

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE

N° :ELM-05



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: ZIOUCHE Charaf Eddine

HAMLAOUI Mouna

Intitulé

**Surveillance des systèmes de production par bond
graph**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. ABDO Abdelhak	Université M'SILA	Président
Mr. DEFDAF Mabrok	Université M'SILA	Rapporteur
Mr. BENDAIKHA Abdelmalek	Université M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon cher Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mes frères Halim, Youcef

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A ma très chère fille OMAIMA et ma femme

A mes grands-parents et tous les membres de ma famille, petits et grands

A mes chers collègues

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail
A tous ceux qui sont proche de moi et dont je n'est pas cité leur nom.

Charaf Eddine

Dédicace

Je dédie ce travail :

Tout d'abord à mes parents ; à ma tendre mère qui m'a mis au monde et a veillé à mon bonheur ; à mon père qui a tout donné, qui m'a encouragée d'avantage pour ma réussite dans ma vie. Je leurs éprouve ma profonde gratitude et je leurs promet d'être toujours à leurs côtés. Je vous aime et que dieu vous garde pour nous tous.

A mon marié H'ERIAJ Abdennour.

A mes chers frères.

A mes très chères sœurs.

A toutes personnes qui ma aider à ce travail.

A mes copines : Imane, Ahlam , Amel, Hadjira et Siham.

A toute ma famille sans exception.

Mouna

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le Bon Dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail, et qui nous a éclairé les chemins par la lumière de son immense savoir.

Nous ne pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite nos encadreur Dr. DEFDAF Mabrouk, afin de la remercier pour sa sympathie sa patience, ses encouragements ses conseils, son aide, ainsi que pour le temps qu'elle a consacré pour évaluer.

Ainsi nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de génie électrique.

Un remerciement spécial aux Étudiants du département de génie électrique.

Résumé

Le présent travail concerne la surveillance des systèmes de production par bond graph. L'objectif est d'exploiter les propriétés structurelles et causales de l'outil bond graph, afin d'effectuer à la fois le suivi, 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.

Dans ce contexte, nous présentons une surveillance d'un système industriel par l'approche bond graph, en utilisant algorithmes pour la génération des ARRs, et une approche combinée entre les bond graphs et les modèles externes a été donnée pour la conception d'un système de supervision, cette approche a été appliquée sur systèmes hydraulique.

Mots clés : surveillance, bond graph, diagnostic, ARRs....

Table des matières

Introduction générale	2
Chapitre I. Outils de surveillance.....	6
I.1 Introduction.....	6
I.2 Définitions et terminologie	6
I.2.1 Définitions.....	6
I.2.2 Classification des défauts.....	8
I.2.3 Modes de fonctionnement des systèmes	9
I.2.4 But, fonctions et conception des systèmes de surveillance :.....	9
I.2.4.1 But de la surveillance.....	9
I.2.4.2 Fonctions de la surveillance.....	10
I.2.4.3 Conception d'un système de surveillance.....	13
I.2.5 Classification des méthodes de surveillance :.....	14
I.2.5.1 Méthodes à base de modèle	14
I.3 Conclusion	18
Chapitre II. Approche Bond Graph.....	21
II.1 Introduction.....	21
II.2 Eléments bond graph.....	21
II.2.1 Eléments passifs.....	23
II.2.1.1 Résistance R :	23
II.2.1.2 Capacité C :	24
II.2.1.3 Inertie I :	25
II.2.2 Eléments actifs.....	26
II.2.2.1 Élément de jonction	26
II.2.3 Les détecteurs.....	28
II.2.4 Elements bond graph a 2 ports	29
II.2.4.1 Transformateur TF.....	29
II.2.4.2 Gyrateur GY.....	30
II.2.5 Eléments bond graph multiports	31
II.2.5.1 Multiport C.....	31
II.2.5.2 Multiport I.....	31
II.2.5.3 Multiport mixte IC	31
II.2.5.4 Multiport R.....	32
II.2.5.5 Multiport RS	33
II.2.6 Notion de causalité.....	33
II.2.6.1 Contraintes causales	34
II.2.6.2 Règles d'affectation de la causalité.....	35
II.2.7 Chemin causal	37
II.3 Procédures De Construction De Modeles Bond Graph	39
II.4 Matrice de transfert	41
II.4.1 Règle de MASSON.....	41
II.4.2 Équations d'état d'un modèle Bond graph.....	41
II.5 Conclusion	43
Chapitre III. Diagnostic du système par Bond Graph	45
III.1 Introduction.....	45
III.2 Définitions et terminologies.....	46
III.3 Surveillance des systèmes par bond graph.....	48

III.3.1	L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph	49
III.3.2	L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph	50
III.4	Matrice de signature des défaillances	51
III.5	APPLICATION	53
	56	
III.5.1	Description du processus	57
III.5.2	Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs	57
III.5.3	Génération des RRAs.....	58
III.6	Conclusion	66
	Conclusion générale.....	67

Liste des Figures

Figure I-1– Types de défaillances affectant un système physique.	8
Figure I-2– But du système de surveillance.....	11
Figure I-3–Les étapes de surveillance.....	11
Figure I-4– Classification des méthodes de surveillance : arbre de défaillance	14
Figure I-5–Courbe ABC	18
Figure II-1 – Représentation d'un élément bond graph.....	22
Figure II-2– Elément du langage bond graph [23].....	23
Figure II-3 – Représentation graphique de l'élément R.....	24
Figure II-4– Représentation graphique de l'élément C.....	25
Figure II-5– Représentation graphique de l'élément « I ».....	25
Figure II-6–Éléments actifs.(a): Sources d'effort et de flux. (b): Sources modulées d'effort et de flux.	26
Figure II-7–jonction parallèle ou jonction 0	27
Figure II-8– Jonction « 0 » système électrique.....	27
Figure II-9–Jonction série ou jonction 1	28
Figure II-10–Jonction « 1 ».(a): Système mécanique.(b): Système électrique.(c): Système hydraulique.	28
Figure II-11–les différents détecteurs (a) :d'effort,(b) :de flux	28
Figure II-12–Élément TF. .(a): Transformateur électrique.(b) : Piston hydraulique.(c) : Levier	29
Figure II-13–Représentation par bond graph de Transformateur TF.....	30
Figure II-14–Représentation par bond graph de Gyrateur GY	30
Figure II-15–(a) : Gyrateur. (b) : Gyrateur modulé.	30
Figure II-16–Multiport C	31
Figure II-17–Multiport I	31
Figure II-18–Multiport mixte IC.....	32
Figure II-19–Multiport R	32
Figure II-20–Multiport RS.....	33
Figure II-21–causalités en bond graph.....	33
Figure II-22–causalités en bond graph.....	34
Figure II-23–causalités de bond graph.....	35
Figure II-24–chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.37	
Figure II-25–chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.37	
Figure II-26 –Chemin causal mixte indirect.	37
Figure II-27–chaîne d'actions	37
Figure II-28–Boucle causal en suivant l'effort ou le flux.....	38
Figure II-29–Maille.....	38
Figure II-30–Boucle causale	38

Figure II-31–Exemple	39
Figure II-32– Bond graph à mots du système physique de la figure (I.28)	39
Figure II-33–Moteur CC : schéma physique et bond graph associé	40
Figure II-34–Bond graph du système physique de la Figure–II.28	40
Figure III-1–Schéma de principe de la supervision	46
Figure III-2–Schéma de principe d’un processus régulé.	47
Figure III-3–Description du processus.....	53
Figure III-4–Modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle.	53
Figure III-5–Modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle.....	54
Figure III-6– BGDg de deux réservoirs	54
Figure III-7–Construction du modèle de simulation.....	56
Figure III-8–Description du processus.....	57
Figure III-9–Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs.	57
Figure III-10–Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs dans 20-sim 4.2.....	58
Figure III-11–Niveau d’eau dans les réservoirs 1 et 2.....	63
Figure III-12–Génération des ARR3, ARR4 et création d’un Défaut de fuite au niveau du réservoir 1.	63
Figure III-13–Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d’eau vers l’utilisateur avec fuite dans le réservoir 1.	64
Figure III-14–Génération de RRA3, RRA4 et création d’un Défaut de fuite d’eau dans le réservoir 2.	65
Figure III-15–Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d’eau vers l’utilisateur avec fuite dans le réservoir 2.	65

Liste des Tableaux

Tableau II-1– variables généralisées.....	22
Tableau II-2–Causalité des éléments bond graph.[25]	36
Tableau III-1 Matrice des signatures des fautes.	52
Tableau III-2 Matrice des signatures des fautes « MSf » de l'exemple étudié.	52
Tableau III-3 Matrice de signature des défaillances de l'application.	62

Glossaire

BG	Bond Graph
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
Sf	source de flux
Se	Source d'effort
R	Résistance
C	Capacité
I	Inertie
GY	Gyrateur
TF	Transformateur
MSe	Sources modulées d'effort
MSf	Sources modulées de flux
MGY	Gyrateur modulé
MTF	Transformateur modulé
RRA	Relation de redondance analytique.
SSe	Source de signal
FDI	Fault Detection and Isolation
FTC	Fault Tolerant Control
BGI	Bond graph en causalité intégrale
BGD	Bond graph en causalité dérivée
e	Effort
f	Flux
B	Gain d'une boucle causale

g	Gravité
I	Inductance
K	Gain
P	La puissance
T	Constante du temps
A	la section du fluide dans le réservoir
B	Gain d'une boucle causale
n	Ordre du système
Q _e	débit d'entrée du réservoir
Q _s	débit de sortie du réservoir
τ	Constante du temps

Introduction générale

Introduction générale

La complexité croissante des installations industriels et les contraintes de compétitivité en termes de fiabilité, disponibilité et sécurité des systèmes, 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 risque pour les personnes, l'environnement et les machines.

Aujourd'hui, un autre défi est relevé, il s'agit de l'automatisation de la supervision des processus en utilisant des systèmes intelligents. Ces derniers Fournissent à l'utilisateur une aide dans la gestion de ses tâches d'alarmes urgentes dans le but d'augmenter la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des processus.

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 Fault Détection & Isolation (FDI), qui consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements 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 minimisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. La dégradation des performances des algorithmes de diagnostic est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires [1].

Les méthodes à base de modèle utilisent des approches opératoires construites à partir des lois physiques ou identifiées du processus. Ces approches sont basées sur la comparaison entre le comportement réel du système et un comportement de référence décrit par un modèle mathématique. Cette comparaison se fait en utilisant des indicateurs de fautes, appelés résidus, générés à partir du modèle de référence en ayant recours à des méthodes analytiques, telles que : les observateurs, l'espace de parité, ou à des méthodes graphiques telles que les bond graphs, et les graphes bipartis.[2]

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.

L'intérêt du modèle bond graph se situe à plusieurs niveaux :

- La démarche est une approche complète pour la conception intégrée d'un système de supervision. La démarche est générique et flexible et n'utilise qu'une seule représentation.
- Grâce aux aspects graphiques et les propriétés structurelles et causales du bond graph, les modèles ainsi que les relations de redondances analytiques (RRAs) peuvent être générés sous forme symbolique et donc adaptés à une implémentation informatique en utilisant des logiciels dédiés [3].

Notre mémoire est organisée autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons le principe de la surveillance dans les systèmes industriels .

Le deuxième chapitre de ce mémoire illustre 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, et la présentation des différents algorithmes de construction des modèles bond graph, pour quelques systèmes physiques.

Finalement, dans le dernier chapitre, nous allons faire une application sur un système hydraulique.

Chapitre I. Outils de surveillance

Chapitre I. Outils de surveillance

I.1 Introduction

Les systèmes conçus et fabriqués par l'homme (véhicules, avions, réseaux de télécommunications, usines de production...) sont de plus en plus complexes. Cette complexité est due au grand nombre de composants constituant ces systèmes. Malgré les besoins de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements, ces systèmes ne sont pas à l'abri de défaillances. C'est pourquoi les activités de surveillance, diagnostic (détection, localisation, identification de défaillances), réparation ou reconfiguration sont très importantes. Ces activités permettent de détecter et localiser les défauts, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

De nos jours, l'implémentation des systèmes automatisés suppose la mise en place d'outils importants pour le diagnostic et la surveillance pour aider les entreprises dans leur recherche permanente d'un meilleur fonctionnement de leurs systèmes à moindre coût [4].

I.2 Définitions et terminologie

I.2.1 Définitions

On peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est pourquoi nous nous positionnons dans la première partie de ce chapitre, en donnant des définitions des mots clés qui sont utiles pour compréhension.

- **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. colonne de distillation, générateur de vapeur,...)
- **Définition 2.** Un composant industriel est un organe technologique destiné à former une partie du processus industriel (pompe, vanne, conduite, ...).
- **Définition 3.** L'architecture du système est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau des composants industriels.

- **Définition 4.** Nous appellerons P&ID (Piping and Instrumentation Diagrams) la définition des Plans des Instruments Détaillés ou diagrammes 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, 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 5.** Tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.
- **Définition 6.** Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans le cahier de charge. Ou ses fonctions requises avec les performances définies dans le cahier de charge [5].
- **Classification des défaillances :** On peut classer les défaillances :
 - ✓ Selon leur fonction des causes.
 - ✓ Selon leur vitesse d'apparition.
 - ✓ Selon leur date d'apparition.
- **Définition 7.** Une panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.
- **Définition 8.** Une erreur est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et une valeur spécifiée par un capteur étalon ou jugée (par un modèle) théoriquement correcte.
- **Définition 9.** Les symptômes sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.
- **Définition 10.** Les contraintes sont les limitations imposées par la nature (lois physiques) ou l'opérateur.

- **Définition 11.** 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 12.** La Perturbation est une entrée inconnue et non contrôlée agissant sur un système [6], [7].

I.2.2 Classification des défauts

Du point de vue de la surveillance, les défauts peuvent être classés selon leurs origines en Figure I-1:

- **Défauts capteur :** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On classe ces défauts en fonction de leur type en : biais, dérive, modification du gain de mesure, valeurs aberrantes, blocage du capteur à une valeur atteinte ou à une coupure électrique du capteur.
- **Défauts d'actionneurs :** Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie (la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).
- **Défauts du processus physique :** Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, bouchage partielle d'une conduite, ..).
- **Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande.** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

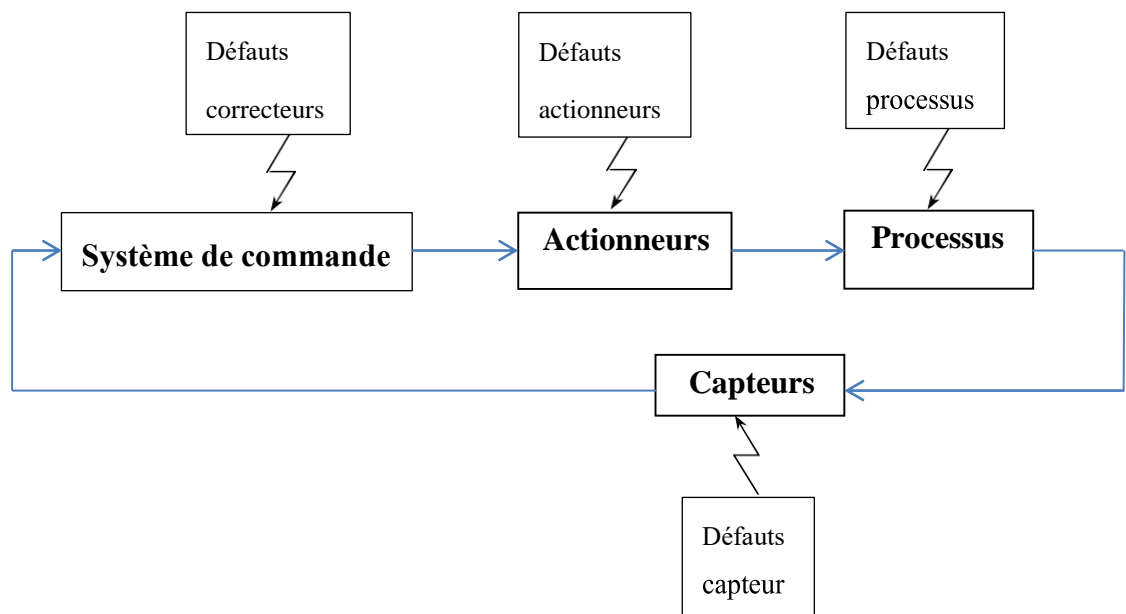


Figure I-1– Types de défaillances affectant un système physique.

I.2.3 Modes de fonctionnement des systèmes

Un système possède généralement plusieurs modes de fonctionnement. Ces modes correspondent au fait que la mission, pour laquelle le système a été conçu, est totalement, partiellement ou pas du tout remplie. Ceci permet de classer les modes de fonctionnement de la façon suivante [8]:

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

I.2.4 But, fonctions et conception des systèmes de surveillance :

I.2.4.1 But de la surveillance

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

A partir d'une base de données brutes, qui est l'ensemble des données disponibles aux opérateurs (mesures, algorithmes de commande, algorithmes de décision, ... etc.), on peut créer pour la surveillance une base de données validées (données brutes si la cohérence prouvée, estimées sinon) et une base de données enrichies qui nous donne les informations sur les incohérences (Figure I-2).

I.2.4.2 Fonctions de la surveillance

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

La surveillance consiste à réaliser les tâches suivantes :

1. **Détection du défaut** : consiste à indiquer la présence d'un défaut par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal.
2. **Localisation du défaut** : consiste à localiser l'élément défectueux (capteurs, actionneurs, composants de processus, ... etc.) par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous certaines hypothèses de défaillance.
3. **Diagnostic ou identification du défaut** : correspond à déterminer son amplitude, son comportement temporel, l'instant d'apparition, ...etc. Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test sur le processus [6], donc le problème de diagnostic consiste à résoudre le problème inverse de la relation de cause à effet connaissant principalement l'effet par ses symptômes observables (signatures vibratoires, acoustiques, thermiques, magnétiques, électriques, radiographiques, ... etc.).

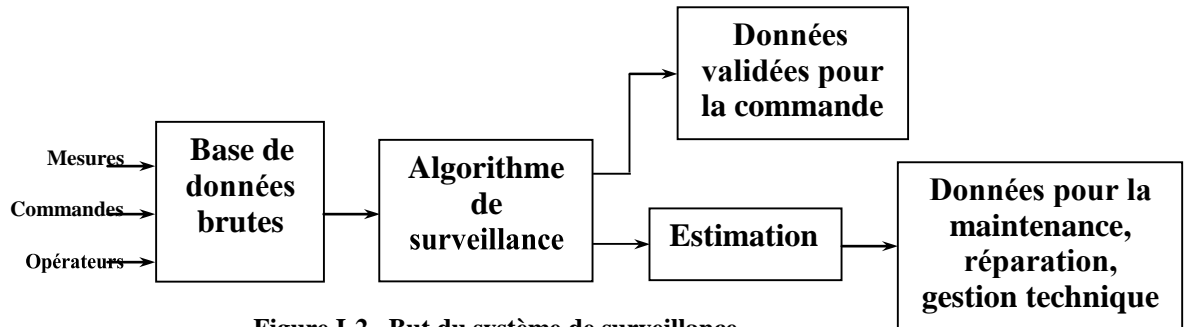


Figure I-2– But du système de surveillance

En résumé, on peut dire que le système de surveillance suit les étapes suivantes

[9](Figure I.3) :

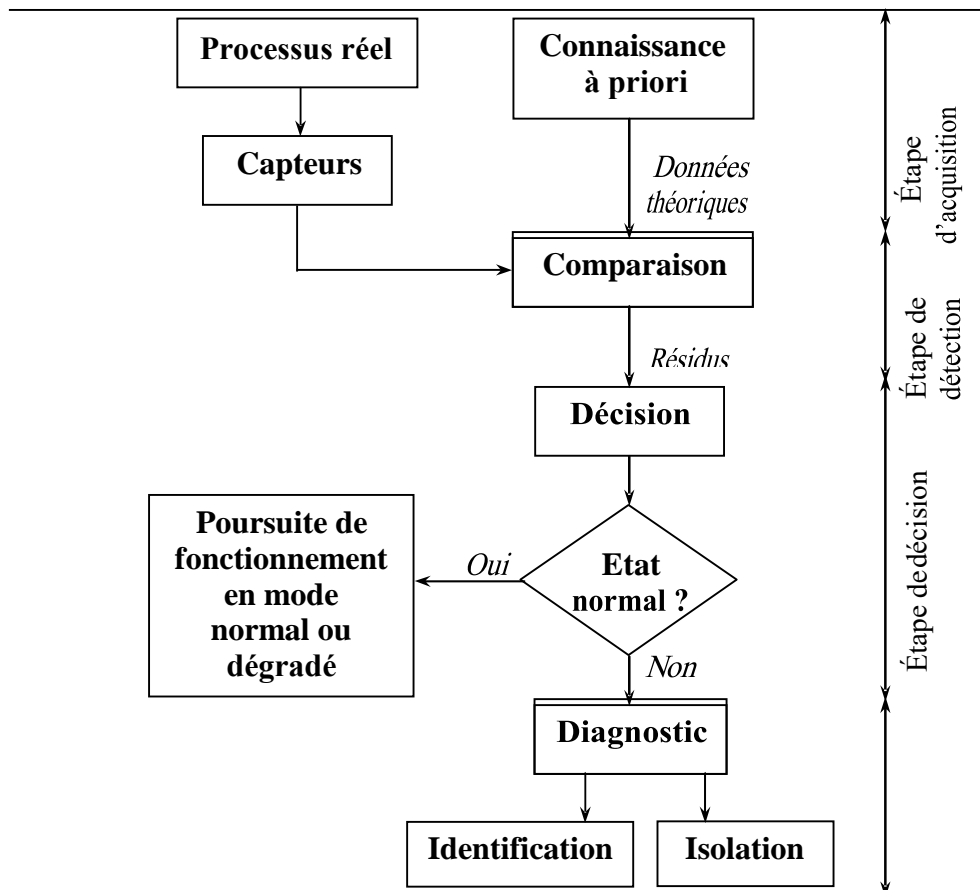


Figure I-3– Les étapes de surveillance

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

- **Etape de détection.** On surveille le fonctionnement réel en testant la cohérence entre ce modèle et les observations. Si celles-ci ne vérifient pas les équations du modèle, on en déduit que le fonctionnement réel n'est pas le fonctionnement normal. Ces changements sont alors détectés et traduits en termes de symptômes ou d'événements. On produit alors une alarme ou résidu.
- **Décision.** La procédure de décision conduit à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Si le défaut est conditionnellement tolérable (une pompe est défaillante mais il est possible d'utiliser une autre pompe installée en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée.
- **Etape de diagnostic.** Dans cette phase, un (ou plusieurs) modèle(s) de mauvais fonctionnement est (sont) utilisé (s) selon le même principe pour déterminer la (les) défaillance(s) présente(s). C'est l'étape de localisation des défaillances. Cette étape se déclenche quand la comparaison ne correspond pas à un état normal de fonctionnement caractérisé par un état de référence et que la procédure de décision a indiqué que c'est une vraie alarme. Lorsque la faute est localisée, il faut alors identifier les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements. Le système de surveillance produit également un enrichissement de ces données en générant d'autres données, qui caractérisent l'état de fonctionnement du processus (détection, localisation et diagnostic des défaillances), et qui sont utilisées pour la maintenance, la réparation, la gestion technique. Les opérations de maintenance permettent de reconstituer et restaurer les capacités du système de production. Les prestations de maintenance peuvent être systématiques (identifiées et prévues dans le temps), ou aléatoires. Dans ce dernier cas, les méthodes d'optimisation et d'ordonnancement fournissent des outils d'aide aux opérations de maintenance (planification des entretiens, calcul des taux de défaillance etc...) [6], [7].

I.2.4.3 Conception d'un système de surveillance

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

1. **Définition des objectifs :** Le cahier des charges de la surveillance doit préciser les composants et les défaillances associées qui doivent être détecter et /ou localiser. On peut les formaliser sous forme :
 - d'une liste des paramètres à surveiller.
 - des données sur les écarts non admissibles.
2. **Définition des critères de qualité :** Le cahier des charges fixe les critères de qualité concernant la détection, la localisation et le diagnostic. On peut résumer ces critères en :
 - Sensibilité aux défauts (les non détections des défauts à faible amplitude) .
 - Rapidité de détection (meilleur délai de détection) .
 - Robustesse (limiter voir ignorer les fausses alarmes dues aux entrées perturbatrices) .
 - Techniques de localisation des défauts à faible amplitude ou les défauts affectant plusieurs variables du système.
3. **Définition des contraintes :** Le cahier des charges doit préciser l'ensemble des contraintes faces au système de surveillance, parmi eux, on distingue :
 - la base de données disponible (brutes, incomplètes, ...) .
 - le coût, la maintenabilité, la complexité, ... etc. du système de surveillance.

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

I.2.5 Classification des méthodes de surveillance :

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

Les méthodes de surveillance et de diagnostic se répartissent en deux grandes classes selon que l'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. Dans le premier cas, différents types de fonctionnement sont décrits par des modèles de comportement, alors que dans le deuxième cas, les différents types de fonctionnement sont décrits par les données de certains nombres de points expérimentaux. Une classification globale est donnée par la (Figure I.4).

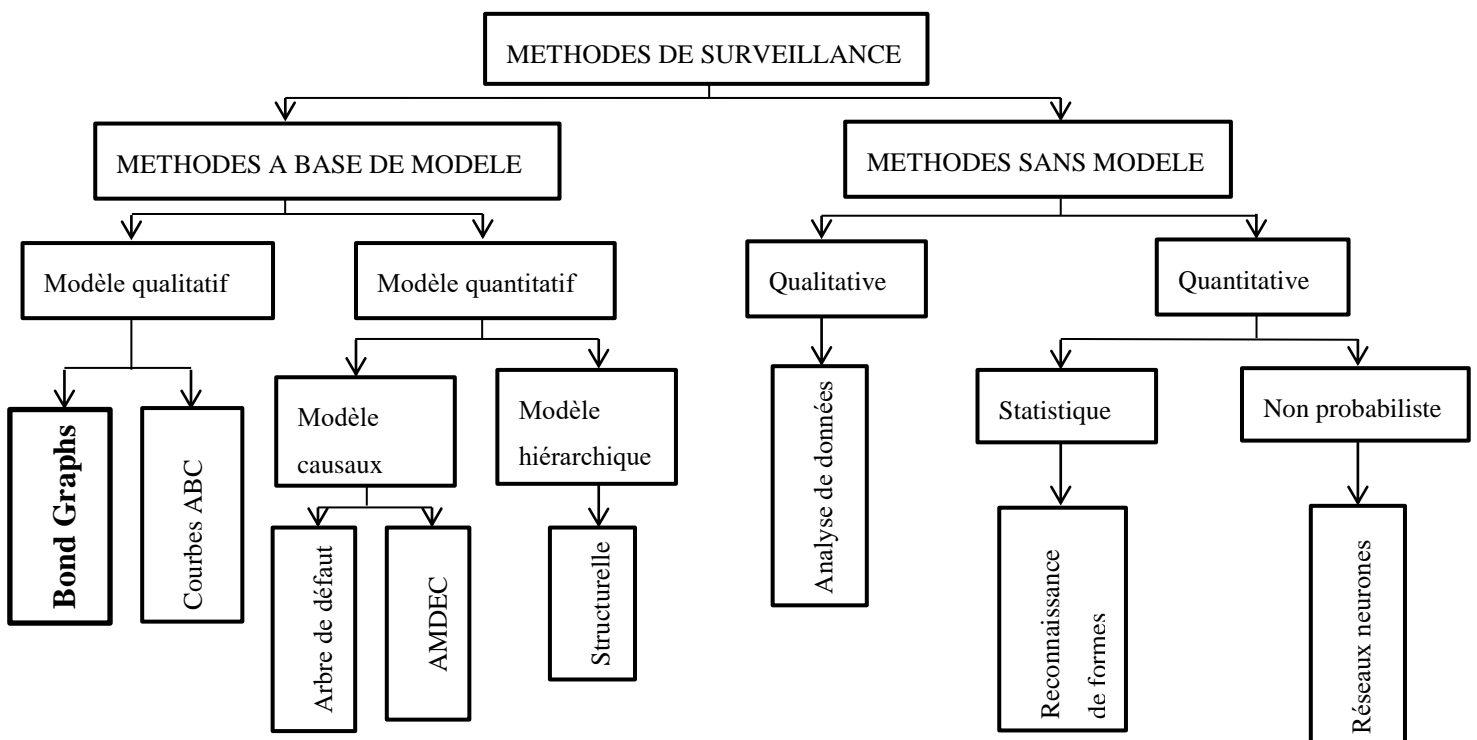


Figure I-4- Classification des méthodes de surveillance : arbre de défaillance

I.2.5.1 Méthodes à base de modèle

La détection de défaut basée sur l'utilisation des modèles peut être organisée en deux étapes : la génération des résidus et la prise de décision. La génération des résidus s'effectue en comparant les données brutes aux données délivrées par les modèles (Figure I.3). Dans

cette étape on distingue trois grandes classes fondées respectivement sur l'estimation paramétrique [10], l'estimation d'état ou de sortie -Observateurs de Luenberger ou Filtres de Kalman linéaires et non linéaires- [7] et le principe de la redondance qui peuvent être physiques (utilisation de plusieurs capteurs pour la mesure d'une même variable) ou analytique [11].

Ils existent d'autres méthodes à base de modèle qui utilisent l'approche structurelle tels que : le bond graph, l'analyse structurelle [8], la modélisation fonctionnelle et matérielle (arbre fonctionnel, arbre de défaillance, ... etc.) [6], la théorie des graphes simples et signés [12]. Seules les méthodes par bond graphs seront développées par la suite.

I.2.5.1.1 Modèles hiérarchiques

Dans ce cas, on décrit le processus de diagnostic par une approche fonctionnelle présentée sous forme d'une décomposition structurelle. La modélisation fonctionnelle [13], [14], [15] comme l'indique son nom se base sur la fonction du composant (i.e. stocker pour la fonction d'un réservoir,...). La modélisation téléologique, quant à elle, exprime la finalité du composant (la fonction téléologique d'une chaudière est la production de la vapeur).

Cette fonction sert un dessein, un projet, un but. Un réservoir peut avoir plusieurs fonctions téléologiques (en fonction de son utilisation et de l'interprétation de l'opérateur), par contre le type de transformation de l'énergie est indépendante de sa fonction. Cette démarche entraîne une ambiguïté en raison de la subjectivité de la notion de fonction : il existe autant de fonctions que d'opérateurs.

Toutefois quelques travaux [14], associent des fonctions génériques issues

des bond-graphs afin de rendre la fonction plus objectives en introduisant les notions d'effort et de flux et les éléments bond graphs (R, C et I). Les modèles externes trouvent aussi un intérêt dans cette approche [15].

I.2.5.1.2 Modèles Quantitatifs

- **Bond graph :**

L’outil bond graph est un langage graphique unifié pour tous les domaines des sciences de l’ingénieur et confirmé comme une approche structurée de la modélisation et de la simulation des systèmes pluridisciplinaires.

La modélisation d’un système technique par bond graph ne nécessite pas l’écriture de lois générales de conservation.

Elle repose essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d’échanges d’énergie au sein du système.

L’industrie automobile française est en pointe dans l’utilisation des bond graphs dans leur démarche mécatronique.

I.2.5.1.3 Modèles qualitatifs

- **AMDEC :**

La réalisation d'une AMDEC est recommandée aux entreprises qui souhaitent obtenir une norme ou une certification.

La méthode AMDEC est l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité. L'AMDEC est un outil utilisé dans la démarche qualité et dans le cadre de la sûreté de fonctionnement.

L'AMDEC consiste à analyser :

- les défaillances,
- leurs causes,
- leurs effets.

L'AMDEC est réalisée grâce à des contrôles :

- de différents points de la chaîne de production,

- du produit ou du service fini.

- **L'arbre de défaillances :**

L'arbre de défaillances est une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé événement redouté. Le point de départ de la construction de l'arbre est l'événement redouté lui-même (également appelé événement sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifié. À partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'événements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs événements du niveau inférieur. La démarche est la suivante : pour chaque événement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des événements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les événements des différents niveaux [16].

Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des événements en combinaisons d'événements de niveau inférieur, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de la probabilité d'occurrence de l'événement analysé. Ces événements non décomposés de l'arbre sont appelés événements élémentaires (ou événements de base).

- **Courbe ABC :**

L'analyse ABC est un prolongement de l'analyse de Pareto puisqu'elle effectue une répartition des phénomènes observés en trois classes : une classe A qui comprend 30 % des causes, une classe B qui comprend les 30 % suivants et une classe C qui comprend les 40 % restants.

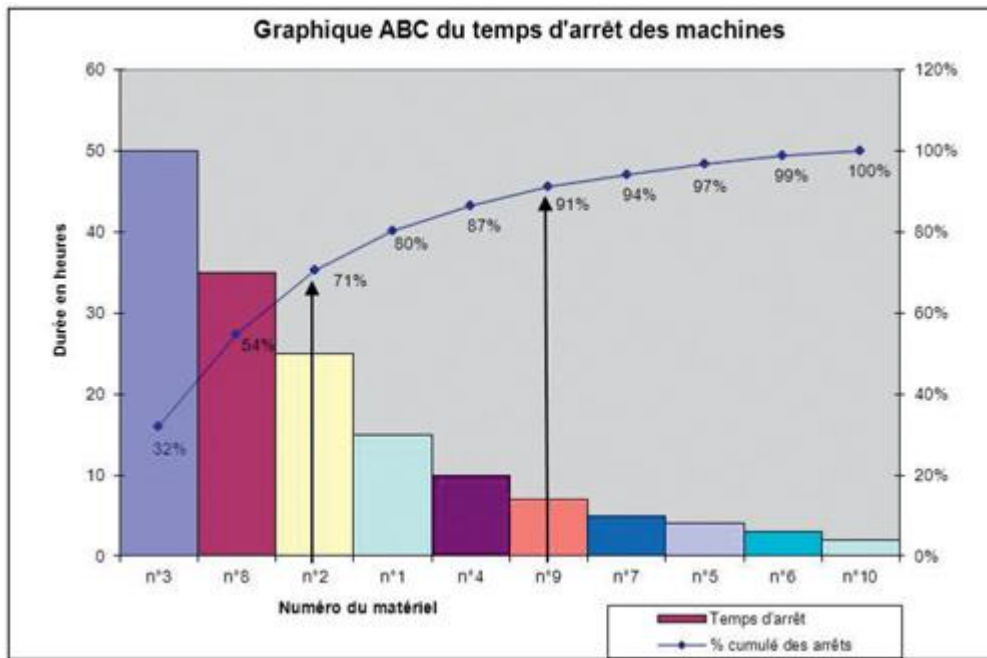


Figure I-5–Courbe ABC

Dans l'exemple ci-dessus, on peut constater que 30 % des matériels cumulent 71 % des temps d'arrêt : il serait sans doute nécessaire d'exercer une maintenance préventive sur ces matériels.

Cette analyse est utilisée, par exemple, dans le domaine industriel pour prendre des décisions en matière de maintenance, dans le domaine de la gestion des stocks pour établir une rotation optimale des stocks, dans le domaine de la vente pour gérer au mieux les flux de marchandises.

I.3 Conclusion

L'objectif de la première section de ce chapitre de donner un aperçu des techniques habituellement utilisées pour résoudre des problématiques de surveillance.

La surveillance d'un système se fait au travers de deux fonctions de base : la détection et le diagnostic des défaillances. La détection des défaillances a pour rôle de signaler toute situation autre qu'une situation nominale. En d'autres termes, tout ce qui n'est pas normal doit être classé comme anormal.

C'est alors que la fonction diagnostic doit localiser l'organe défaillant et identifier les causes ayant provoqué ces situations de défaillance. Cette opération est souvent menée par un expert et dans certains cas exige des connaissances poussées sur le système.

Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle.

La surveillance à base de modèle offre des outils totalement découplé de la structure du système, permettant un suivi temps réel de l'évolution de celui-ci. Le raisonnement en ligne fait que l'approche de surveillance à base de modèle est plus robuste à des changements de modes opératoires comme pour les systèmes ayant plusieurs configurations. Elle est donc évolutive.

Chapitre II. Approche Bond Graph.

Chapitre II. Approche Bond Graph.

II.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 [17], formalisé par D.Kannopp et R.Rosenberg [18] et [19] thème [20] est arrivé en Europe à la fin des années 1970 par les Pays-Bas (université de Twente) et la France (société Alstom), utilisé dans l'industrie par différentes sociétés telles que : PAS ,EDF ,THOMSON,REUNAUT,AIRBUS, FORD, TOYOTA, GM,NASA et bien d'autre et aussi dans les universités :ECLLAGIS Lille ,INSA Toulouse et Lyon(GEGELY , LAI , LGMT), universités Lyon 1 ESE Rems, université Mulhouse, ENSEEIHT-LEET Toulouse,...[21].

De nos jours, cette approche est très utilisée dans la conception des systèmes et l'étude physique et de commande, elle est appliquée à 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.

II.2 Eléments bond graph

La méthodologie bond sur deux grands principes : la représentation graphique des échanges de puissance au sein d'un système et l'analogie entre deux éléments A et B d'un système est représenté comme indique Figure II.1 par une demi flèche (appelée « lien » ou « bond ») qui porte deux variables dites « variables de puissance », dont le produit $e \cdot f$ représente la puissance instantanée transportée par ce lien [22].

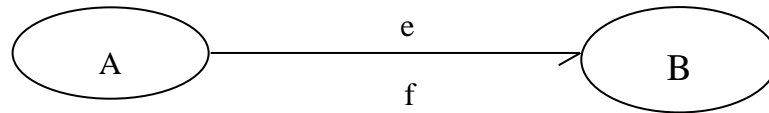


Figure II-1 – Représentation d’un élément bond graph

Deux autres variables généralisées, les variables d’énergie, sont définies comme l’intégrale par rapport au temps des variables de puissance et sont appelées « moment généralisé » et « déplacement généralisé » et notées respectivement p et q.

Dans certains cas, il peut être plus simple, en termes d’équations à résoudre ou de tables de données à manipuler, de choisir des variables d’effort et de flux dont le produit n’est pas une puissance, le modèle obtenu sera dit « pseudo-bond graph ».

La table 1 regroupe la correspondance de ces quatre variables dans quelques domaines physiques.

Pour représenter tous les phénomènes d’apport de puissance et de transformation de la puissance fournie en énergie stockée ou dissipée ,9 éléments bond graphs (plus deux détecteurs qui représentant des capteurs d’effort et de flux supposés idéaux, donc non consommateurs de puissance) sont définis et représentés Figure II.2

Tableau II-1– variables généralisées

Domaine	Vrai bond graph e. f = puissance		Pseudo bond graph e. f ≠ puissance		Moment généralisé $p = \int e(t)dt$	Déplacement généralisé $q = \int f(t)dt$
	Effort e	Flux f	Effort e	Flux f		
Mécanique Translation Rotation	Force Couple	Vitesse vitesse angulaire			moment moment angulaire	déplacement angle
Electrique	tension	courant			flux magnétique	charge
Hydraulique	pression	débit volumique	pression	débit massique	moment de pression	Volume masse
Chimique	potentiel chimique	flux molaire	concentration	flux molaire		nombre de moles
Thermodynamique	température	flux d’entropie	Enthalpie spécifique	Flux d’enthalpie Flux de chaleur		Entropie Enthalpie, quantité de chaleur

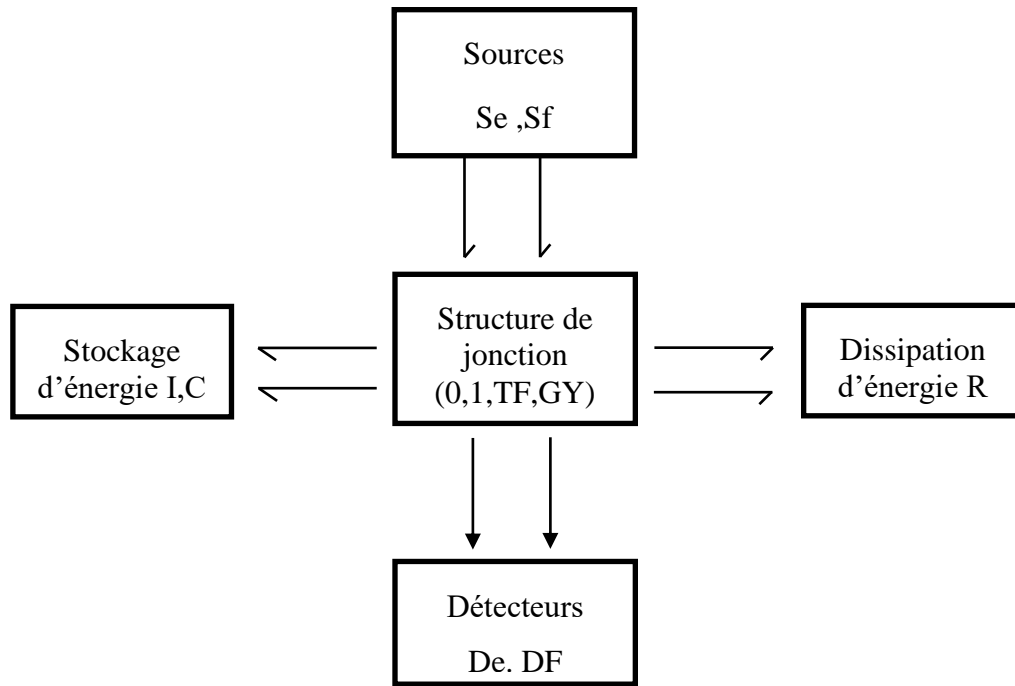


Figure II-2– Élément du langage bond

II.2.1 Éléments passifs

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

II.2.1.1 Résistance 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 forme :-

$$\Phi_R(e ; f)=0 \quad \text{II-1}$$

la loi d'Ohm ($U=Ri$) en électricité, ou de Bernoulli ($P=K_D V^2$) en hydraulique, ou de Fourier en thermique ($\Delta T = Kc Q$).

Les représentations graphiques sont données par la Figure II.3 suivante :

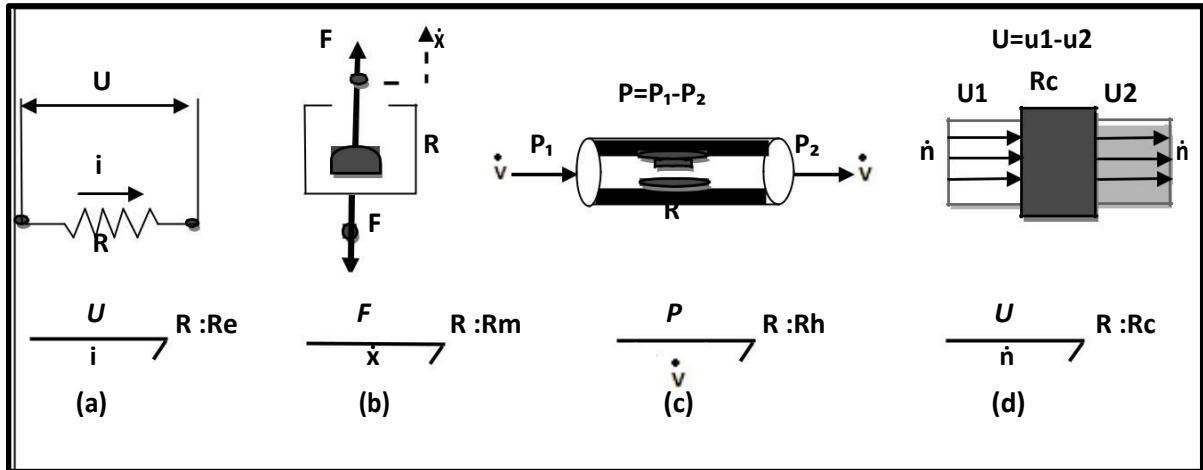


Figure II-3 – Représentation graphique de l'élément R

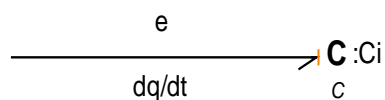
II.2.1.2 Capacité C :

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 :-

$$\Phi_c(e ; q)=0 \quad \text{II-2}$$

$$\text{Ou } \Phi_c(e, \int f(\tau)d\tau)=0 \quad \text{II-3}$$

La représentation générale est la suivante :



Les représentations graphiques sont données par la Figure II.4 suivante :

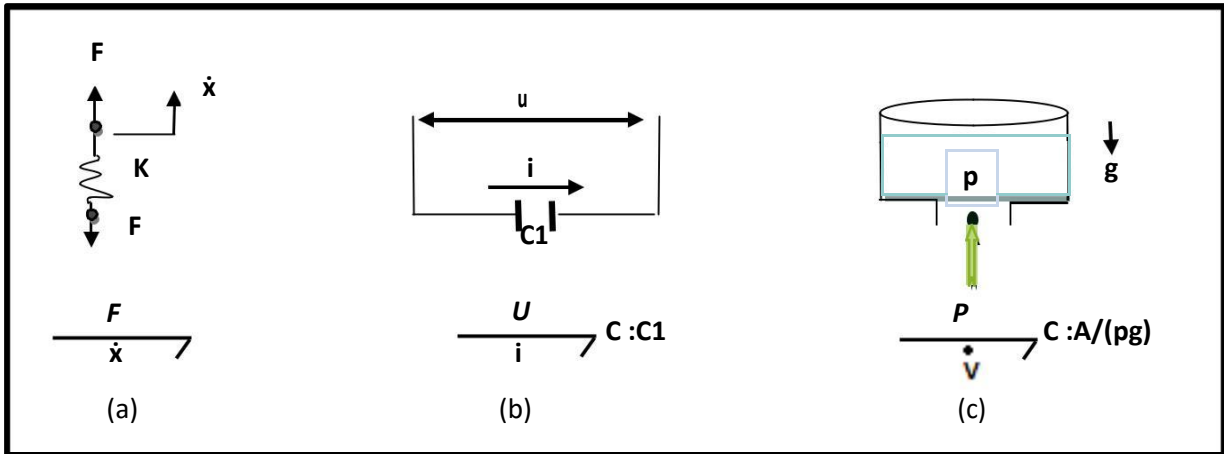


Figure II-4– Représentation graphique de l'élément C.

II.2.1.3 Inertie I :

Modélise tout phénomène d'inertie liant le flux à l'impulsion. L est un élément de stockage d'énergie, exemple : masse en translation, inductance, inertance d'un liquide, La relation est de la forme :-

$$\phi_I(p; f) = 0 \quad \text{II-4}$$

$$\text{Ou } \phi_I(f, \int e(\tau) d\tau) = 0 \quad \text{II-5}$$

Les représentations graphiques sont données par la Figure II.5 suivante :

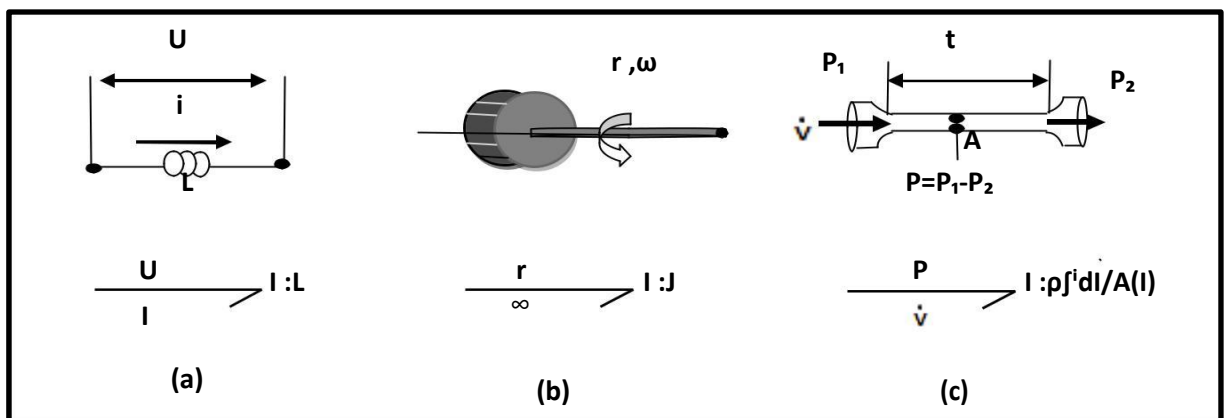


Figure II-5– Représentation graphique de l'élément « I ».

Les éléments I et C sont tous les deux associés à un stockage d'énergie. Mais contrairement à C, dans l'élément I, L'énergie ne se conserve pas lorsque la variable du flux disparaît : L'énergie est stockée grâce à la dynamique du système.

II.2.2 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 II.6 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.) [23]

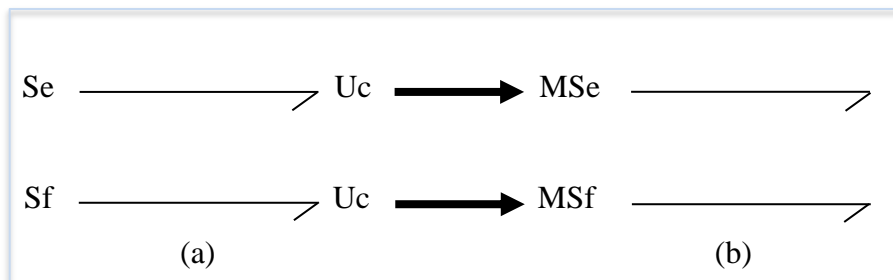


Figure II-6-Éléments actifs.(a): Sources d'effort et de flux. (b): Sources

II.2.2.1 Élément de jonction

Ils servent à coupler les éléments R, C et I et composent la structure du modèle. Ils sont conservatifs de puissance.

II.2.2.1.1 I.2.3.1 Jonction 0

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, même pression). La jonction et la loi constitutive est donnée par la figure-II.7.

$$e_1=e_2=\dots e_n \quad \text{II-6}$$

$$f_1+f_2+ \dots f_n =0 \quad \text{II-7}$$

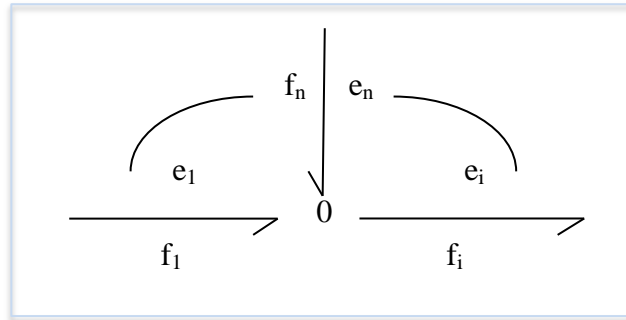


Figure II-7–jonction parallèle ou jonction 0

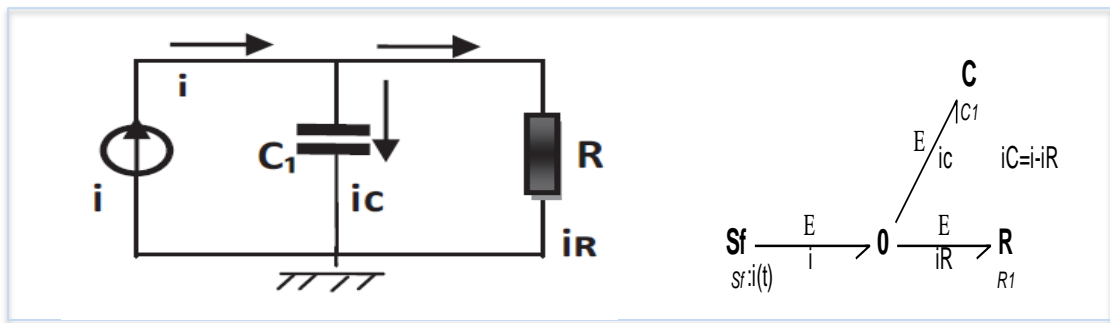


Figure II-8– Jonction « 0 » système électrique

II.2.2.1.2 Jonction 1 :

Elle associe les éléments soumis à un même flux et correspond à des éléments en parallèle Figure II.9 .elle représente des éléments en parallèle en mécanique (même vitesse) et en série en électricité et en hydraulique (même courant ou même débit volumique).

Dans les deux jonctions, nous avons une conservation de puissance qui est exprimée par le bilan des puissances ;

$$f_1=f_2=\dots f_n \quad \text{II-8}$$

$$e_1+e_2+\dots e_n=0 \quad \text{II-9}$$

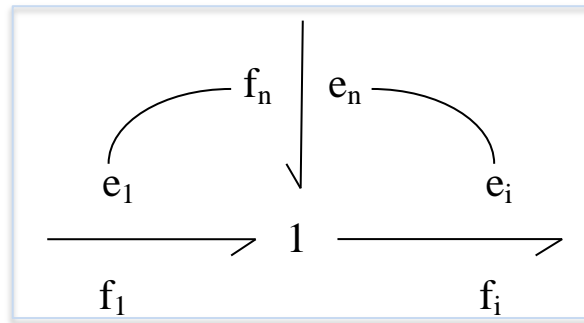


Figure II-9–Jonction série ou jonction 1

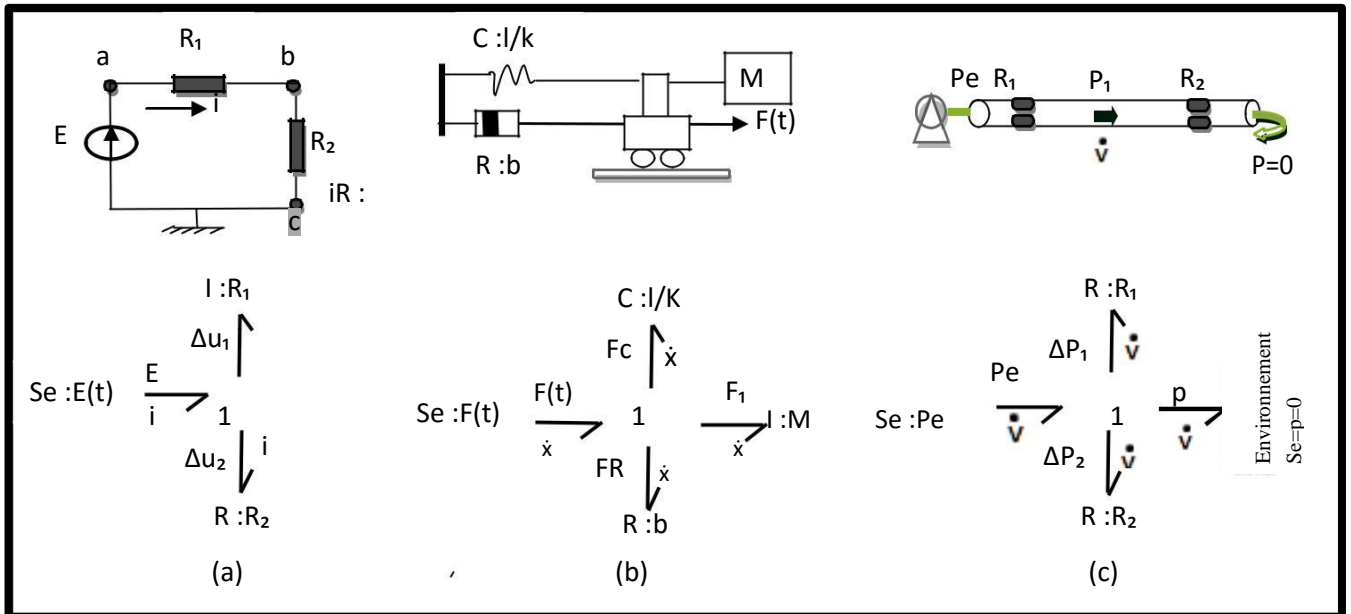


Figure II-10–Jonction « 1 ». (a): Système mécanique. (b): Système électrique. (c): Système hydraulique.

II.2.3 Les détecteurs

Les détecteurs, appelés aussi les sources d'information, sont utilisées pour représenter l'architecture de mesure du système. Ils sont représentés sur le modèle BG par des flèches (figure(II.11)) au lieu de liens de puissance puisque il n'y a pas de transfert de puissance mais un transfert d'information.

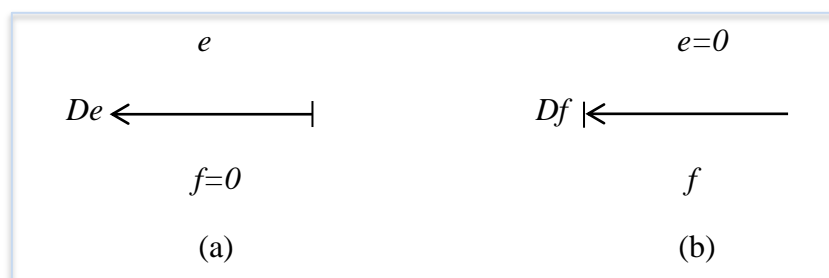


Figure II-11–les différents détecteurs (a) :d'effort,(b) :de flux

Comme précédemment mentionné, les éléments connectés à la jonction 1 partagent le même flux, dans ce cas, un détecteur de flux, noté par D_f est utilisé pour mesurer ce flux Figure II.11(b).

Ce dernier est utilisé pour représenter un capteur de courant, de vitesse,Etc. les éléments connectés à la jonction 0 partagent le même effort, pour le mesurer, un détecteur d'effort est utilisé. il est noté par D_e de Figure II.11(a). ce dernier est utilisé pour représenter un capteur de tension, de pression, ... etc.

II.2.4 Elements bond graph a 2 ports

II.2.4.1 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 une base de levier Figure II 12.

Si le module « m » n'est pas constant, le transformateur est dit module et est noté pas « mTF », la variable « m » peut alors être continue ou booléenne(0,1).

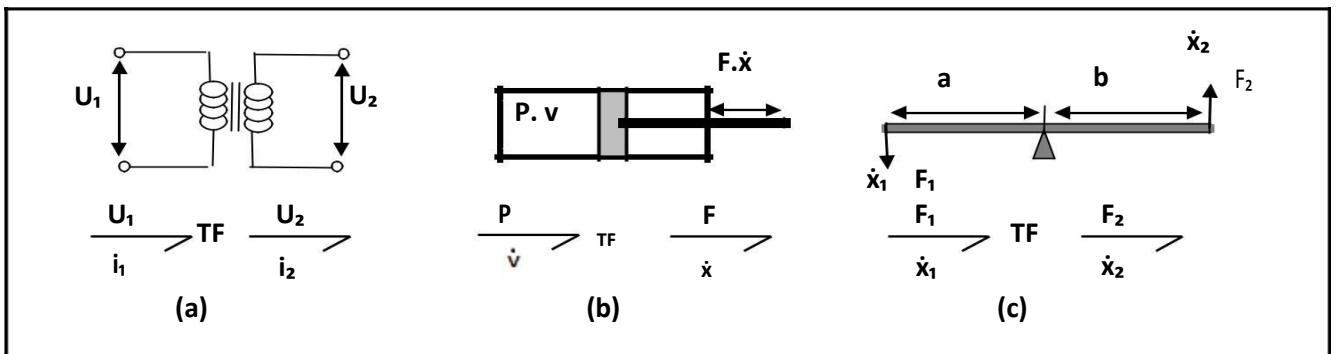


Figure II-12–Elément TF. (a): Transformateur électrique.(b) : Piston hydraulique.(c) : Levier

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 :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2 \quad \text{II-10}$$

Sa représentation par bond graph est

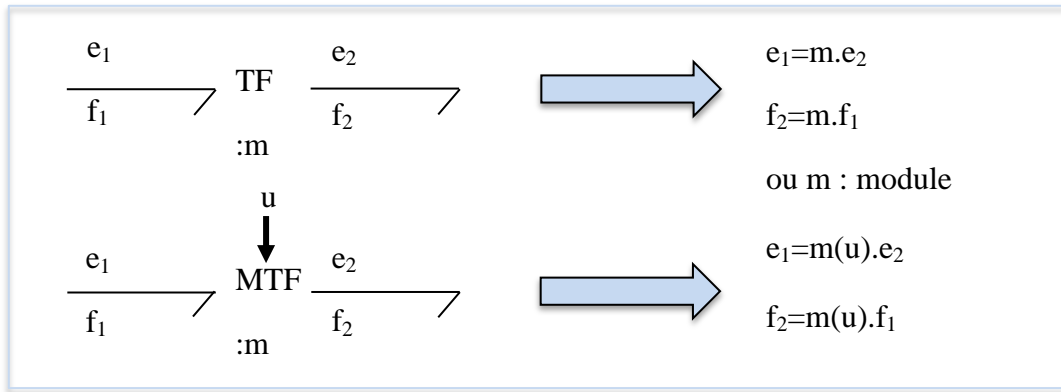


Figure II-13–Représentation par bond graph de Transformateur TF

II.2.4.2 Gyrateur GY

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

$$e_1 f_2 = e_2 f_1 \quad \text{II-11}$$

Sa représentation par bond graph et comme suit :

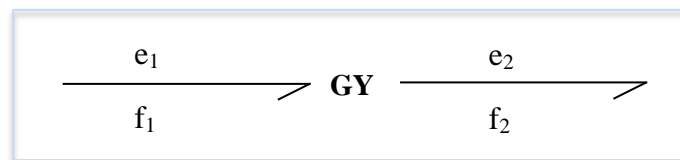


Figure II-14–Représentation par bond graph de Gyrateur GY

r : est appelé le rapport du gyrateur.

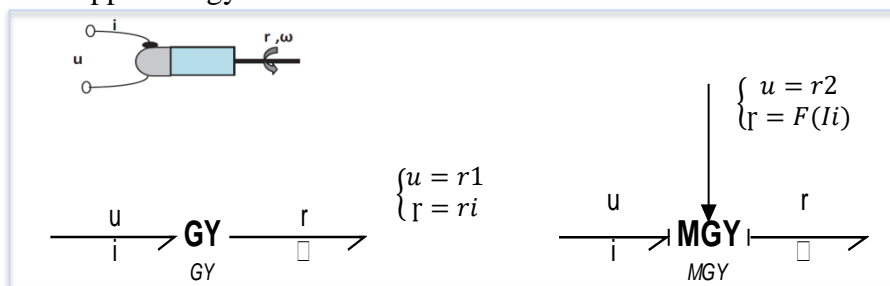


Figure II-15–(a) : Gyrateur. (b) : Gyrateur modulé.

II.2.5 Eléments bond graph multiports

Les éléments bond graph R, C et I présentes plus hauts sont à un port, et les lois constitutives sont scalaires. Dans plusieurs cas, les lois mises en œuvre sont vectorielles on utilise alors dans ce cas les éléments multiports.

II.2.5.1 Multiport C

Le multiport C, appelé aussi champ C est associé à un système de stockage d'énergie pour lequel l'expression de l'énergie stockée est une fonction de plusieurs variable de déplacement. Il est représenté comme sur la Figure II 16.

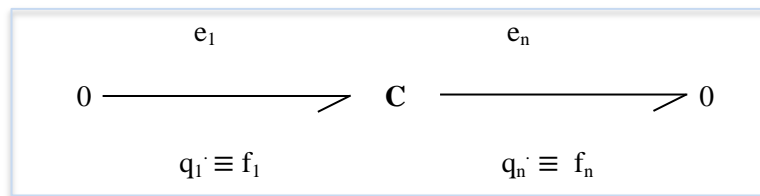


Figure II-16–Multiport C

II.2.5.2 Multiport I

La multiport I est analogue au multiport capacitif C. il est représenté comme sur la Figure II 17.

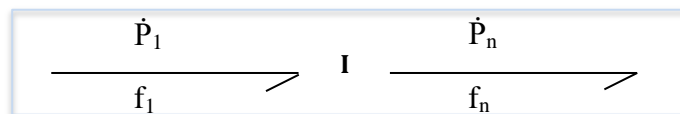


Figure II-17–Multiport I

II.2.5.3 Multiport mixte IC

Lorsque le système de stockage d'énergie ne peut être décrit comme un multiport C ou I, car il est composé de n ports formant un champ C et m ports formant un champ I, il est dit mixte Figure II 18.

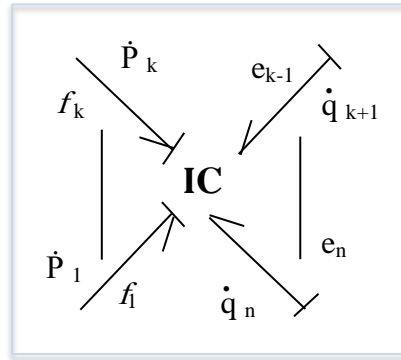


Figure II-18–Multiport mixte IC

II.2.5.4 Multiport R

Le champ résistif R Figure II 19 est un multiport dont la loi générique est une fonction statique (ou algébrique) liant n efforts et n flux sans stockage d'énergie. la loi constitutive peut être linéaire (loi d'ohm) ou non linéaire (restriction hydraulique) et est écrite sous forme résistance Figure II 19 (a).

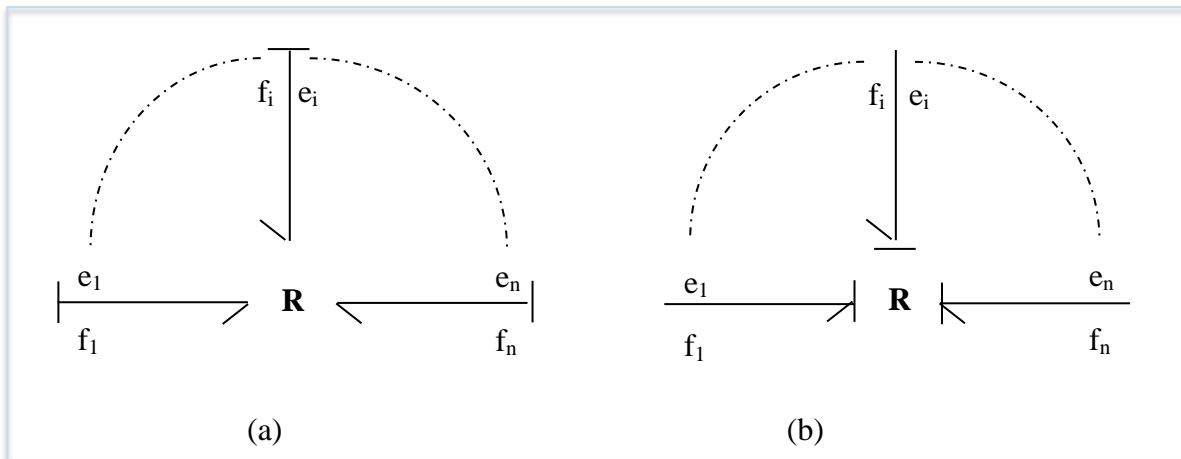


Figure II-19–Multiport R

$$e_i = \Phi_{Ri}(f_1, \dots, f_n); i = 1; 2, \dots, n$$

II-12

Ou conductance Figure II 19(b),

$$f_i = \Phi_i(e_1, \dots, e_n)$$

II-13

II.2.5.5 Multiport RS

L'élément RS Figure II 20 (a) modélise tout type de résistance qui génère de la chaleur. Cette structure conserve la puissance et est irréversible. Dans le cas d'un multiport, la représentation est donnée par la Figure II 20 (b).

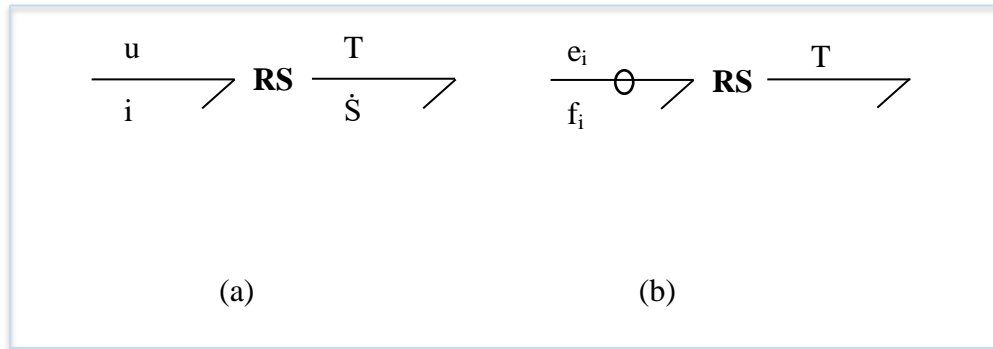


Figure II-20–Multiport RS

II.2.6 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 donnée dans un graphe signifie que, ou la variable d'effort, ou la variable de flux sur ce bond de connue. Dans l'approche graphique, la causalité est représentée par un trait causal qui par convention, indique le sens ou lequel l'effort est dirigé sur le bond. il est mis perpendiculairement au trait.

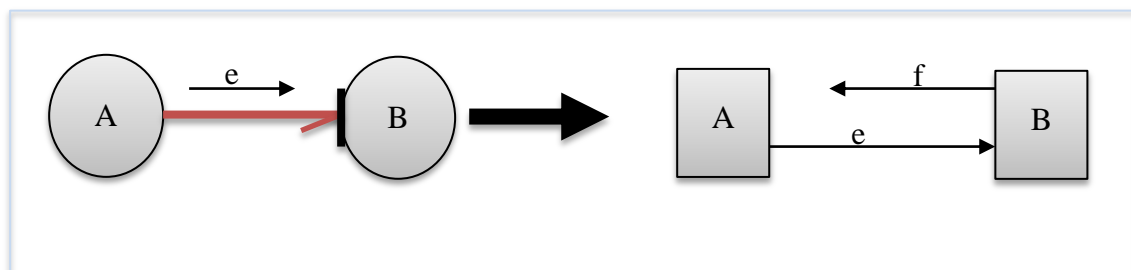


Figure II-21–causalités en bond graph

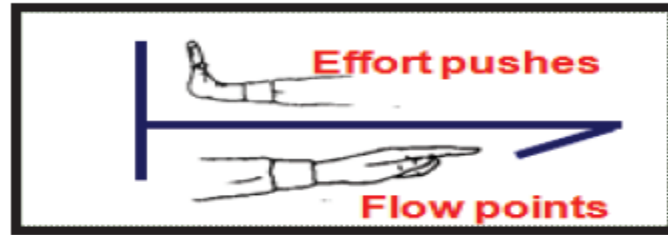


Figure II-22–causalités en bond graph

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).

II.2.6.1 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 II 23 ci-dessous montre les positions possibles du trait causal par rapport aux éléments de jonctions, des sources et des dissipateurs.

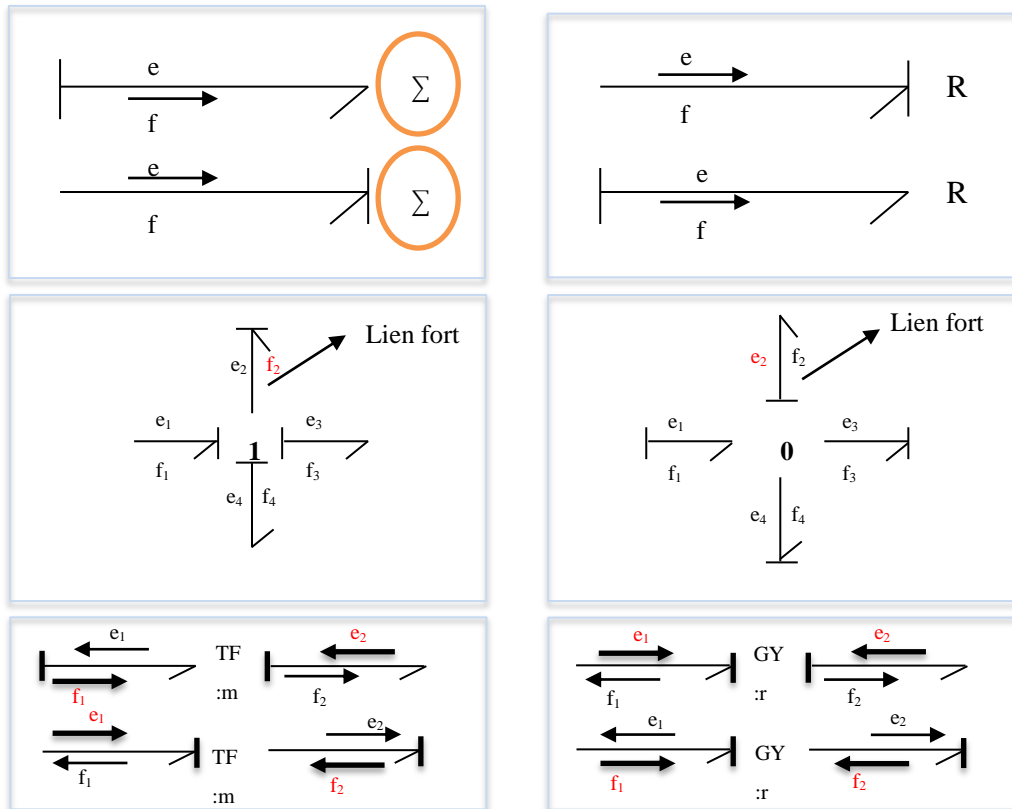


Figure II-23—causalités de bond graph

II.2.6.2 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, TF, 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. Quelque fois, on est contraint d'ajouter des éléments « C » ou « I » (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale [24].

Tableau II-2–Causalité des éléments bond graph.[25]

Règles de causalités de différents éléments de bond graph				
Élément	Symboles	Equation causale	Bloc diagramme	Règles
Source d'effort S_e Source de flux S_f	$S_e : e \longrightarrow$ $S_f : f \longleftarrow$	e donner f donner		L'effort(ou flux)imposé par La Source d'effort (ou le flux)est une donnée connue pour le système. Règle : la causalité est obligatoire.
Jonction 0		$e_2=e_1$ $e_3=e_1$ $e_4=e_1$ $f_1=-f_2+f_3-f_4$		Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e1). Règle : un seul trait causal près d la jonction 0.
Jonction 1		$f_2=f_1$ $f_3=f_1$ $f_4=f_1$ $e_1=-e_2+e_3-e_4$		Un seul flux peut donner sa valeur aux autres,(ici f1). Règle : un seul lien sans trait causal près de la jonction 1.
TF		$e_1=me_2$ $f_2=mf_1$ $e_2=\frac{1}{m}e_1$ $f_1=\frac{1}{m}f_2$		Un effort et un flux sont imposés au TF. Règle : un seul trait près de TF.

II.2.7 Chemin causal

Le bond graph est un graph où l'on définit des boucles causales et de chemins 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.

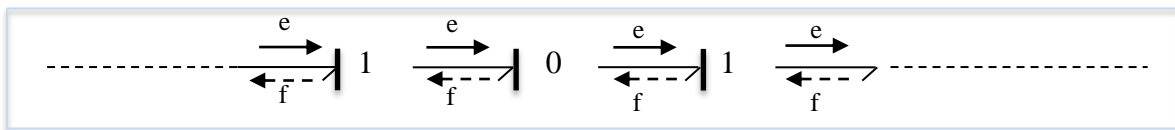


Figure II-24—chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f .

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, ou 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.

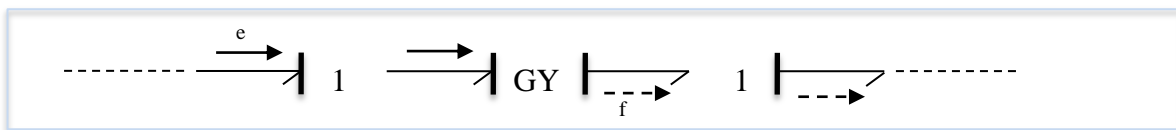


Figure II-25—chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f .

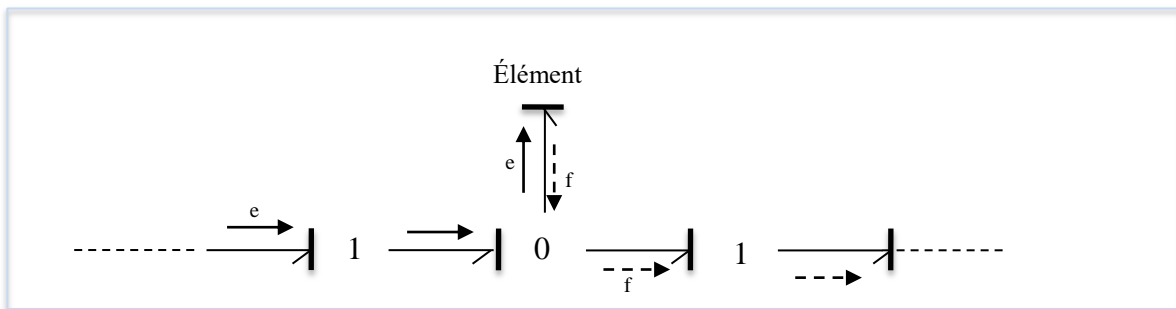


Figure II-26—Chemin causal mixte indirect.

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

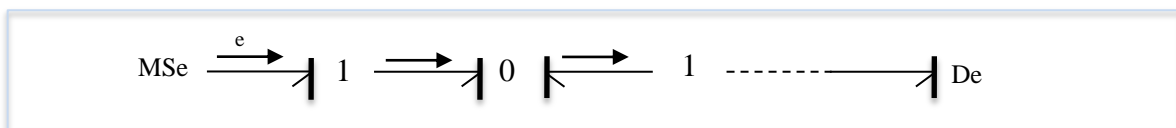


Figure II-27—chaîne d'actions

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.

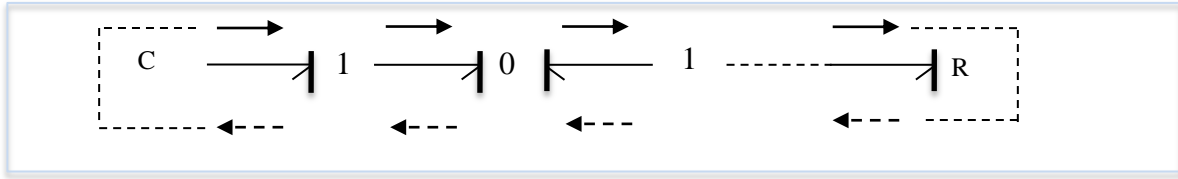


Figure II-28–Boucle causal en suivant l’effort ou le flux

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

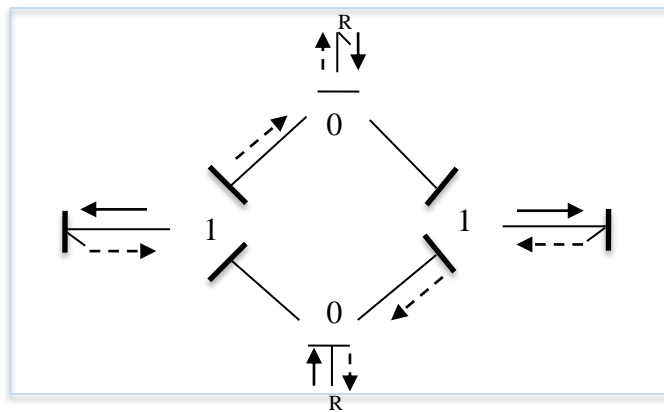


Figure II-29–Maille

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

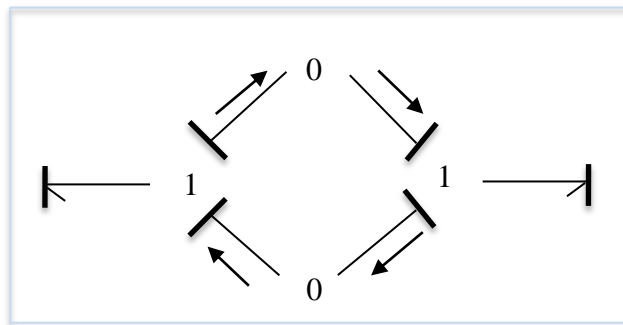


Figure II-30–Boucle causale

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

II.3 Procédures De Construction De Modeles Bond Graph

Des procédures systématiques existent pour construire les modèles bond graphs suivant les domaines physiques [26]. A titre d'exemple, considérons le système multiphysique de la figure (II.28).

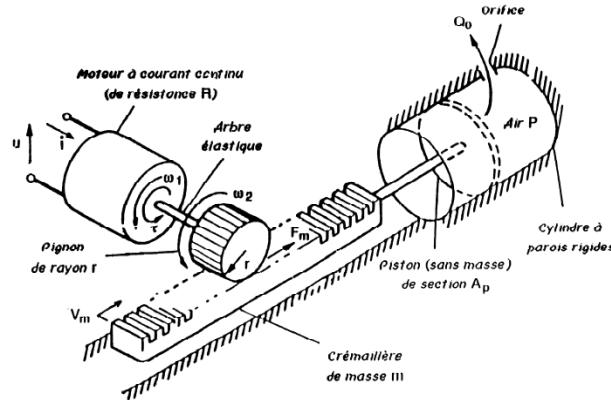


Figure II-31-Exemple

mettant en jeu plusieurs domaines physiques Sa décomposition en bond graph à mots est donnée Figure II 32.

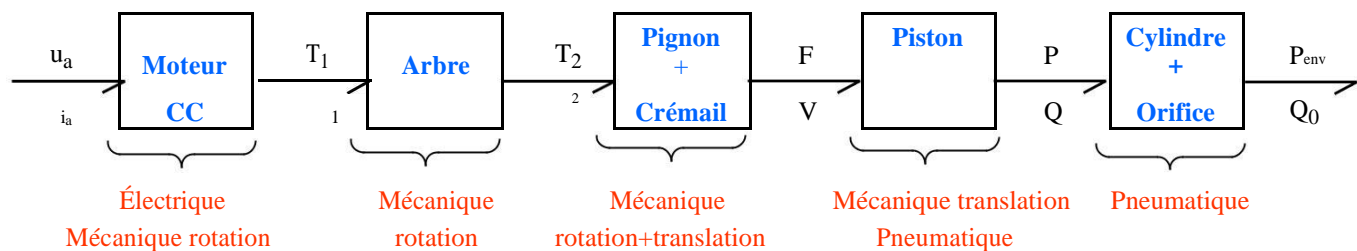


Figure II-32- Bond graph à mots du système physique de la figure

La Figure II 32 montre le schéma physique et le modèle bond graph d'un moteur à courant continu à excitation séparée, prenant en compte les hypothèses retenues pour la modélisation :

-la jonction $1i_a$ sert à associer les phénomènes ou composants physiques considérés pour l'induit (« a »=armature), qui sont parcourus par la courant i_a , soit l'alimentation en tension de l'induit (notée ici MSe « M=modulée »pour indique que c'est l'entrée de commande modulée par un signal de commande), la résistance et l'inductance d'induit

-c'est la même chose pour le circuit d'inducteur (« f »=Field) et la jonction $1i_f$

-la jonction 1ω sert à associer les phénomènes ou composants physiques considérés ou composants physiques considérés pour la partie mécanique qui dépend de la vitesse de

rotation de l'arbre ω , soit le frottement et le moment d'inertie du rotor et de l'arbre, la charge représentée par le couple de charge T_{ch}

- l'élément MGY (« modulated » GY). sert à représenter les relations $u_e = k_c \omega$ et $T_{em} = k_{em} i_a$. Ce changement de domaine physique se fait sans perte de puissance : $u_e i_a = T_{em} \omega$; k_c et k_{em} doivent donc avoir la même valeur numérique, ce qui est représenté par le rapport k (i_f) dont la valeur est modulée par la valeur du courant d'inducteur (flèche de type signal car il y a seulement un échange d'information, mais pas de puissance).

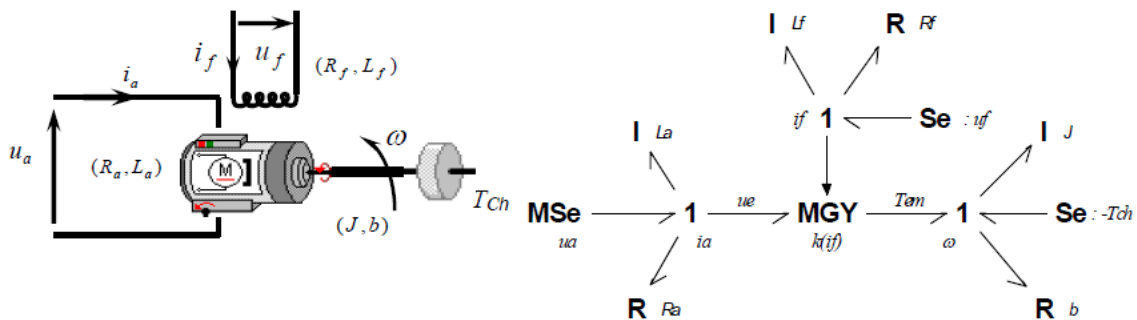


Figure II-33–Moteur CC : schéma physique et bond graph associé

Pour la construction du modèle bond graph du système complet de la Figure II 33, l'arbre est supposé élastique (élément C dont le paramètre est défini comme étant l'inverse de la raideur de l'arbre), le cylindre est représenté par l'élément C : *Ccyl* et les pertes de charge dans l'orifice par l'élément R : *Rorif*. Le modèle du moteur à CC est simplifié en supposant que le courant d'inducteur est constant, d'où le GY de rapport constant k .

L'inertie du pignon et les frottements au niveau de la crémaillère sont supposés négligeables.

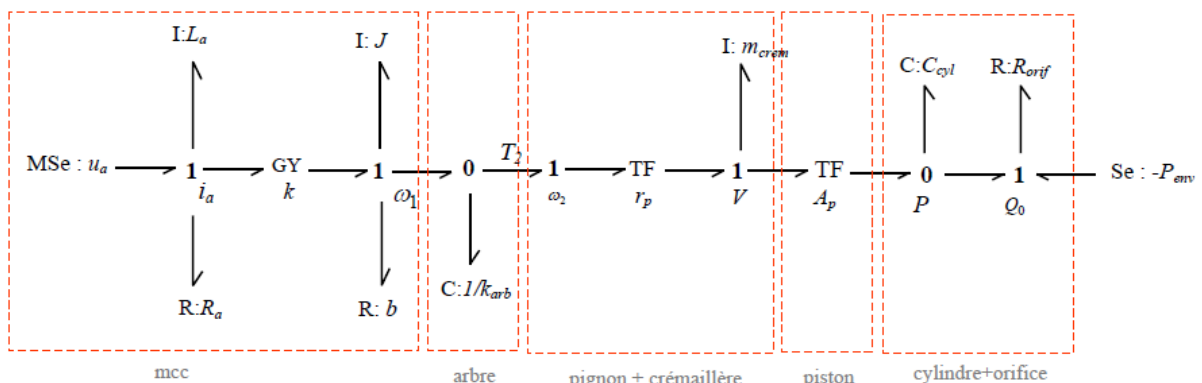


Figure II-34–Bond graph du système physique de la Figure–II.28

II.4 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 :

$$\begin{bmatrix} Y1(s) \\ Y2(s) \\ \dots \\ Yp(s) \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{D(s)} \right) \begin{bmatrix} N11(s) & \dots & N1m(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Np1(s) & \dots & Npm(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U1(s) \\ U2(s) \\ \dots \\ Um(s) \end{bmatrix} \quad \text{II-14}$$

II.4.1 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.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_i Ti(s)Di(s)}{D(s)} \quad \text{II-15}$$

Avec

$$D(s) = 1 - \prod_i Bi + \sum_{i,j} BiBj + \sum_{i,j,k} BiBjBk \dots \quad \text{II-16}$$

II.4.2 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 ».

$$x = \begin{bmatrix} p & 1 \\ q & c \end{bmatrix} \rightarrow \dot{x} = \begin{bmatrix} e & 1 \\ f & c \end{bmatrix} \quad \text{II-17}$$

➤ **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 :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cyx + Duu + Dd \\ z = Cz x + Ruu + Rdd \end{cases} \quad \text{II-18}$$

Cas non linéaire :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, d) \\ y = gy(x, u, d) \\ z = gz(x, u, d) \end{cases} \quad \text{II-19}$$

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.

II.5 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 III. Diagnostic du système par Bond

Graph

Chapitre III. Diagnostic du système par Bond Graph

III.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 Détection & 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 Tolérant 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 III.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 [27]. 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 [28]. 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 [29]. Dans notre travail, on s'intéresse uniquement à la partie « FDI ». Pour plus de détail sur la « FTC », le lecteur pourra se référer à [30].

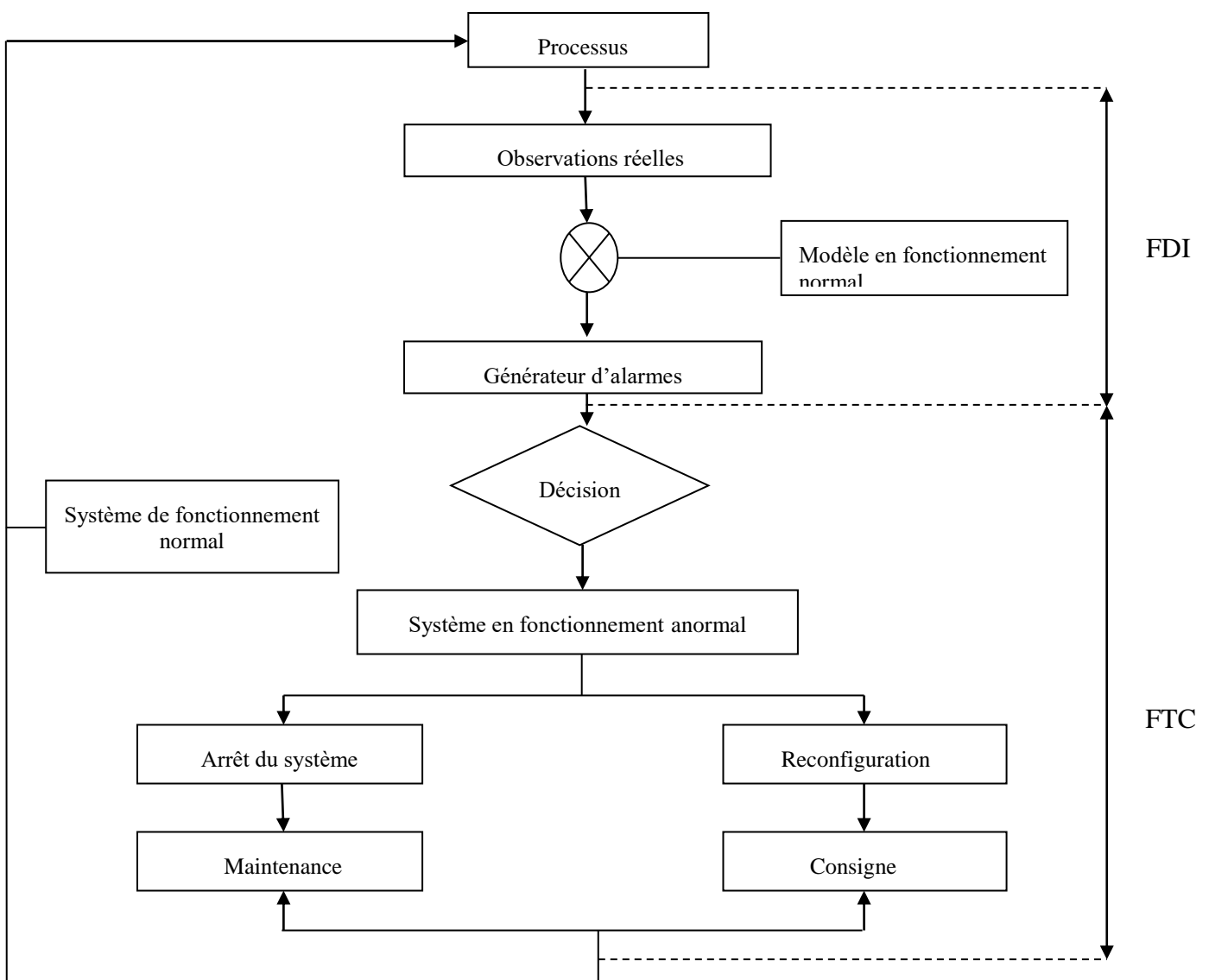


Figure III-1–Schéma de principe de la supervision

III.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 [31].

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 [32]

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 U2 ou non, ou des signaux de commande délivrés par des contrôleurs U2). 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.

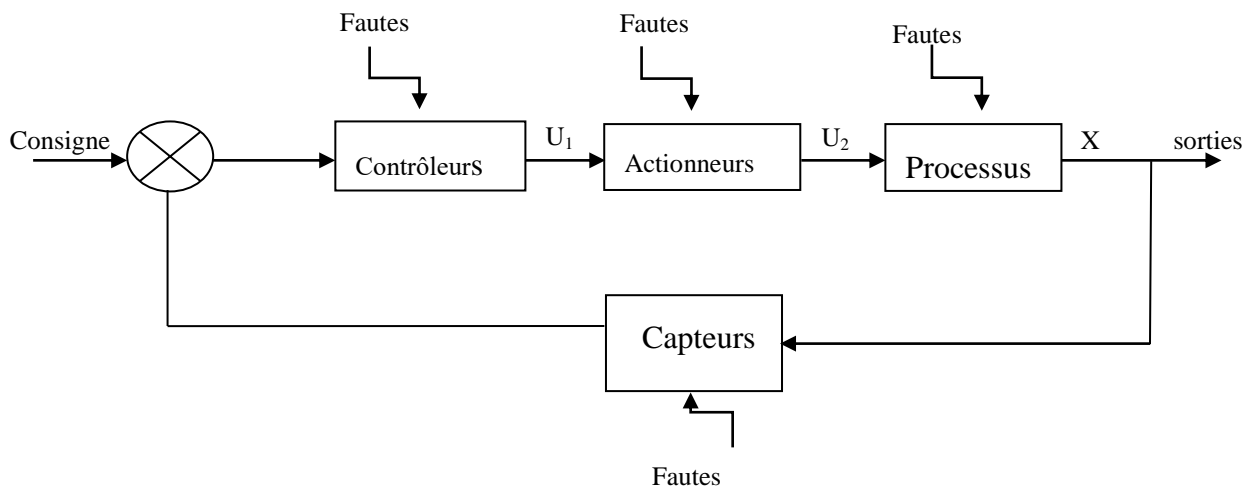


Figure III-2-Schéma de principe d'un processus régulé.

- **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(III.1)).
- **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)[33].
- **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 [34].
- **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 [34].

III.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 » [35].

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.

III.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 bonds 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. [36]. 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. [36][39].

D'autres utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance [37][39].

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.

III.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 [35][39].

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.

III.3.2.1 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.

III.4 Matrice de signature des défaillances

La structure des *RRAs* forme une matrice binaire S_{ji} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique (capteurs, actionneurs, régulateurs, éléments physiques). 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 [40] [41].

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 _{1^m}	.....	S _{jm}	.....	S _{km}

Tableau III-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 III-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 conséquent 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.

III.5 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.

A titre d'exemple en prenant l'exemple de la figure suivante, système a 2

réservoirs sans régulation et loi de commandes :

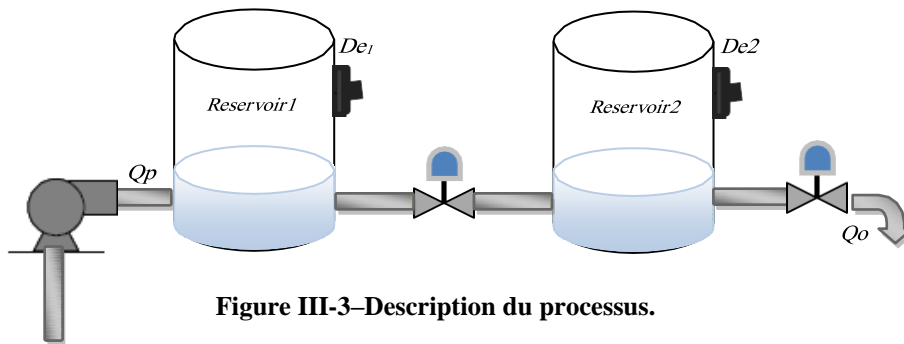


Figure III-3–Description du processus.

- le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle de ce système est :

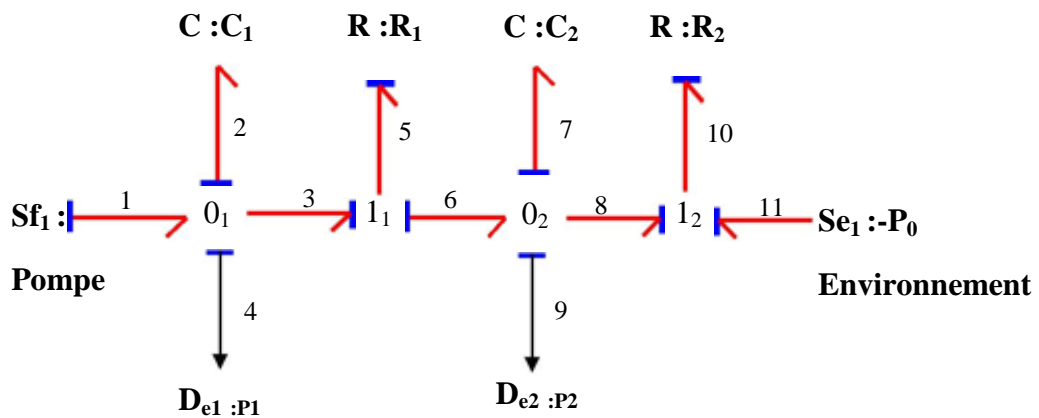


Figure III-4–Modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle.

- le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle.

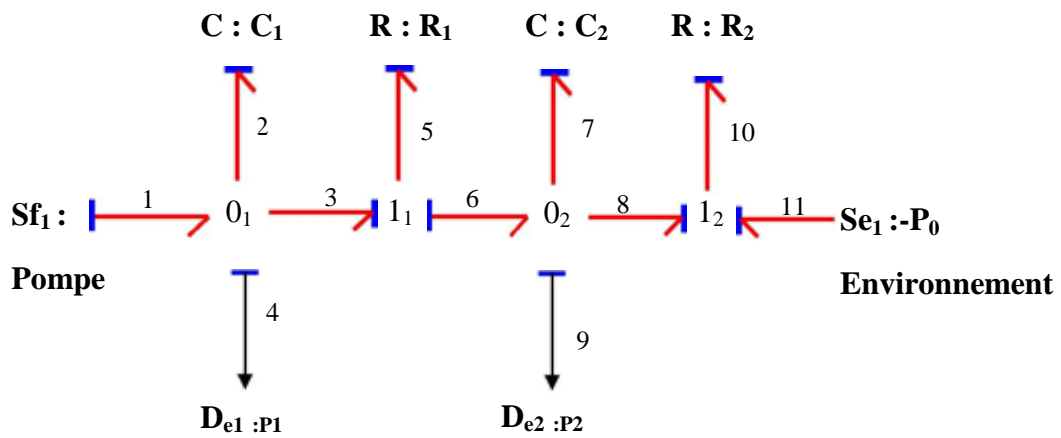


Figure III-5-Modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle.

- le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle après les modifications BGDg :

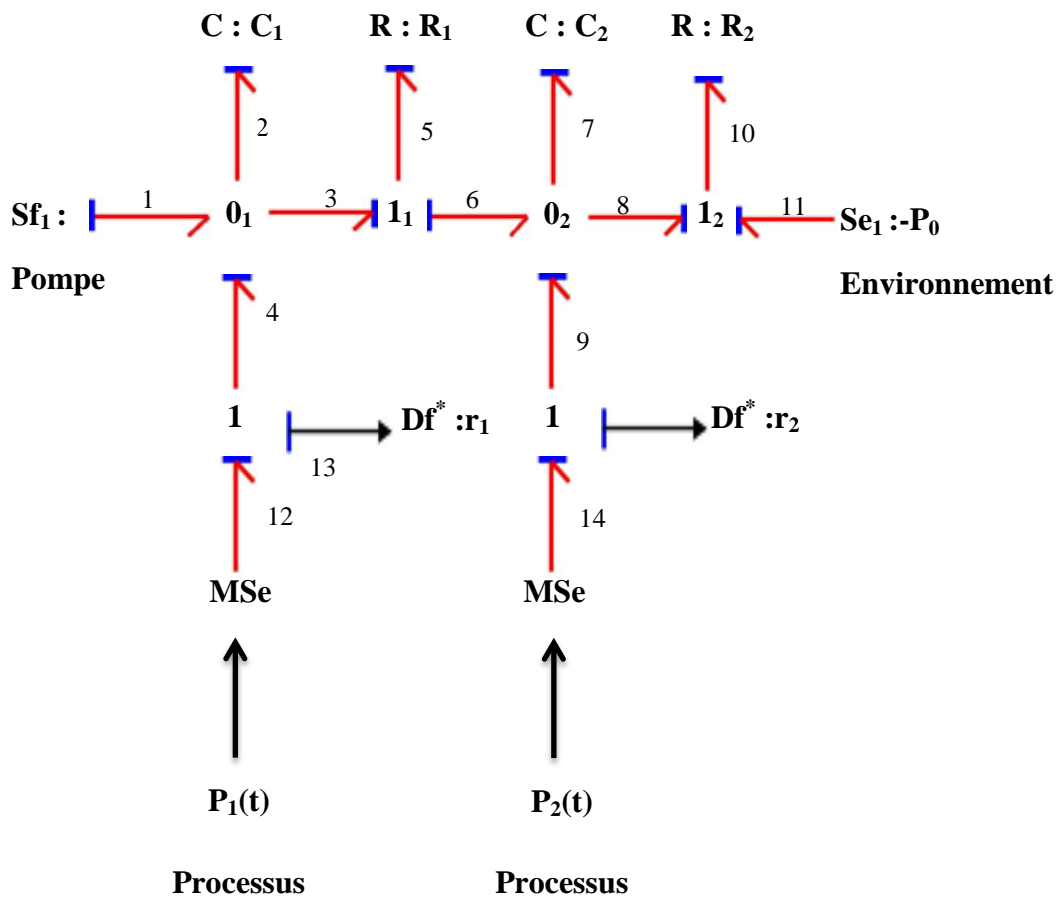


Figure III-6- BGDg de deux réservoirs

- Construction du modèle de simulation

Le modèle global de simulation se compose de deux modèles distincts: le modèle bond graph en causalité intégrale avec les différentes défaillances possibles et le modèle bond graph en causalité dérivée qu'on appelle aussi BGDg. Les sorties du premier sont injectées comme entrées du second.

- **Connexion des deux modèles**

Le couplage des deux modèles bond graphs, en causalité Dérivée et intégrale, a pour but la construction de modèles en mode normal et défaillant, on distingue quatre zones distinctes, la zone de couplage dans laquelle on a ajouté du bruit aux sorties du modèle en causalité intégrale, et enfin le modèle bond graph de diagnostic qui permet de générer des résidus sous forme numérique.

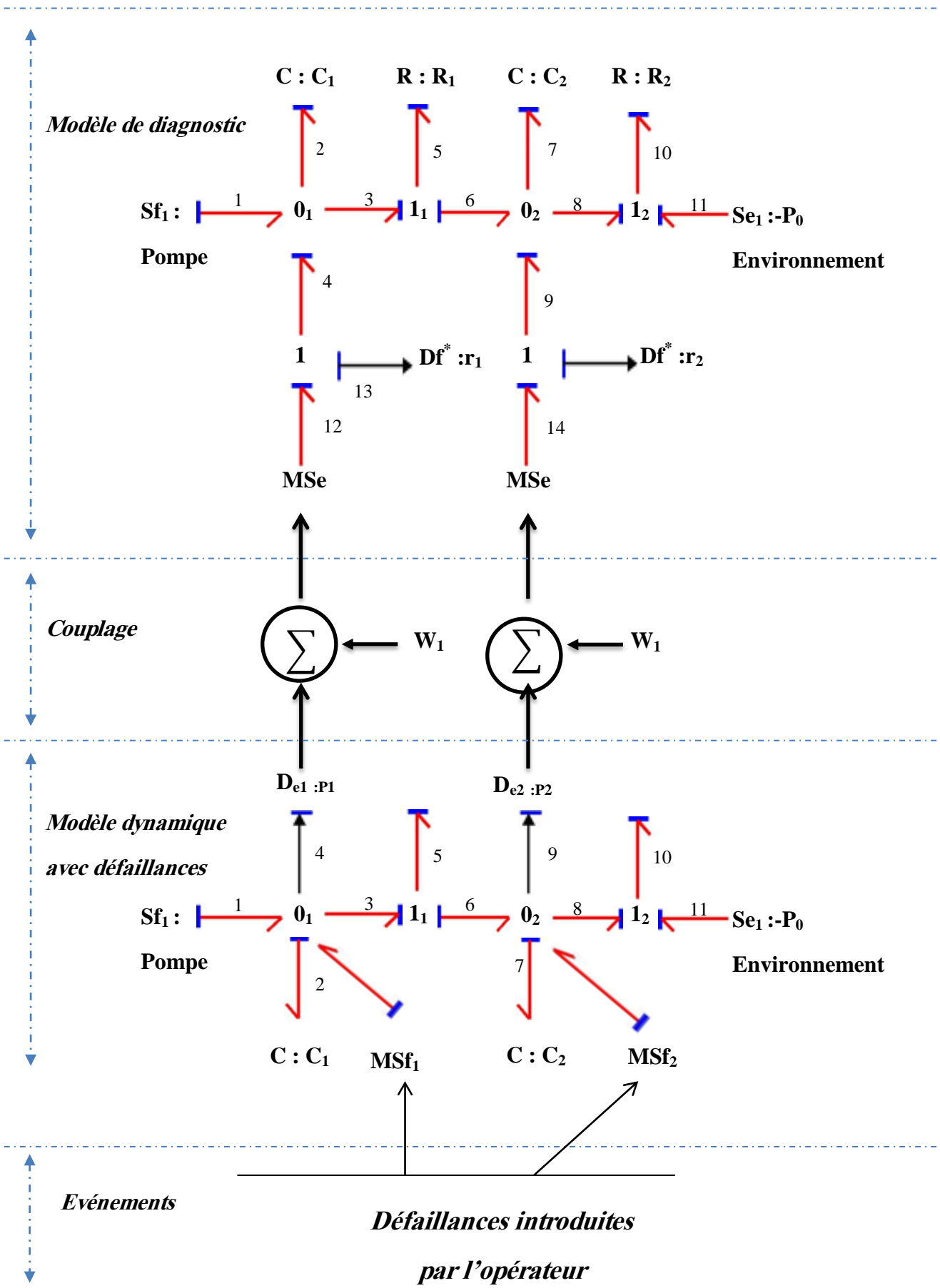
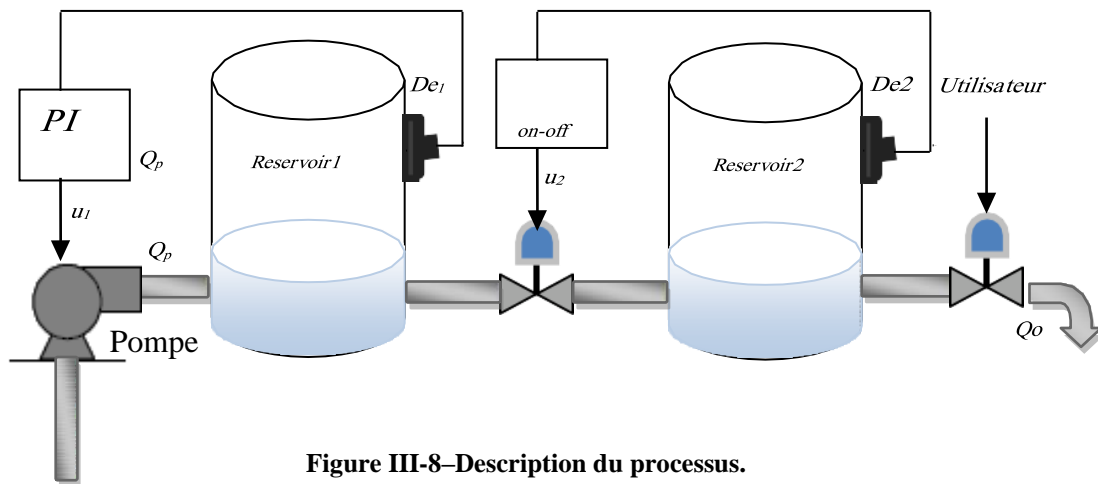


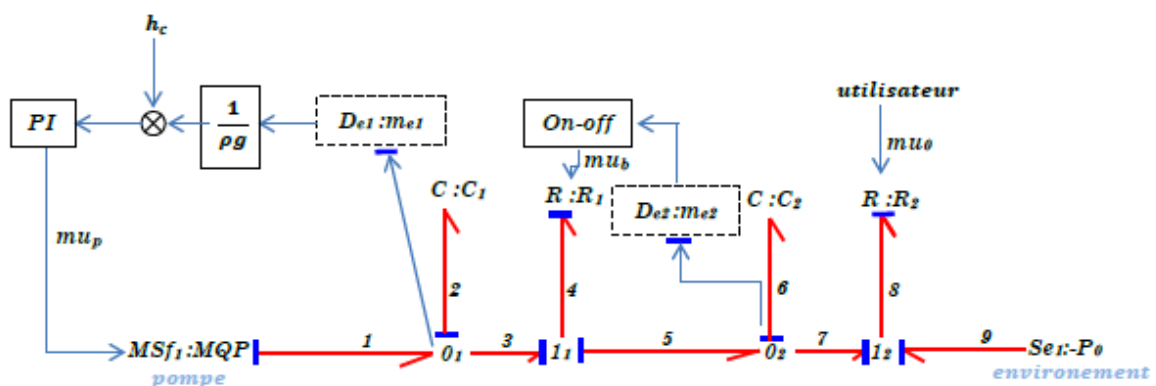
Figure III-7—Construction du modèle de simulation.

III.5.1 Description du processus

La fonction principale de ce processus est de fournir un débit d'eau Q_0 continu à un consommateur. Le système consiste en deux réservoirs T_1 et T_2 reliés par une conduite et une vanne. Le réservoir T_1 est rempli en eau jusqu'à un niveau $h_1 = 0.5$ m au moyen d'une pompe P_1 . Ce niveau est régulé par un PI en agissant sur le débit d'entrée Q_p fourni par la pompe. Le débit d'eau qui traverse la vanne V_b est régulé par un régulateur "On - Off". En agissant sur la vanne V_b , on maintient le niveau d'eau h_2 dans le réservoir T_2 autour d'une valeur donnée ($0.09 \text{ m} \leq h_2 \leq 0.11 \text{ m}$). La quantité d'eau Q_0 fournie à un consommateur dépend du degré d'ouverture ou de fermeture de la vanne V_0 .



III.5.2 Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs



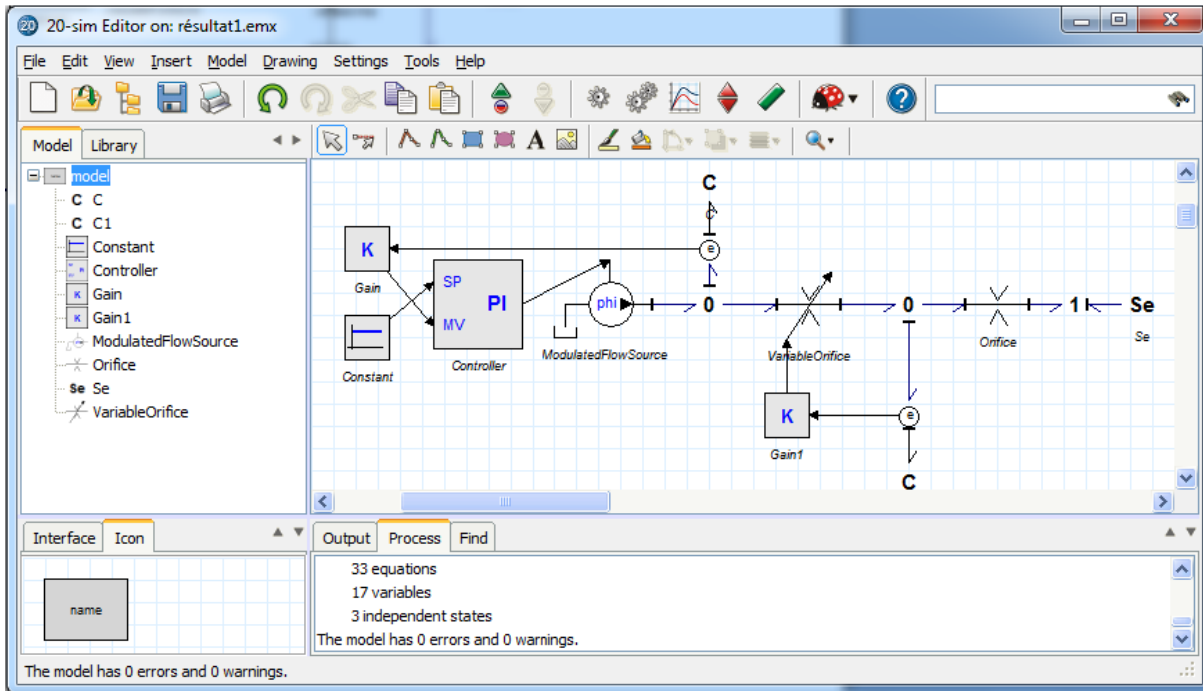


Figure III-10–Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs dans 20-sim 4.2.

III.5.3 Génération des RRAs

- **Les variables**

Le vecteur contenant toutes les variables pour les détections des défauts associé au modèle bond graph donnée :

$$Z = X \cup K \quad \text{III-1}$$

Nous avons quatre éléments bond graph (R1, R2, C1 C2), donc le vecteur de variables inconnues X est de dimension 8:

$$X \in R8: X = [f_2 \ e_2 \ f_4 \ e_4 \ f_6 \ e_6 \ f_8 \ e_8] \quad \text{III-2}$$

Le vecteur des variables connues dans le modèle bond graph est de dimension 7: Sont les deux sources , deux capteurs et 3 contrôleurs :

$$K = [MQ_p \ P_0 \ me_1 \ me_2 \ mu_p \ mu_b \ f_8 \ mu_0]^T \quad \text{III-3}$$

- **Les paramètres**

Le vecteur θ des paramètres est composée de (les coefficients hydrauliques des éléments R1, R2) et (les capacités hydrauliques des éléments C1, C2).

$$\theta = [\quad C_{d2} \quad C_1 \quad C_2]^T \quad \text{III-4}$$

- **Les contraintes**

Le pseudo bond graph des deux réservoirs consistent de : 04 jonction ($n_j=4$), 04 éléments bond graph ($n_e=4$), 02 capteurs ($n_s=4$), et deux contrôleurs PI et on-off ($n_c=4$), ($\mu_0=1$), donc on a 13 Relations des contraintes sont disponibles et seulement 8 variables sont inconnus, ce qui implique que le système est déterministe.

- **Les équations structurelles FJ**

Les équations structurelles des jonctions 0,1 sont :

$$\Phi_1: MQ_p - f_4 - f_2 = 0, \quad \Phi_2: e_2 - e_4 + e_6 = 0 \quad \text{III-5}$$

$$\Phi_3: -f_6 - f_8 + f_4 = 0, \quad \Phi_4: -e_8 + e_6 - P_0 = 0 \quad \text{III-6}$$

- **Les équations de comportement FB**

Les équations constitutives pour les éléments C1, R1, C2, R2 sont :

$$\Phi_5 \begin{cases} s. e_2 = \frac{1}{c_1} f_2, \text{ if } e_2 < \rho g Z_1 \max \\ s. e_2 = 0, \text{ if } e_2 = \rho g Z_1 \max \\ e_2 \in [0, \rho g Z_1 \max] \end{cases} \quad \text{III-7}$$

$$\Phi_6: f_4 = C_{d1} . \text{sign} (e_4) \sqrt{|e_4|} \mu_b \quad \text{III-8}$$

$$\Phi_5 \begin{cases} s. e_6 = \frac{1}{c_2} f_2, \text{ if } e_2 < \rho g Z_2 \max \\ s. e_6 = 0, \text{ if } e_6 = \rho g Z_2 \max \\ e_6 \in [0, \rho g Z_2 \max] \end{cases} \quad \text{III-9}$$

$$\Phi_8: f_8 = C_{d2} . \text{sign} (e_8) \sqrt{|e_8|} \mu_0 \quad \text{III-10}$$

- **Les équations des mesures FY**

Les équations des capteurs De1 ; De2 sont :

$$\Phi 9: me1 = \begin{cases} e2, & \text{if } e2 < \rho g Z1max \\ \rho g Z1max, & \text{if } e2 = \rho g Z1max \end{cases} \quad \text{III-11}$$

$$\Phi 10: me2 = \begin{cases} e6, & \text{if } e6 < \rho g Z2max \\ \rho g Z2max, & \text{if } e6 = \rho g Z2max \end{cases} \quad \text{III-12}$$

- **Les équations des contrôleurs**

Le niveau d'eau dans le réservoir 1 est contrôlé par un contrôleur PI, l'équation est :

$$\Phi 11: mup = PI_KP \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) + PI_Ki \int \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) dt \quad \text{III-13}$$

Le niveau d'eau dans le réservoir 2 est contrôlé par un contrôleur TOR (on-off), l'équation est :

$$\Phi 12 : mub = on_o(me2 , onoffstate, onoff_min , onoff_max) \quad \text{III-14}$$

$me2$, $onoff_min$ et $onoff_max$ sont respectivement l'indication de capteur de Pression, minimum niveau dans le réservoir, et maximum niveau dans ce réservoir.

- **Les équations des sources contrôlées**

Pour simplifier l'équation de commande de la source, nous supposons que le débit fourni par la pompe MQp est proportionnelle à la sortie du régulateur PI et le débit de la pompe est limité à Pump_Max et Pump_Min, la MQp peut être écrit comme suit :

$$\Phi 13: MQp = \begin{cases} mup, & \text{if } 0 < mup < Pump_Max \\ Pump_Min, & \text{if } mup \leq Pump_Min \\ Pump_Max, & \text{if } mup \geq Pump_Max \end{cases} \\ = MinMax (mup , Pump_Min, Pump_Max) \quad \text{III-15}$$

- **Génération des résidus**

À titre d'exemple, prenons la jonction 01 : la première équation structurelle Compte tenu de deux variables sont inconnues ($f4$ et $f2$), L'objectif est de diminuer le nombre des variables inconnues et d'augmenter le nombre des variables connues. L'ARR est alors générée lorsque toutes les variables inconnues sont déterminées. Les variables

inconnues sont directement déduites en utilisant les chemins causaux. f_2 est calculé par l'équation constitutive du stockage de réservoir 1 modélisé par l'élément C1, l'effort e_2 est mesuré et déterminé à l'aide l'équation de mesure et ($e_2 = me_1$), enfin on trouve :

$$f_2 = C_1 s me_1 \quad \text{III-16}$$

f_4 est calculé par l'équation constitutive de l'élément R1, e_4 est inconnue. Cette variable est exprimée en termes de variables connues en utilisant les chemins causaux :

$$\text{On a : } (e_3 = De_1 = me_1) \quad \text{III-17}$$

$$\text{Et : } (e_5 = De_2 = m_2) \quad \text{III-18}$$

$$\text{Alors : } (e_4 = e_3 - e_5 = me_1 - me_2) \quad \text{III-19}$$

$$\text{Donc : } f_4 = Cd_1 \cdot \text{sgn}(me_1 - me_2) \sqrt{|me_1 - me_2|} \cdot mub \quad \text{III-20}$$

Enfin on obtient la première relation de redondance analytique :

$$\begin{aligned} ARR = MQp - C_1 s me_1 + Cd_1 \cdot \text{sgn}(me_1 \\ - me_2) \sqrt{|me_1 - me_2|} \cdot mub \end{aligned} \quad \text{III-21}$$

En utilisant la même méthode pour obtenir les ARR, on ajoute aussi les RRAs de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.

Les RRAs de ce système sont :

$$ARR1 = MQp - MinMax (mup, pump_min, pump_max) \quad \text{III-22}$$

$$ARR2 = mup - PIKp(hc - 1/\rho g me1) + PI_Ki \int (hc - 1/(\rho g) me1)dt \quad \text{III-23}$$

$$ARR3 = MQp - C1 s me1 - Cd1.sgn (me1 - me2)\sqrt{\dot{m}e1 - \dot{m}e2} \quad \text{III-24}$$

$$ARR4 = Cd1.sgn (me1 - me2)\sqrt{\dot{m}e1 - \dot{m}e2} - C2 s me2 - Cd2.sgn (me2 - Po)\sqrt{\dot{m}e2 - Po} \quad \text{III-25}$$

$$ARR5 = mub - OnOff (me2, OnOffmin, OnOffmax) \quad \text{III-26}$$

❖ **Matrice de signature des défaillances**

	<i>De</i> 1	<i>De</i> 2	<i>Pompe</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>PI</i>	<i>On - Off</i>
<i>r1</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>r2</i>	1	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>r3</i>	1	1	1	1	0	1	0	0	0
<i>r4</i>	1	1	0	0	1	1	1	0	0
<i>r5</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<i>M_b</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>M_i</i>	1	1	1	1	0	1	0	1	1

Tableau III-3 Matrice de signature des défaillances de l'application.

Simulation des résultats de l'Application

- La réponse de système :

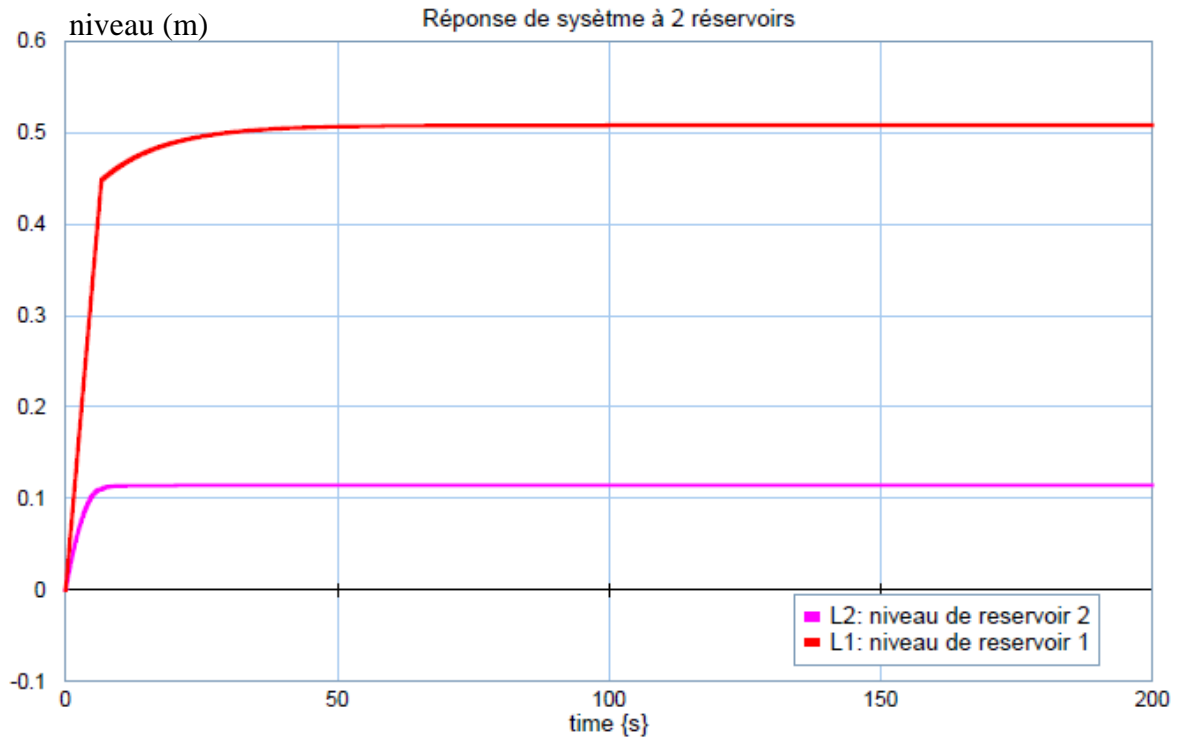


Figure III-11–Niveau d'eau dans les réservoirs 1 et 2.

- **Défaut de fuite au niveau de réservoir 1**

On applique un défaut structurel présente comme un source de flux au niveau de réservoir 1, cette fuite égale a $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ d'une durée de 50 s (100 s jusqu'à 150s), la réponse de niveau d'eau dans le réservoir 1, ARR3, 4 et le débit d'eau de la sortie sont montrées par les figures suivantes :

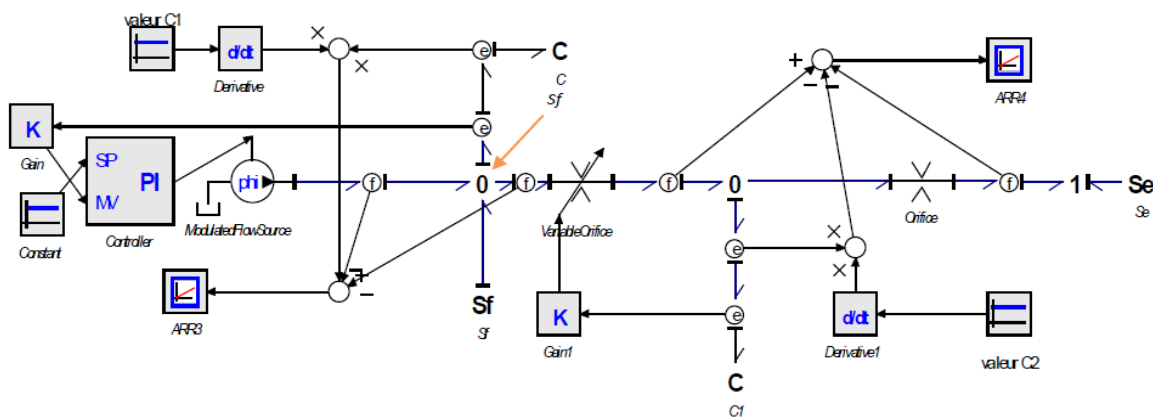


Figure III-12–Génération des ARR3, ARR4 et création d'un Défaut de fuite

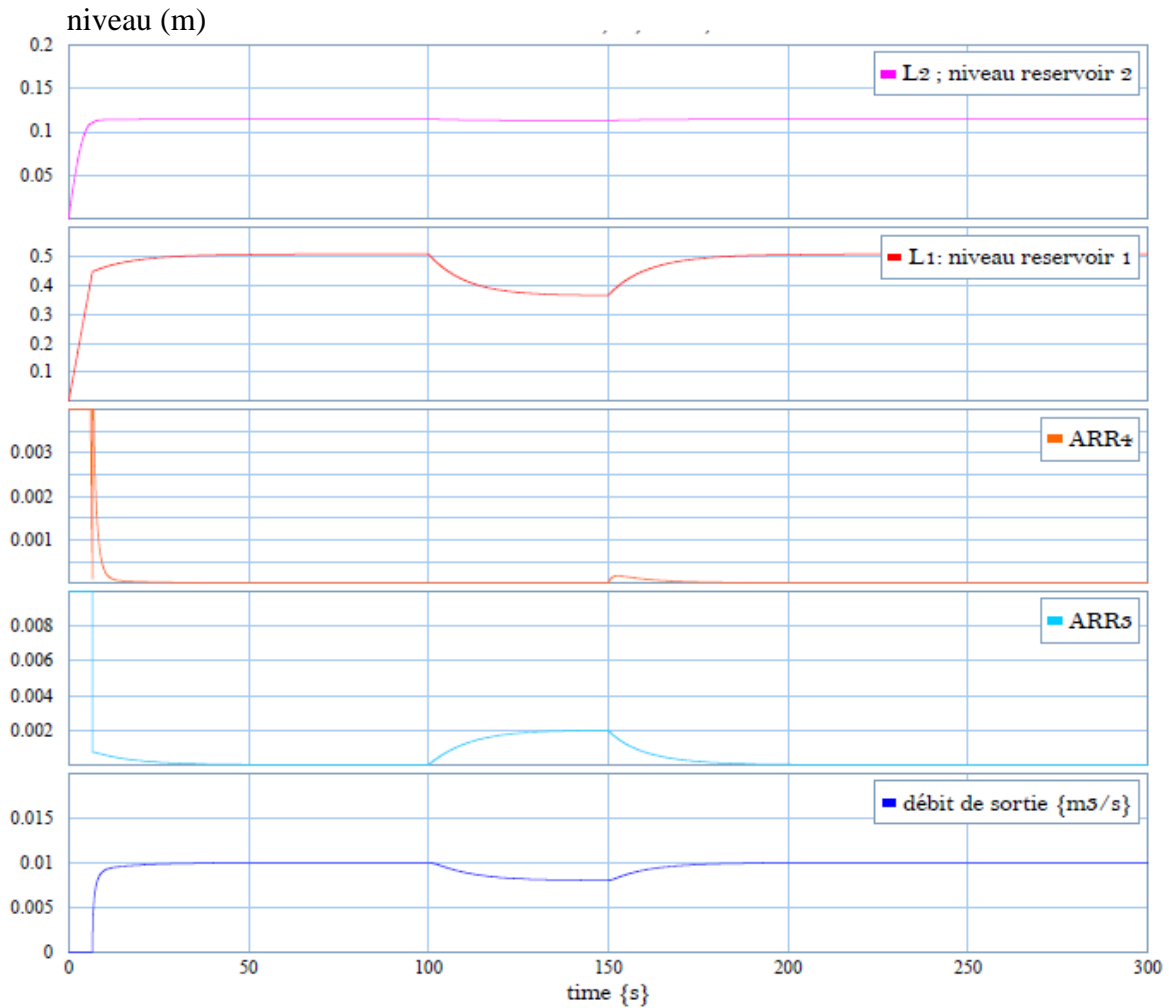


Figure III-13–Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d’eau vers l’utilisateur avec fuite dans le réservoir 1.

On remarque que le niveau d’eau du réservoir 1 est diminué lors l’excitation d’une fuite égale a $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$, et la même remarque pour le débit d’eau de sortie, après 150s le niveau d’eau de réservoir 1 et le débit de sortie augmentent jusqu’à la consigne, ARR4 égale à 0 dans la durée de défaut, ARR3 égale à 0 en régime permanent sauf dans la durée d’excitation de défaut.

- **Défaut de fuite au niveau de réservoir 2**

On applique un défaut structurel présente comme un source de flux au niveau de réservoir 2, d’une durée de 50 s (150 s jusqu’à 200s), la réponse de niveau d’eau dans le réservoir 2, ARR3,4 et le débit d’eau de la sortie sont montrées par les figures suivantes:

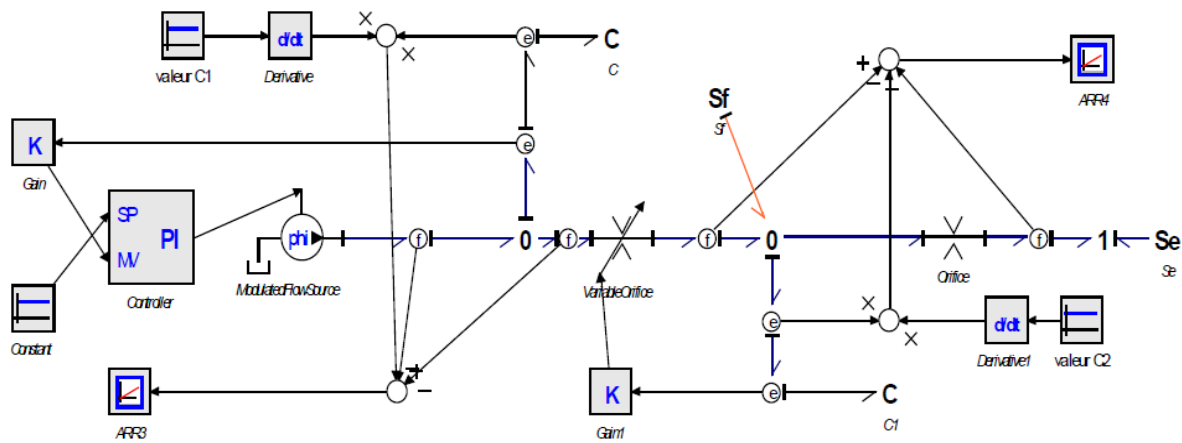


Figure III-14—Génération de RRA3, RRA4 et création d'un Défaut de fuite d'eau dans le réservoir 2.

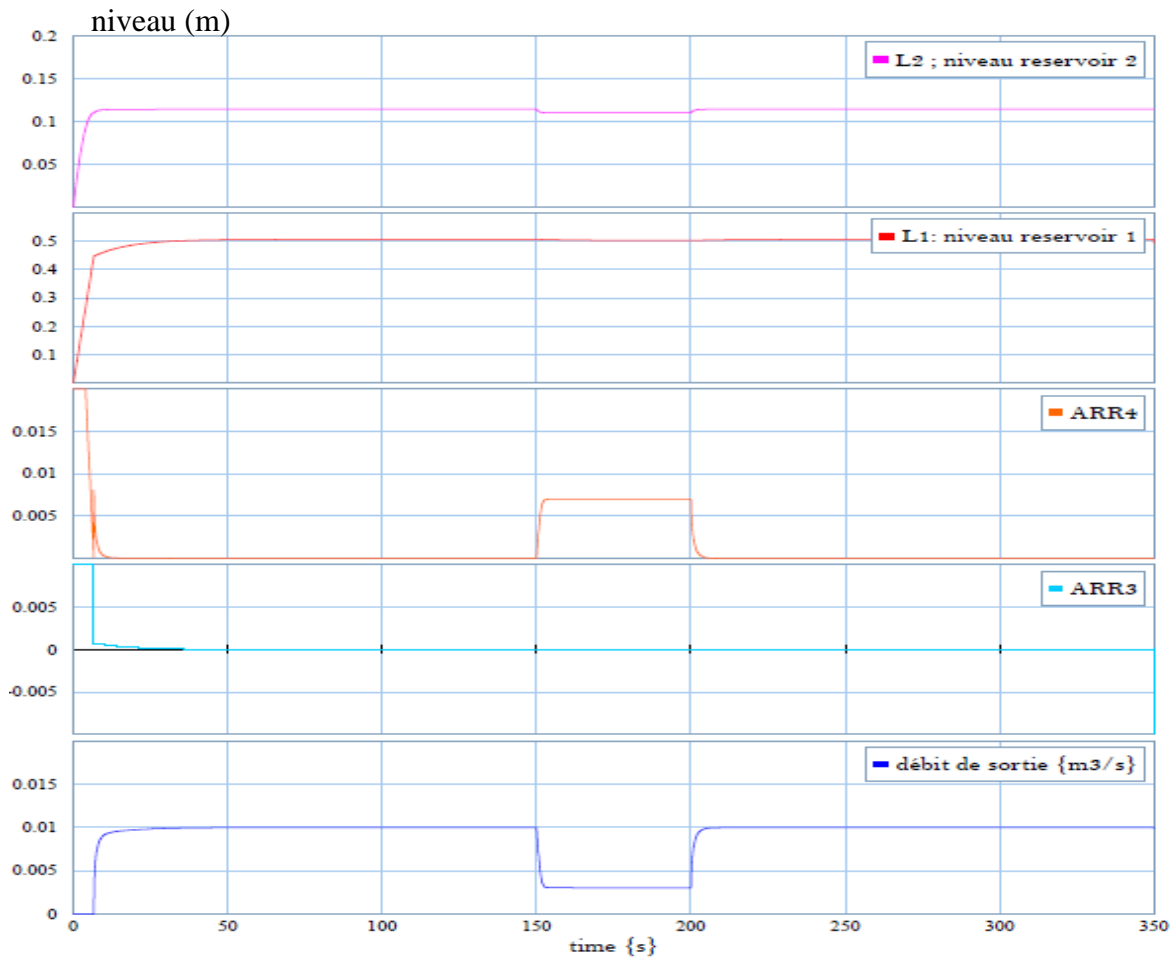


Figure III-15—Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d'eau vers l'utilisateur avec fuite dans le réservoir 2.

On remarque que le niveau d'eau du réservoir 2 est diminué lors l'excitation d'une fuite d'eau et la même remarque pour le débit d'eau de sortie, après 240s le niveau d'eau de réservoir 1 et le débit de sortie augmentent jusqu'à la consigne, ARR3 égale à 0 en (150s à

200s) montre que ce résidus ne détecte pas ce défaut, le contraire pour ARR4 détecte ce défaut dans cette durée mais égale à 0 dans le régime permanent.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la surveillance des systèmes industriels par l'approche bond graph, utilisant algorithmes pour la génération des ARR.

Les résultats de l'exemple donnée simulé par **20 sim v4.2** montrent bien l'efficacité des bond graphs pour la conception des systèmes de supervision.

Une approche combinée entre les bond graphs et les modèles externes est donnée pour la conception d'un système de supervision et appliquée sur l'exemple dynamique hydraulique.

Conclusion générale

Conclusion générale

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 travail 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.

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 mémoire, nous avons modélisé un système hydraulique à deux réservoirs sans régulation et loi de commandes avec une pompe comme source d'entrée et une vanne comme sortie.

Nous avons présenté deux algorithmes pour la génération des ARR par l'approche bond graph. Les résultats de l'exemple donnée simulé par 20 sim v4.2 montre bien l'efficacité des bond graphs pour la conception des systèmes de supervision. Dans la deuxième section, une approche combinée entre les bond graphs et les modèles externes a été donnée pour la conception d'un système de supervision, cette approche a été appliquée sur systèmes hydraulique.

Comme perspectives de notre travail est de pouvoir associer les méthodes AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et de leur Criticités) avec l'approche band graphs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] MEDJAHHER, Kamal. Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. 2005. Thèse de doctorat. Lille 1.
- [2] REZIGUE HAMZA , modelisation, Surveillance d'une centrale a beton par l'outil bond graph et validation en ligne par un systeme scada, 2014, universite setif 1 (algerie)
- [3] SAMANTARAY, Arun K. et OULD BOUAMAMA, Belkacem. Model-based process supervision: a bond graph approach. Springer Verlag, Series: Advances in Industrial Control, 2008.
- [4] BRUNET, J., JAUME, D., LABARRÈRE, M., et al. Détection et Diagnostic de Pannes. Approches Par Modélisation. Paris (France), série diagnostic et maintenance édition, 1990.
- [5] ISERMANN, Rolf. Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. Automatica, 1984, vol. 20, no 4, p. 387-404.
- [6] ZWINGELSTEIN, G. Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels, traité des nouvelles technologies, Paris (France), éd. hermès. 1995.
- [7] MAQUIN, Didier et RAGOT, José. Diagnostic des systèmes linéaires. Paris (France), Hermès science publications, 2000.
- [8] Carpentier T., « Placement de capteurs pour la surveillance des processus complexes », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1999.
- [9] Busson F., « Les bond graphs multi-énergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2002.
- [10] Athamena B., H.A. Abbassi, « Adaptive control and failure detection in dynamic systems », In : Proceedings des Journées tunisiennes sur l'électrotechnique et l'automatique JTEA'2002, Vol. 1, pp. 72-79, Sousse Nord, Tunisie, 21-23 Mars, 2002.
- [11] Debuissou B. (sous la direction), « Automatique et statistiques pour le diagnostic », Hermes Science Publications, Paris, France, 2001.

- [12] FELIOT, Claude. Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles. 1997. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve D'Ascq (France).
- [13] MILLOT, P. Supervision des procédés automatisés et ergonomie, Traité des nouvelles technologies Série automatique. Paris, Editions HERMES, 1988.
- [14] CHITTARO, Luca, GUIDA, Giovanni, TASSO, Carlo, et al. Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical systems: a case study in diagnosis. On Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions, 1993, vol. 23, no 6, p. 1718-1751.
- [15] FELIOT, Claude. Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles. 1997. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve D'Ascq (France).
- [16] Fault tree handbook , W.E. Vesely , F.F. Goldberg, N.H. ROBERTS , D.F. HASSI, NUREG report 0492, 1981
- [17] paynter.H , analysis and design of engineering system MIT press 1961.
- [18] Karnopp D. Rosenberg R, system dynamic unified approach , john wiley et sons 1975.
- [19] Rosenberg R, Karnopp D “Introduction to physical system dynamic”, serie in mechanical engineering. MacGrow, 1983.
- [20] Thoma J, Introduction to bond graphs and Thiere applications. Pergo mon press, 1975.
- [21] Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs, Michel Vergé, Daniel Jaume, éditions Technip, Paris 2004.
- [22] Modélisation et identification des processus, P. Borne et al., éditions Technip, Paris 1991.
- [23] Mounira benallel . Surveillance des systèmes thermodynamiques modélisés par des bond graphs multi-énergie. Mémoire de Magistère laboratoire Automatique Tlemcen. Mai 2005.
- [24] G. Dauphin-Tanguy (2000) les bond graphs. Paris Hermes science paphication 2000.
- [25] MAHDAD BATOUL IKRAM, BELHADJ MUSTAPHA, Modélisation et détection des défauts par bond graph, application à un banc de régulation de niveau. 09 Octobre 2013
- [26] Karnopp-Rosenberg 1975, Dauphin-Tanguy 2000, Vergé-Jaume 2004

- [27] R. J. Patton. Fault-tolerant control: The 1997 situation. *Safe process*, pages 1033—1055,1997.
- [28] 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.
- [29] M. Staroswiecki and A. Gehin. From control to supervision. *Safeprocess*, page 312:323,2000.
- [30] M. Blank, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Springer Verlag, May 2003.
- [31] G. Zwingelstein. *Diagnostic Des Défaillances: Théorie et Pratique Pour Les Systèmes Industriels*. Hermès, 1995.
- [32] J. Brunet, L. M. Jaume, D., A. Rault, and M. Vergé. *Détection et Diagnostic de Pannes: Approche Par Modélisation*. Hermès, hermès edition, 1990.
- [33] 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 Scineces et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq,1998.
- [34] 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.
- [35] W. Elostia : *Surveillabilité structurelle et platitude pour le Diagnostic des modèles bond graphs couplés*. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [36] 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.
- [37] C. Ghiaus: *Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph*. *ELSEVIER Energy and Buildings* 30, (1999) 221–232.
- [38] 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.
- [39] A.K. Samantaray et al: *Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation*. *ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory* 14, (2006) 237–262.

- [40] DECLERCK, Ph et STAROSWIECKI, M. Characterization of the Canonical Components of a Structural Graph for Fault Detection in Large Scale Industrial Plants. In Proceedings of ECC'91 (July 1991), p. 298-303.
- [41] IZADI-ZAMANABADI, Roozbeh, BLANKE, Mogens, et KATEBI, Serajeddin. Cheap diagnosis using structural modelling and fuzzy-logic-based detection. Control Engineering Practice, 2003, vol. 11, no 4, p. 415-422