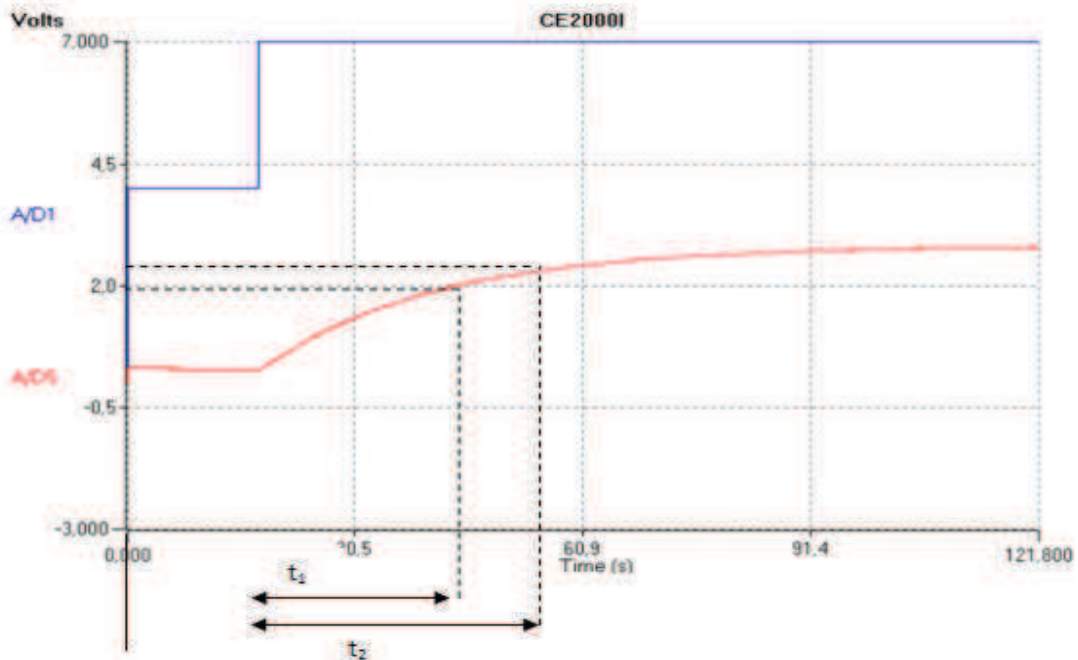


Figure IV.13 : *Entrée et sortie réelles du système.*

Sur la figure suivante, nous présentons l'entrée en échelon 4-8V et la sortie correspondante, qui sera utilisée pour la validation du modèle.

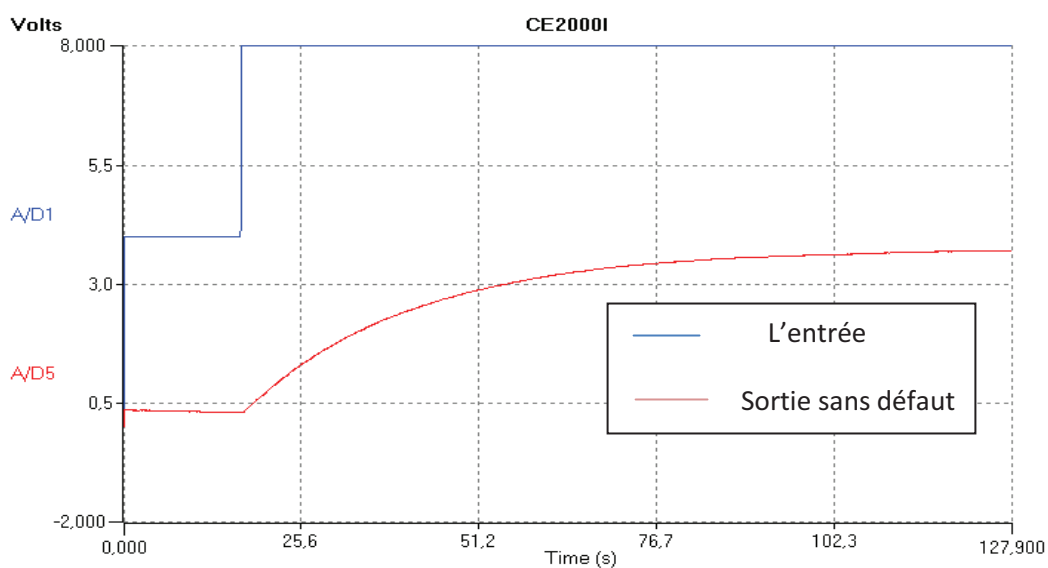


Figure IV.14 : *Entrée et sortie du système utilisée pour la validation du modèle.*

➤ Validation sous Simulink

Afin de valider notre modèle identifié, nous élaborons un fichier Simulink dans lequel nous simulons la réponse indicielle du modèle et celle du système réelle. Les points suivants résument notre démarche :

1 - Nous relevons d'abord quelques points (assez suffisant) sur l'entrée et la sortie à partir des courbes expérimentales montrées par les figures IV.13 et IV.14. Sur les tableaux suivants, nous notons les valeurs des points relevés.

Temps (sec)	0	12,53	17,42	30,5	43,57	60,9	76,25	91,4	104,57
Entrée (v)	4	4	4	7	7	7	7	7	7
Sortie (v)	0	1,13	1,93	2,46	2,73	2,93	2,93	2,93	2,93

Tableau IV.2 : Valeurs de l'entrée et la sortie utilisées pour l'identification du modèle.

Temps (sec)	0	16,45	19,65	25,6	30,17	51,2	76,7	102,3	127,9
Entrée (v)	4	4	4	8	8	8	8	8	8
Sortie (v)	0	0,35	0,32	0,8	1,44	1,8	3,2	3,74	3,76

Tableau IV.3 : Valeurs de l'entrée et la sortie utilisées pour la validation du modèle.

2- Nous sauvegardons ces valeurs dans des fichiers de donnée sous Matlab, avec la commande 'save nom_fichier data', telle que : data = [Temps; Entrée; sortie]. Dans notre cas, nous sauvegardons les données de l'identification sous le nom « save fichier1 data » et celles de la validation sous le nom « save fichier1_v data1 » (voir la figure IV.15).

3- Sous Simulink, nous réalisons le fichier suivant :

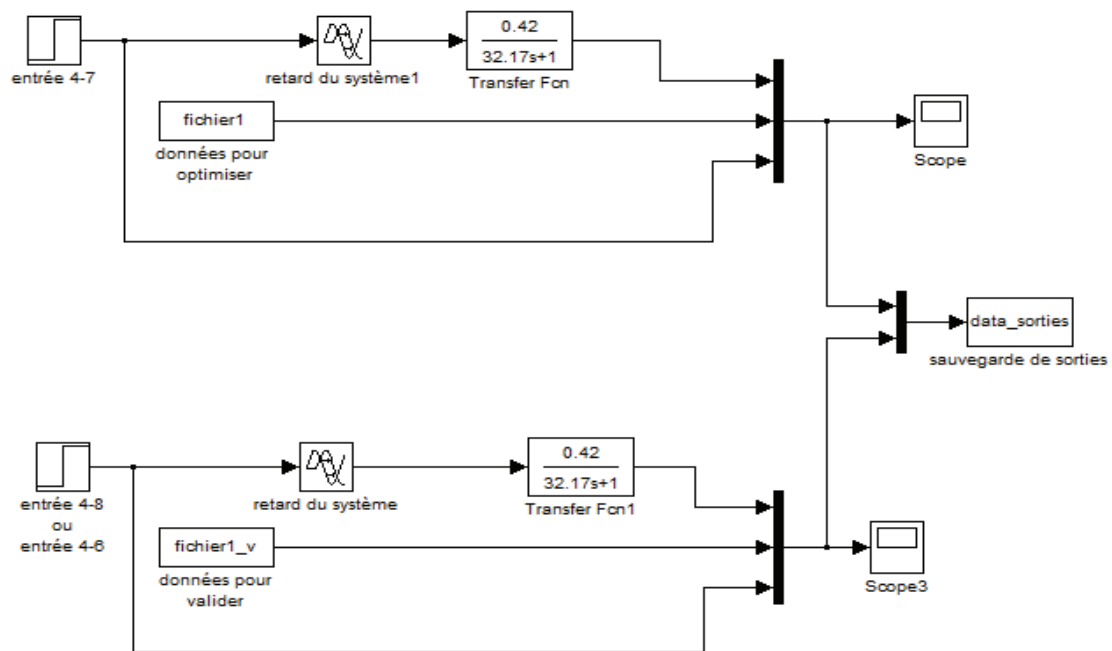


Figure IV.15 : Fichier Simulink utilisé pour la validation du modèle.

4- Nous comparons la réponse du modèle d'abord avec les mêmes données utilisées pour l'identification et puis, avec les données utilisées pour la validation.

5- Les sorties du fichier Simulink sont ensuite sauvegardées dans un fichier de données, en utilisant le bloc Simulink « To file ». Ceci a pour but de tracer les réponses réelle et simulée sur la même figure sous Matlab.

Les résultats obtenus après validation sont donnés par les figures IV.17 a et IV.18 suivantes. Sur la figure IV.17 a, nous représentons la réponse indicielle du modèle comparée avec celle réelle, utilisée pour l'identification (cas d'entrée 4-7V) et, sur la figure IV.18, nous représentons la réponse du modèle comparée avec celle utilisée pour la validation (cas d'entrée 4-8V).

➤ Interprétation :

Pour pouvoir modéliser notre système par Simulink et le comparer au système réel nous avons pris quelques points des graphes que nous avons obtenus grâce au CE105 expérimentalement.

Le tableau suivant illustre les points choisis de la sortie, l'entrée et le temps T tirés du graphe donnés par le système réel.

E	4	7	7	7	7	7	7	7
S(v)	0	1,13	1,93	2,46	2,73	2,93	2,93	2,93
T(s)	0	17,42	30,5	43,57	60,9	76,25	91,4	104,57

Tableau IV.4 : Valeurs des entrées sorties et du temps de la courbe réelle

➤ Schéma Simulink pour l'identification

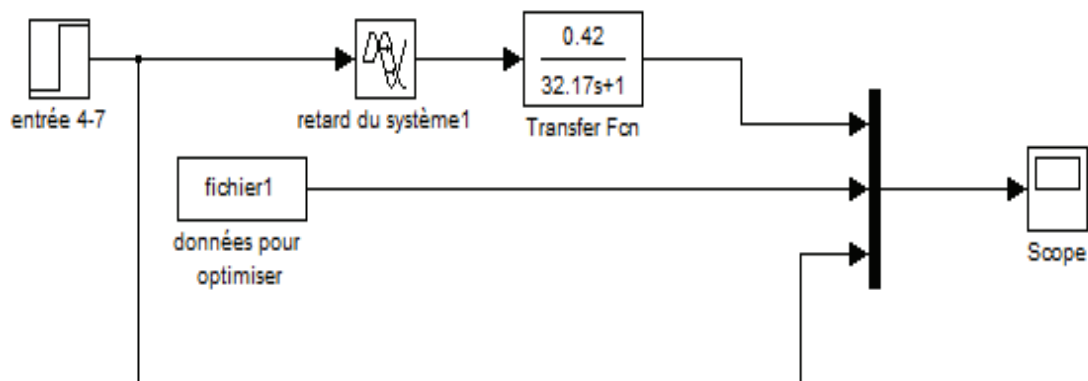


Figure IV.16: Schéma Simulink pour l'identification du système.

➤ Résultats après compilation du Simulink

La figure suivante représente le résultat obtenu après identification par Simulink.

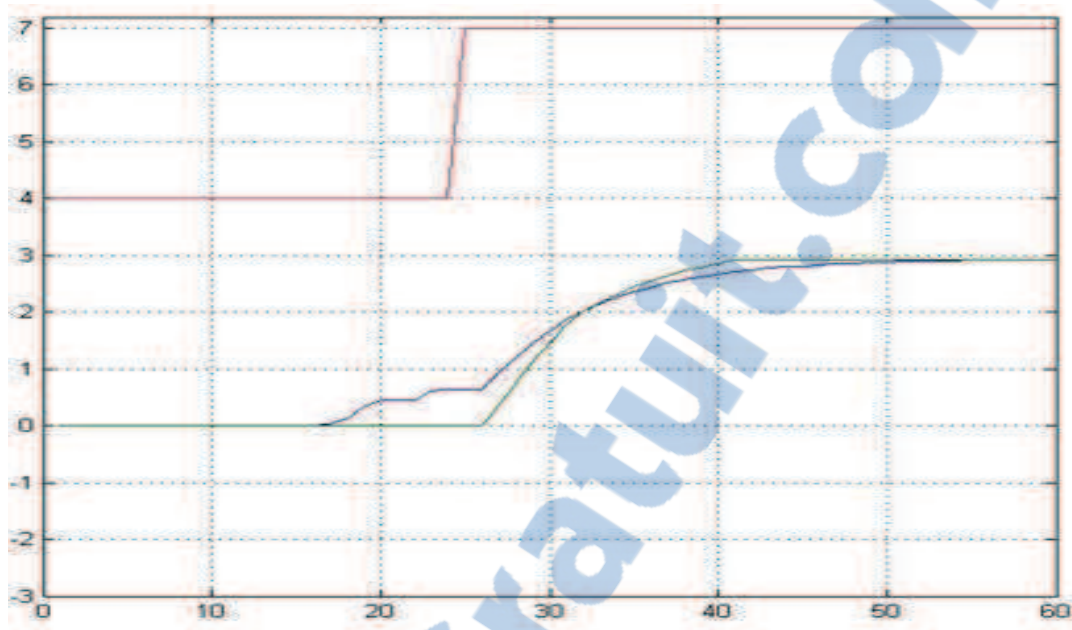


Figure IV.17 : *Résultat de l'identification du système par Simulink.*

Après que nous ayons constaté que la sortie de notre système par Simulink correspond parfaitement à celle du modèle réel, nous procédons à sa validation. Nous reprenons le même schéma Simulink qui nous a servi pour l'identification et nous lui rajoutons les paramètres obtenus du schéma précédent.

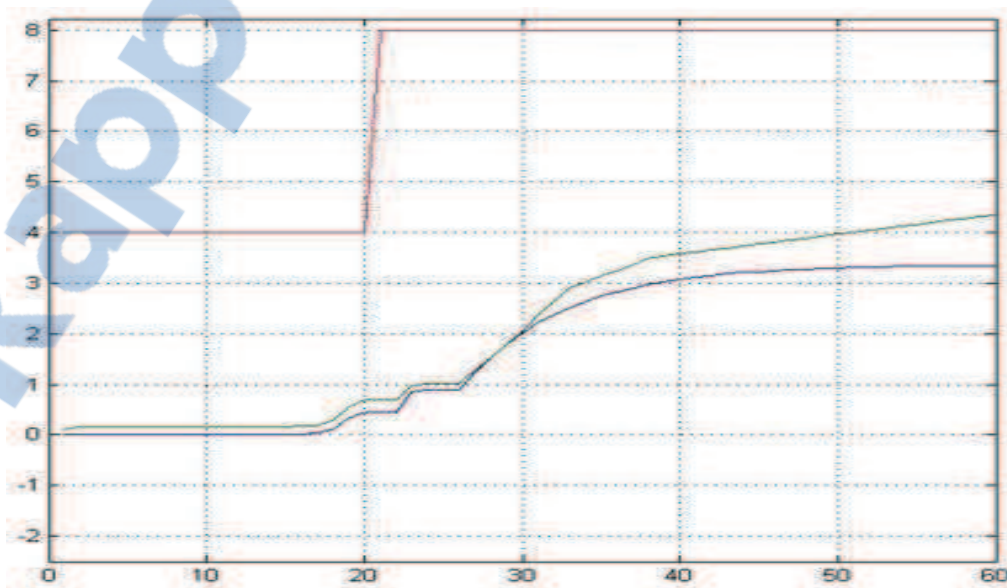


Figure IV.18 : *Résultat de la validation du système par Simulink.*

Nous remarquons que la réaction du système à une entrée échelon 4 (vert) correspond à la sortie du système réel, ce qui signifie que notre système se comporte de la même manière.

➤ Incorporation des défauts

L'objectif de cette section est de relever les réponses du système réel, qui est supposé fonctionner avec défauts. Nous créons un défaut à la fois et nous sauvegardons la réponse du système, qui sera utilisée par la suite avec le modèle Bond Graph afin de détecter ce défaut, suivant la théorie présentée dans le chapitre 2.

Nous considérons deux types de défauts :

1 - défaut sur le capteur de niveau

Nous réalisons une expérience sur le système de telle sorte que le capteur délivre après une certaine durée de fonctionnement, des valeurs erronées, comme il est montré dans la figure IV.19.

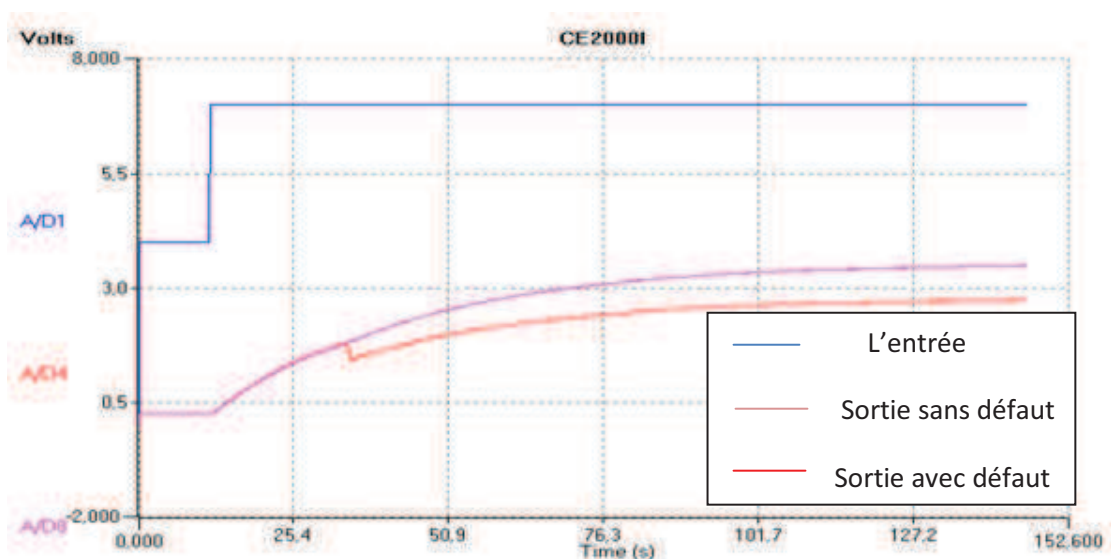


Figure IV.19 : Réponses du système réel avec et sans défaut capteur.

La courbe en rose, représente les vraies valeurs sans défaut capteur, tandis que la courbe en rouge représente les valeurs erronées, suite au défaut créé sur le capteur

de niveau. Malheureusement, les valeurs erronées suite au défaut ne doivent pas et ne peuvent pas être utilisées pour le contrôle du système, car cela peut causer l'instabilité.

2 - Défaut réservoir

Nous réalisons une expérience sur le système de telle sorte que le réservoir commence à se remplir et après un certain temps de fonctionnement, il va y avoir une fuite, alors le réservoir commence à se vider comme le montre la figure IV.20.

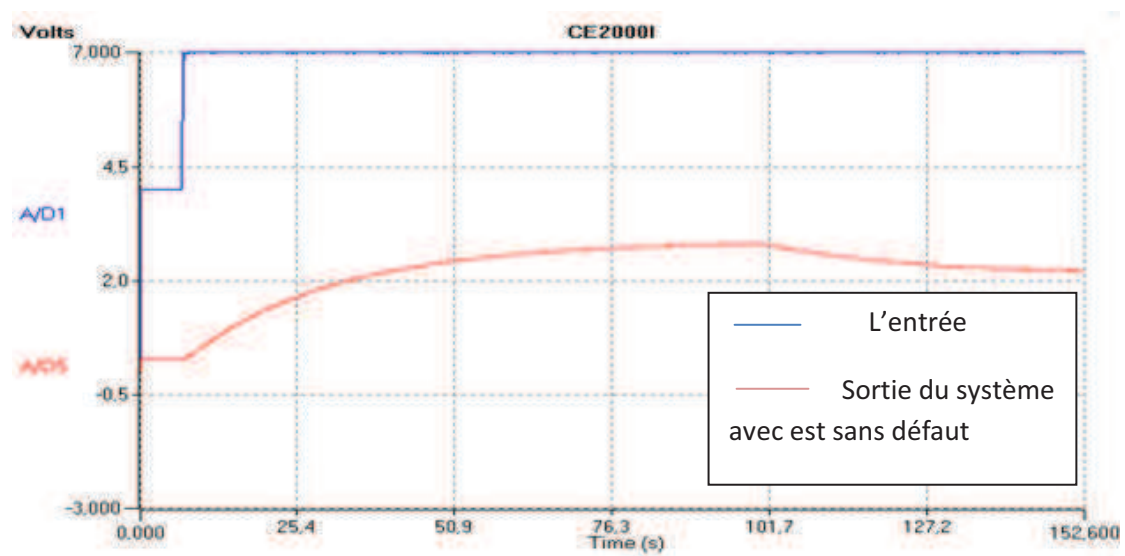


Figure IV.20 : Réponses du système réel devant un défaut réservoir

Nous avons simulé un défaut réservoir en ouvrant la vanne pour simuler une fuite et nous avons refait les mêmes étapes dans l'expérience.

Nous remarquons qu'avant la fuite le système se comportait normalement, dans l'instant où a eu lieu le défaut, la sortie commence à diminuer représentant la fuite.

IV.5 Détection des défauts par Bond Graph

Actuellement les méthodes de détection des défaillances au niveau des composants qui exploitent la notion des relations de redondances analytiques et la construction des signatures des différentes pannes probables sont complexes. De plus, seuls les défauts paramétriques (modifiant la valeur d'un (des) paramètre(s)) peuvent être considérés. En utilisant le logiciel Symboles, nous avons procédé comme suit

1. Représenter notre système sous forme de capsules.
2. Placer les capsules dans une fenêtre FDI pad de Symboles.

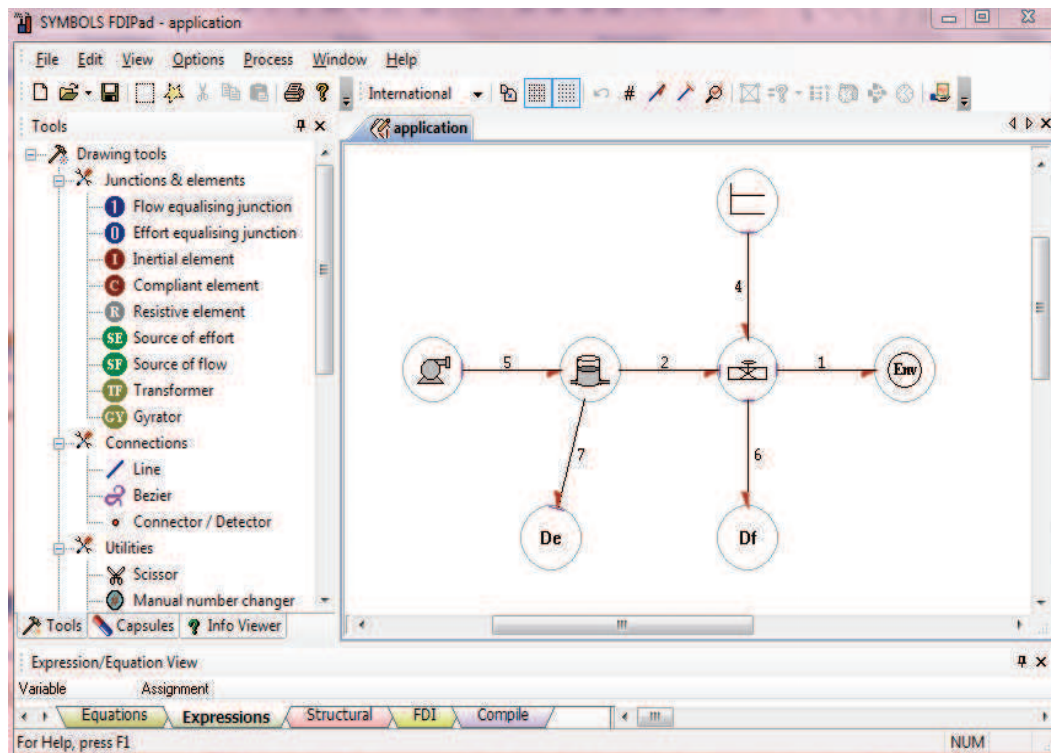


Figure IV.21 : le système modéliser par capsules sous Symbols

3. Valider et compiler le modèle obtenu ;

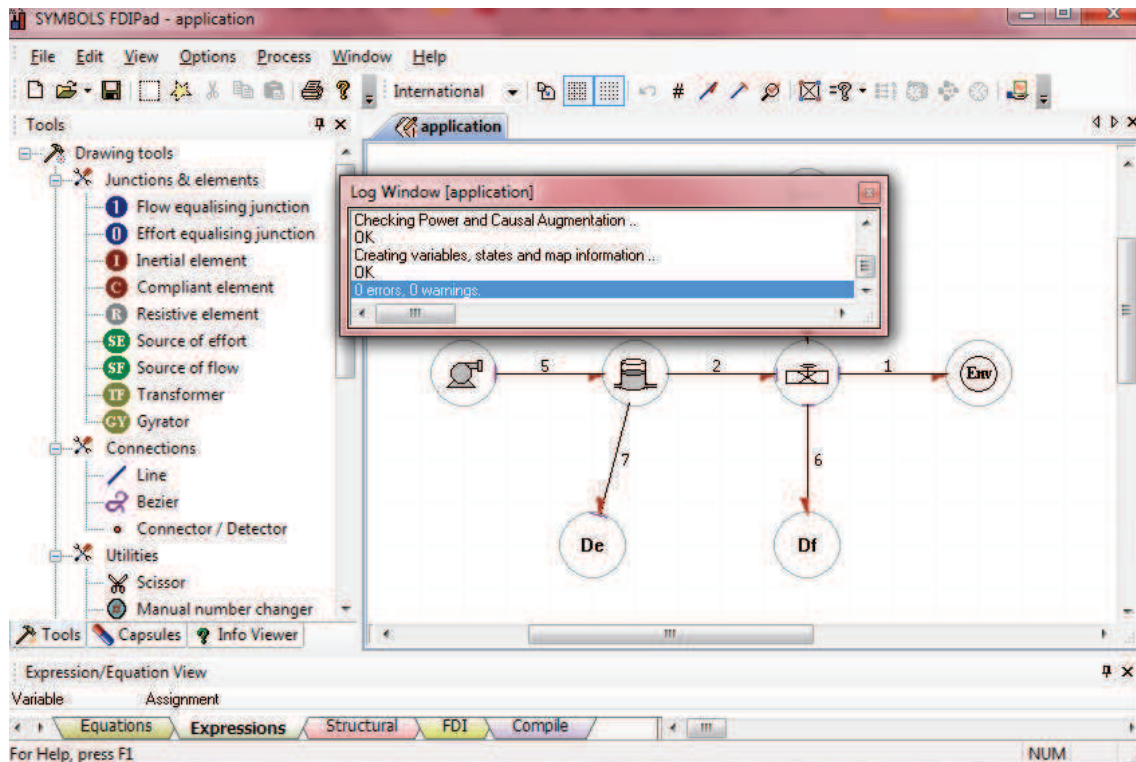


Figure IV.22 : validation et compilation du modèle

4. Effectuer l'analyse de monitorabilité du menu *Process / FDI* ;

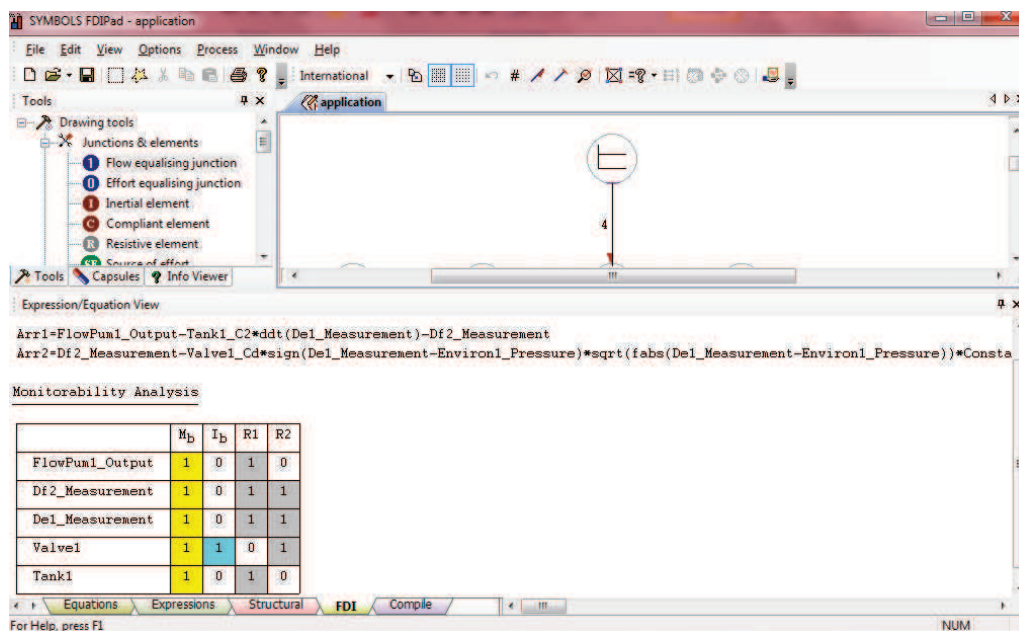


Figure IV.23 : l'analyse de la monitorabilité

5. La matrice de signature de faute est générée automatiquement, ainsi que les différentes RRAs ; elles seront affichées.

	Mb	Ib	R1	R2
FlowPum1_output	1	0	1	0
Df2_Mesurement	1	0	1	1
De1_Mesurement	1	0	1	1
Valve1	1	1	0	1
Tank1	1	0	1	0

Tableau IV.5 : *Matrice de signature de faute (MSF).*

Dans cette MSF on a les vecteur de signature qui sont (R1 R2) .

Nous remarquons qu'aumoin l'un deux et egale à 1 ce qui veut dire que tous les éléments de notre système sont detectables.

En ce qui concerne l'isolabilité nous avons un seule élément isolable qui est la valve1 parseque sont vecteur de signature est unique.

En fait la détection de ces défauts par les bonds graph n'est pas faite dans le cadre de notre mémoire, car nous n'avons pas le logiciel Symbols originale et donc, ça ne nous permet pas de simuler notre système par Bond Graph et de sauvegarder les réponses (courbes) du modèle afin de les comparer avec celle réelles du réservoir.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le système sur le quelle nous avons fait l'expérience de la partie pratique le banc de régulation de niveau, ainsi que le rappelle de quelque méthodes d'identification. A la fin nous avons montré la mise en œuvre de l'identification du système en utilisant Matlab et Simulink et nous avons présenté les résultats de simulation.

Notre but était d'avoir un model réel, le modéliser et générer les courbe de son fonctionnement normale et avec les défaut par bond graph pour ensuite les comparer au réponse obtenu par le système réel.

Nous avons eu des difficultés pour parvenir a nos fins presque le logicielle qui gère les bonds graph (Symbols Shakti) n'est en version complète, donc on n'a pas pu avoir les courbes du système simulé pour la comparaison avec le système réel.

Conclusion général

L'utilisation de l'outil bond graph en vue de la modélisation, de la détection et de la localisation des défauts dans les systèmes hydrauliques vient de paraître très efficace du fait de sa simplicité et de ses supports de modélisation et de simulation.

Notre contribution concerne une méthode à base du modèle Bond graph, la génération des relations de redondance analytiques (résidus), l'analyse de la surveillabilité et l'isolabilité des fautes.

La génération des relations de redondances analytiques (RRAs) par l'approche bond graph présente quelques caractéristiques intéressantes : elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph image du processus physique, ces relations sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est donc introduit en génie des procédés pour l'analyse et la surveillance des processus. Cet outil, par ses aspects génériques, permet la mise en place d'un outil logiciel pour l'automatisation des procédures diminuant le coût de la conception des systèmes de surveillance.

Dans ce travail, nous avons modélisé un système hydraulique qui est le réservoir avec une pompe comme source d'entrée et une vanne comme sortie.

Nous avons généré le modèle dynamique, spécifié des indicateurs de fautes et calculer la matrice de signatures des fautes par une interface conviviale et un menu approprié Symbols Shakti. Nous avons utilisé des capsules pour chaque parties de notre système et grâce à ce modèle nous avons obtenu les relations de redondance analytique et la matrice de signature des fautes.

Enfin, nous avons modélisé notre système par loi physique puis nous avons effectué une identification et une comparaison entre ces valeurs et les courbes réelles de notre système que nous avons obtenues graphiquement.

Comme perspectives de notre travail est de pouvoir générer les courbes du système par Symbols chose que nous n'avons pas pu faire à cause de la version du logiciel sur lequel nous avons travaillé et qui est incomplète.

Bibliographie

- [1]: [pay,1961] paynter.H ,analysis and design of engineering system MIT press 1961.
- [2]: [kap 7501] karnopp D. Rosenberg R, system dynamic unified approach , john wiley et sons 1975.
- [3]: [Ros,1983] Rosenberg R, Karnopp D “Introduction to physical system dynamic”, serie in mechanical engineering. MacGrow,1983.
- [4]: [THO 75] Thoma J, Introduction to bond graphs and Thiere applications. Pergo mon press, 1975.
- [5] : Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs, Michel Vergé, Daniel Jaume, éditions Technip, Paris 2004.
- [6] : Modélisation et identification des processus, P.Borne et al., éditions Technip, Paris 1991.
- [7] : G.Dauphin-Tangus(2000) les bond graphs. Paris Hermes science paphication 2000.
- [8] : R. J. Patton. Fault-tolerant control: The 1997 situation. Safe process, pages 1033—1055, 1997.
- [9]: J.Eterno, D. Looze, J. Weiss, and A. Willsky. Design issue for fault-tolerant restructurable aircraft control. Proc. 24th CDC, Fort Lauderdale, pages 900—905, 1985.
- [10]: M. Staroswiecki and A. Gehin. From control to supervision. Safeprocess, page 312:323,2000.
- [11]: M. Blank, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. Diagnosis and Fault Tolerant Control. Springer Verlag, May 2003.

- [12] : G. Zwingelstein. Diagnostic Des Défaillances: Théorie et Pratique Pour Les Systèmes Industriels. Hermès, 1995.
- [13] : J. Brunet, L. M. Jaume, D., A. Rault, and M. Vergé. Détection et Diagnostic de Pannes: Approche Par Modélisation. Hermès, hermes edition, 1990.
- [14] : G. Delmaire. Comparaison Des Méthodes D'identification Paramétrique et de L'espace de Parité Pour la Détection et la Localisation de Défaillances Dans Les Systèmes Automatisés. PhD thesis, Univ. des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, 1998.
- [15]: I. Isermann and P. Balle. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. Control engineering practice, pages 709—719, 1997.
- [16] : W. Elostia : Surveillabilité structurelle et platitude pour le Diagnostic des modèles bond graphs couplés. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [17] : I. Dif et al : Détection et localisation des défauts par l'approche bond graph. Premier congrès international sur le génie électrique, CIGE'04, 206-210, Sétif, Algérie, 10-12 Octobre, 2004.
- [18] : C. Ghiaus: Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. ELSEVIER Energy and Buildings 30, (1999) 221–232.
- [19] : K. Medjaher : Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [20]: A.K. Samantaray et al: Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory 14, (2006) 237–262.
- [21]: B. Ould Bouamama et al: Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. ELSEVIER Control Engineering Practice 13, (2005) 875–891.
- [22]: TecQuipment Ltd, Bonsall Street, Long Eaton, Nottingham NG10 2AN, UK
- [23]: Hatem Ladjailia. '*Identification*'. Page web

[24]: Amine HADJ ABDELKADER. (Octobre 2007). '*Identification des Systèmes Linéaires*'. Document de cours pour les étudiants de M1 en 'Contrôle des Processus'. Université ABOU BEKR BELKAÏD – Tlemcen Faculté de Technologie.

[25] : Gonzalo Cabodevila. (2009,2010). '*Identification des systèmes*'. École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques. France

[26] :A.PHILIPPUS. Temporal causal graph.

[27] : C-FRYDMAN,M.LEGOC,L.TORRES ET N.GIAMBIASI. The diagnostic approach used in SACHEM. In Working Notes of the 12th international Workshop on principles of the diagnostic DX'01, Sansicario , Italie, 2001.

[28] : Mounira benallel . Surveillance des systèmes thermodynamiques modélisés par des bond graphs multi-énergie. Mémoire de Magistère laboratoire Automatique Tlemcen. Mai 2005.

Résumé

Le présent mémoire concerne l'étude structurelle pour le recouvrement des défauts par l'approche bond graph. L'objectif est d'exploiter les propriétés structurelles et causales de l'outil bond graph, afin d'effectuer à la fois le diagnostic et l'analyse de la commande du système physique en présence de défauts. En effet, l'outil bond graph permet de vérifier les conditions structurelles de recouvrement de défauts pas seulement du point de vue de l'analyse de commande, mais aussi en considérant les informations issues de l'étape de diagnostic. Par conséquent, l'ensemble des défauts tolérés est obtenu en mode hors-ligne avant d'effectuer une implémentation réelle. En outre, en estimant le défaut comme une puissance perturbatrice fournie au système, ce qui permet d'étendre les résultats d'analyse structurelle pour le recouvrement du défaut à une compensation locale adaptative, directement à partir du modèle bond graph. Il a noté que notre travail a été effectué au sein de laboratoire d'automatique à Tlemcen.

Mots clés : Bond graph, défaut, diagnostic, RRA, MSf, Symboles.

Abstract:

The present report relates to the study structural for covering of the defects with the approach jump graph. The objective is to exploit the properties structural and causal of the tool jump graph, in order to carry out at the same time the diagnosis and the analysis of the ordering of the physical system in the presence of defects. Indeed, the tool jump graph makes it possible to check the conditions structural of covering of defects not only from the point of view of the analysis of order, but also by considering information resulting from the stage of diagnosis. Consequently, the whole of the tolerated defects is obtained in out-line mode before carrying out a real implementation. Moreover, by estimating the defect like a disturbing power provided to the system, which makes it possible to extend the results of analysis structural for covering of the defect to an adaptive compensation local, directly starting from the model jump graph. It noted that our work has stays carried out within laboratory of automatic has Tlemcen.

Keywords : Bond graph, fault, diagnosis, RRA, MSf, Symbols.