

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

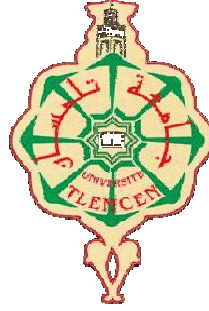
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Par : BENSEDIK Meriem Ilham et DRICI TANI Aya Zahra Hadil

Sujet

Degré d'observabilité pour la surveillance d'un système physique

Soutenu publiquement, le 26 / 09 / 2024 , devant le jury composé de :

M. Hadj Abdelkader Amine
Mme Benmansour Souhila
Mme Benallal Mounira

Professeur
MCB
MCA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examinatrice
Encadrante

Année universitaire : 2023 / 2024

Dédicaces

Ce mémoire est dédié,

A mes parents

A mon frère

A ma sœur

A ma grande famille

A mon amie Amel

A ma deuxième mère Fatiha

Drici Tani Aya

Je dédie ce mémoire,

A ma mère

A mon père

A ma sœur Radja

Bensedik Meriem

Remerciements

Tout d'abord, louange à Allah pour la force qu'il nous a donnée pour aller jusqu'au bout de notre réussite.

Nous remercions également Mme **BENKHALED Mounira** et nos professeurs pour l'effort dispensé afin de perfectionner ce travail.

Nous remercions les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré pour examiner ce mémoire.

Table des matières

Introduction générale	1
Introduction générale	1
1 Supervision industrielle	3
1.1 Introduction	3
1.2 Supervision industrielle	3
1.3 Fonctions de la supervision	5
1.4 Logiciels de supervision	6
1.5 Méthodes de diagnostic	7
1.5.1 Méthodes à base de modèles	7
1.5.2 Méthodes sans modèles	8
1.6 Conclusion	9
2 Modélisation par bond graphs	11
I Modélisation par bond graphs	13
2.1 Introduction	15
2.2 Théorie des bond graphs	15
2.2.1 Définition	15
2.2.2 Utilisation	15
2.2.3 Structure	15
2.2.4 Applications	15
2.3 Langage bond graph	16
2.3.1 Éléments actifs	16
2.3.2 Éléments passifs	17
2.3.3 Éléments de stockage	18
2.3.4 Jonctions	21
2.3.5 Éléments de transformation	25
2.4 Détecteurs	26
2.5 Construction des modèles bond graphs	27
2.5.1 En application électrique	27
2.5.2 En application hydraulique	28

2.5.3	En application mécanique	29
2.6	Notion de causalité des bond graphs	30
2.6.1	Chemin causal	31
2.6.2	Causalité des éléments bond graphs	32
2.7	Règles d'affectation de la causalité	37
II	Diagnostic par bond graph	39
2.8	Diagnostic d'un système par bond graph	41
2.9	Bond graph et surveillance des systèmes	43
2.9.1	Méthode qualitative	43
2.9.2	Méthode quantitative	43
2.10	Procédure de génération des RRAs	44
2.11	Représentation de signature des défaillances	44
2.12	Conclusion	46
3	Degré d'observabilité et placement de capteurs	47
3.1	Introduction	48
3.2	Classification des variables d'un système	48
3.3	Degré d'observabilité (degré de redondance)	49
3.3.1	Observabilité minimale	49
3.3.2	Observabilité de degré quelconque	50
3.4	Surveillabilité	50
3.5	Comparaison entre la théorie des graphes et bond graph	51
3.6	Conclusion	52
4	Modélisation par logiciel Symbols	53
4.1	Introduction	54
4.2	Propriétés du logiciel Symbols	55
4.3	Modules du Symbols Shakti	56
4.3.1	Module BondPad	56
4.3.2	Module FDIPad (constructeur de modèles graphiques)	57
4.3.3	Interface de simulation	57
4.4	Création des capsules	59
4.4.1	Caractéristiques	59
4.5	Étapes de création des capsules	60
4.6	Généralités sur les systèmes hydrauliques	63
4.6.1	Définitions	63
4.7	Application sous Symbols Shakti	65
4.7.1	Description du processus	65
4.7.2	Contribution au placement de capteurs	66
4.7.3	Étude structurelle	67

4.7.4	Degré d'observabilité	69
4.7.5	Diagnostic par l'approche qualitative du bond graph	69
4.7.6	Approche quantitative du bond graph pour le diagnostic	70
4.7.7	Génération des relations de redondance analytique RRAs	70
4.8	Génération des indicateurs de fautes	75
4.8.1	Calcul de Monitorabilité et d'Isolabilité	76
4.8.2	Matrice de signature des fautes	76
4.9	Comparaison entre la MSF calculée et celle trouvée par Symbols	77
4.10	Conclusion	77
	Conclusion générale	78
	Conclusion générale	78
	Références Bibliographiques	78

Glossaire des notations

I	Élément inertiel
C	Élément de capacité
R	Élément résistif
TF	Transformateur
GY	Gyrateur
MGY	Gyrateur modulé
MSF	Matrice de signature des fautes
IHM	Interface Homme-Machine
BG	Bond Graph
FDI	Fault Detection and Isolation
FTC	Fault Tolerant Control
RRA	Relation de Redondance Analytique
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
Se	Source d'effort
Sf	Source de flux
$e(t)$	l'effort
$f(t)$	le flux
SCAP	Sequential Causalité Affectation Procédure
SCADA	Supervision, Contrôle et Acquisition de Données
SNCC	systèmes numériques de contrôle-commande
COMP	Composant
D_b	DéTECTABILITÉ
I_b	ISOLABILITÉ

Introduction générale

Le degré d'observabilité pour la surveillance d'un système physique s'appuie sur la capacité de collecter des données pertinentes à partir de mesures externes pour évaluer l'état du système et détecter d'éventuelles défaillances. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure les composants internes du processus peuvent être observés par des mesures externes, permettant ainsi de comprendre le comportement du système, de reconnaître les problèmes potentiels et de prendre des décisions éclairées pour sa supervision. En utilisant des techniques telles que l'analyse des capteurs et la modélisation des systèmes, le degré d'observabilité permet de garantir une surveillance efficace et proactive des systèmes physiques, contribuant ainsi à leur valable fonctionnement et à leur fiabilité.

Les méthodes basées sur un modèle utilisent des approches opérationnelles s'appuyant sur des équations mathématiques ou issues du système. Ces démarches reposent sur une comparaison entre l'état réel du système et un état de référence décrit à l'aide d'un modèle mathématique. Cette comparaison est effectuée au moyen d'un indicateur de défaillance appelé résidu, qui est généré à partir du modèle de référence issu des méthodes analytiques.

Les procédés de détection et d'isolation des fautes sont essentiels pour améliorer la fiabilité des systèmes. Ces procédés ou algorithmes comparent essentiellement l'état actuel du système avec l'état idéal représentant le fonctionnement normal du système en vue de la détection, l'analyse, et localisation des défauts.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le principe de la surveillance dans les systèmes physiques fera le sujet du premier chapitre.

Dans le deuxième, on illustre l'approche par bond graph dans la modélisation des processus.

Le troisième chapitre concerne le degré d'observabilité, la surveillabilité et la comparaison entre la théorie des graphes et les bond graphs.

Finalement le dernier chapitre constitue une synthèse des différentes méthodes vues précédemment par une application à un système hydraulique.

Chapitre 1

Supervision industrielle

1.1 Introduction

La supervision des systèmes physiques est un domaine crucial de l'ingénierie qui vise à surveiller, contrôler et optimiser le fonctionnement des systèmes automatisés dans divers secteurs tels que l'industrie, l'énergie, les transports, etc. Ce chapitre explore les concepts, les méthodes et les outils utilisés pour assurer une surveillance efficace des processus physiques, garantir la sûreté de fonctionnement, améliorer les performances et anticiper les défaillances. Nous aborderons les principes fondamentaux de la supervision des systèmes physiques, les approches avancées telles que l'utilisation de systèmes SCADA, de capteurs intelligents. En mettant l'accent sur l'importance de la fiabilité, de la sécurité et de l'efficacité opérationnelle. Il est facile de voir que la supervision est considérée comme un élément important et essentiel dans toute entreprise. Ce chapitre fournira un aperçu complet des enjeux et des solutions liés à la supervision des systèmes physiques dans un contexte moderne et évolutif.

1.2 Supervision industrielle

La supervision est une méthode utilisée dans le domaine industriel pour surveiller et gérer informatiquement des procédés de fabrication automatisés. Son domaine d'application est le recueil de données (alarmes, mesures, retour d'état de fonctionnement) ainsi que les réglages de contrôle des systèmes qui, en général, sont confiés à des API (automates programmables industriels). La supervision consiste à surveiller le bon déroulement d'un système ou d'une activité [21].

La supervision recouvre l'aspect de fonctionnement normal et anormal [27] :

- **Aspect de fonctionnement «normaux» :**

Ils englobent le mode de fonctionnement nominal qui doit être, en théorie, parfaitement en accord avec les exigences de la mission.

• **Aspect de fonctionnement «anormaux» :**

Quand le processus est en cette configuration, la mission peut être complète ou incomplète ; en tout cas, le service n'est pas satisfaisant [27].

Modes interdits : Pour garantir la sécurité, il est impératif que le système ne fonctionne pas dans ces modes [27].

Modes déficients : Appelés aussi défailants, sont liés aux problèmes de fonctionnement du système. Un certain nombre des modes déficients se composent de pannes où un élément ou plus du système ne fonctionne pas correctement [27].

Modes dégradés : Ils peuvent mener à l'accomplissement de la mission de manière partielle ou avec des performances inférieures aux attentes [27].

Modes critiques : Ces modes nécessitent des caractéristiques de fonctionnement très spécifiques et souvent indésirables du système [27].

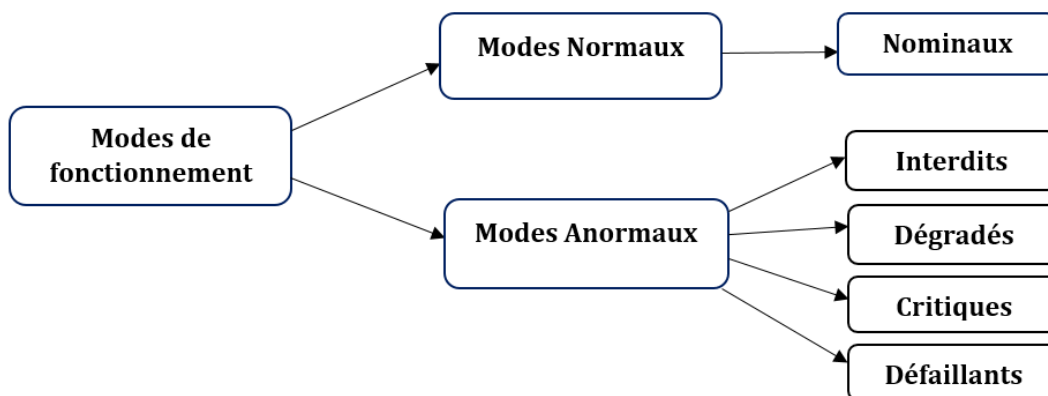


FIGURE 1.1 – Classification des modes de fonctionnement

1.3 Fonctions de la supervision

Elles englobent les fonctions de détection des défauts, de surveillance, de diagnostic et de reconfiguration [25] :

a. Surveillance :

la surveillance génère les alarmes suite aux informations délivrées par des détecteurs. Des limitations sont définies sur les données importantes des spécialistes du processus en respectant des règles de sécurité visant les humains, le positionnement et son environnement. Grâce à cette génération d'alarmes, les opérateurs humains de supervision (OHS) peuvent étudier la situation et décider de façon appropriée (arrêt d'urgence, mode de dégradation, correction).

b. Diagnostic :

Il s'agit de déterminer la source et les causes qui ont généré le symptôme détecté. À cette phase, le processus doit être capable de prendre la décision quand le système se situe dans le mode de fonctionnement normal, et quand une correction doit être réalisée.

c. Reconfiguration :

La correction consiste à reconfigurer la commande afin de rendre le système à fonctionner de façon normale. La surveillance est employée par de nombreuses méthodes :

- Pour la supervision des composants, ou des outils, du matériel ou des locaux, nous parlerons de gestion technique centralisée (GTC).
- En ce qui concerne le contrôle des procédés continus, on trouve les systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC) ainsi que les systèmes de supervision et d'acquisition de données (SCADA).
- Ces procédés, pour des systèmes fabricants, ils rassemblent toutes les fonctionnalités du superviseur.

1.4 Logiciels de supervision

Ils sont des programmes exécutifs axés sur la production, et assumant les tâches suivantes [21] :

- Assister l'opérateur dans ses opérations de contrôle du processus de fabrication.
- Représentation de l'état et de l'évolution d'une installation de contrôle de processus automatisé.
- Recueil en temps réel d'informations sur des systèmes provenant d'ateliers ou d'usines éloignés et leur stockage.
- Accompagne l'agent dans sa tâche et ses choix (suggestion des données, signalement des déficits, etc.).

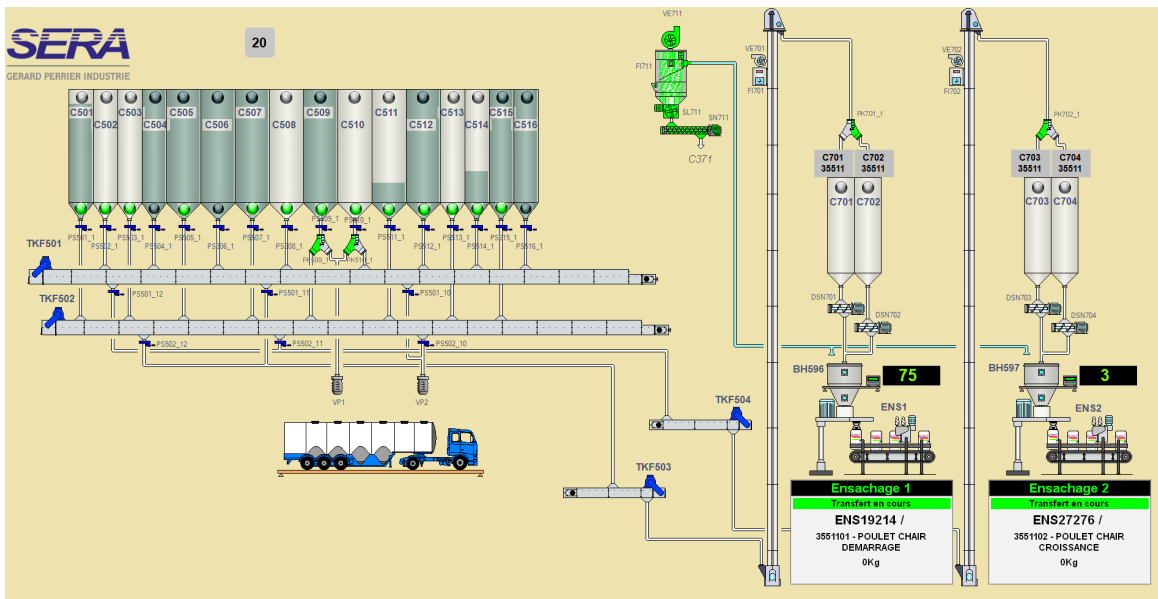


FIGURE 1.2 – Logiciel de supervision SERA de l'étape expédition

1.5 Méthodes de diagnostic

Le diagnostic joue un rôle crucial dans la résolution des problèmes, il existe deux méthodes principales de diagnostic : **Méthodes à base de modèle et méthodes sans modèle**

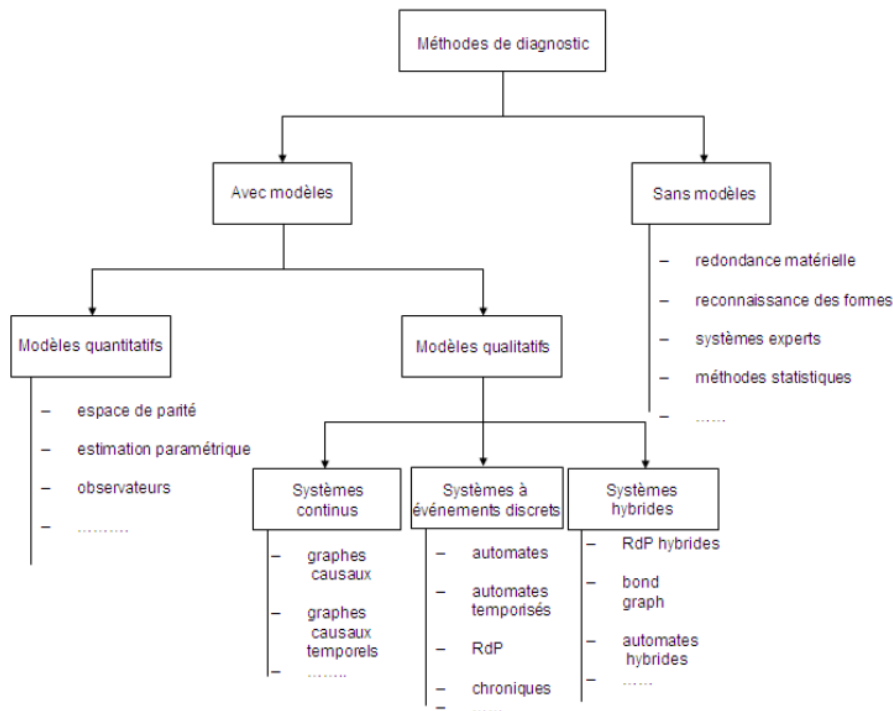


FIGURE 1.3 – Méthodes de diagnostic

1.5.1 Méthodes à base de modèles

Elles s'appuient sur une comparaison de l'état du processus avec l'état du modèle qualitatif ou quantitatif défini par Combacau et al. [10]. Toute différence implique une défaillance, voir la figure 1.4. En fonction du type de modèle, deux branches de méthodes peuvent être identifiées [12] :

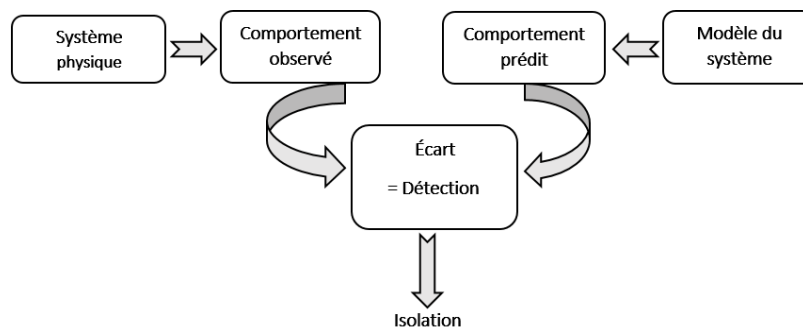


FIGURE 1.4 – Méthodes de diagnostic à base de modèle

Les méthodes quantitatives proviennent de la communauté FDI (Détection et Identification des Pannes) et celles qui sont qualitatives proviennent des domaines de l'IA (Intelligence Artificielle) et des SED (Systèmes à Événements Discrets). A noter que ces deux méthodes ne sont pas disjointes. En fait, ces deux types d'approches peuvent être intégrées dans une seule méthode de diagnostic.

- **Modèle quantitatif** : Il est utilisé pour l'estimation de paramètres, d'état ou d'espace de parité suivant un modèle mathématique ou structurel pour représenter l'information acquise du fonctionnement d'un système. Une défaillance entraîne des modifications dans plusieurs paramètres physiques du système. Les modèles mathématiques comparent les différentes valeurs des données avec des limitations de détection afin de définir un résidu qui sera remis au diagnostic. Il est possible de localiser et d'identifier la défaillance ou la panne avant la décision et ce en se basant sur les signatures de défauts connues.

- **Modèle qualitatif** : Il offre la possibilité de représenter le fonctionnement du procédé à l'aide de modèles de type symbolique ; mais non mathématique. Les modèles qualitatifs décrivent de façon qualitative des processus continus, discrets et hybrides afin que le diagnostic soit en mesure de capter les fluctuations du fonctionnement normal, de localiser les pannes et en donner les causes. Pour les processus continus, les modèles qualitatifs sont souvent axés sur des graphes causaux ou temporels. Pour les systèmes à un événement discret, de nombreuses approches sont proposées utilisant des outils tels que les automates, les équations logiques ou les RdP (réseaux de Pétri) avec observation partielle ou totale du fonctionnement du procédé.

1.5.2 Méthodes sans modèles

Dans quelques cas d'application industrielle, il est délicat ou impossible d'avoir le modèle du système. La difficulté est justifiée par la grande complication où plusieurs reconfigurations interviennent pendant le processus de fabrication. Dans ces cas, uniquement, les techniques de surveillance sans modèles sont opérantes pour ce type d'applications. Ces techniques de diagnostic s'appuient sur des connaissances tirées d'une expérience antérieure. Parmi ces techniques ou méthodes, on trouve [12] :

- **La méthode du seuillage** : les signaux donnés par les détecteurs sont comparés aux seuils limites fixes ou adéquats (adaptatives) [26]. Un premier niveau signale un défaut probable, tandis qu'un second niveau permet d'en évaluer la gravité. Le dépassement d'un seuil indique la présence d'une défaillance.

- **Les méthodes statistiques** : Reposent sur l'hypothèse que les signaux émis par les capteurs présentent des caractéristiques statistiques spécifiques, sur lesquelles des tests de seuil sont définis [42]. En effet, l'analyse de l'évolution de la moyenne ou de la variance d'un signal peut faciliter la détection d'une anomalie.

- **La reconnaissance des formes** : Ces méthodes s'appuient sur l'utilisation d'algorithmes de classification des formes et des mesures, qu'elles soient continues ou discrètes.

1.6 Conclusion

L'importance de la supervision dans le système d'information réside dans sa capacité de garantir le bon fonctionnement de l'architecture réseau et la réaction rapide en cas de défaillance ou de panne.

Dans le chapitre présent, nous avons parlé de la supervision des systèmes physiques, et ses fonctions, nous avons aussi présenté quelques concepts de diagnostic et ses méthodes distinctes à base de modèle et sans modèle.

Dans le prochain chapitre nous nous intéresserons au modèle bond graph, ainsi que son utilisation pour la supervision et le diagnostic des systèmes physiques.

Chapitre 2

Modélisation par bond graphs

Première partie

Modélisation par bond graphs

2.1 Introduction

Pour les systèmes de diagnostic, il y a ceux sans modèle qui sont basés sur l'historique des données, et il y a ceux qui sont basés sur un modèle. Dans le cadre de notre travail, nous avons considéré le diagnostic à base de modèle bond graph. Dans ce chapitre, nous allons voir ce que c'est le modèle bond graph. Les modèles bond graphs ou graphes de liaisons, constituent un outil essentiel en ingénierie pour la modélisation et l'analyse des systèmes dynamiques complexes. Introduits par Henry M. Paynter en 1961, les bond graphs offrent une approche unifiée et structurée pour représenter les interactions énergétiques entre les composants d'un système, qu'il soit électrique, mécanique, hydraulique ou autre.

Ce chapitre explorera en profondeur les concepts fondamentaux des bond graphs, leur utilisation pluridisciplinaire dans les sciences de l'ingénierie, ainsi que leur application pratique dans la modélisation et la simulation des systèmes. Nous aborderons les principes de base des bond graphs, leur importance dans la représentation des transferts d'énergie, et les méthodes mathématiques déduites de ces graphes pour une compréhension approfondie des systèmes physiques.

2.2 Théorie des bond graphs

La théorie des bond graphs est une approche structurée pour l'analyse des systèmes dynamiques et des transferts d'énergie entre systèmes.

2.2.1 Définition

Un bond graph est un graphe orienté qui met en évidence les variables dynamiques représentant les transferts d'énergie entre systèmes. Il traduit les liens de puissance entre ces systèmes [16].

2.2.2 Utilisation

Les bond graphs sont utilisés pour modéliser et simuler des systèmes pluridisciplinaires, offrant une approche unifiée pour les sciences de l'ingénieur [16].

2.2.3 Structure

Les bond graphs permettent de représenter graphiquement la structure et les interactions des systèmes, facilitant ainsi l'analyse des propriétés structurelles et la modélisation des dynamiques [39].

2.2.4 Applications

Ils sont largement utilisés en mécatronique, en modélisation de systèmes électriques, en commande de systèmes, et dans d'autres domaines nécessitant une approche pluridisciplinaire [40], [39].

En résumé, la théorie des bond graphs offre un cadre puissant pour la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes complexes en mettant en avant les interactions énergétiques entre les composants.

2.3 Langage bond graph

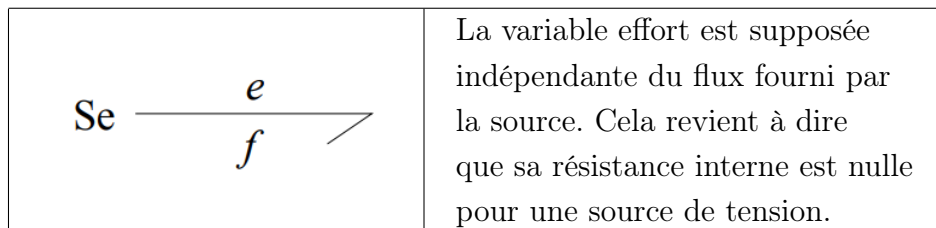
L'analyse des phénomènes actifs se fait en fonction des sources d'effort et des sources de flux. La puissance est le résultat d'un effort par un flux. On distingue quatre types d'éléments : actifs, passifs et ceux de transformation.

Les détecteurs et les jonctions sont aussi considérés [20].

2.3.1 Éléments actifs

Il est possible d'obtenir de l'énergie grâce à une source d'effort ou à une source de flux dans un système. Dans un système électrique, ces sources sont la tension et le courant. La source considérée est orientée par une demi-flèche [20].

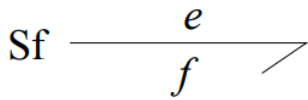
a. Source d'effort



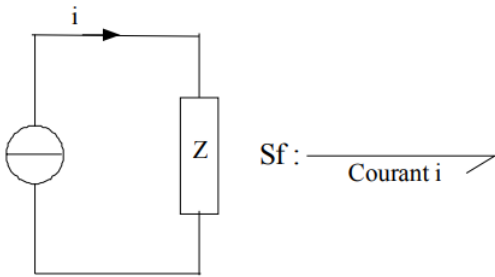
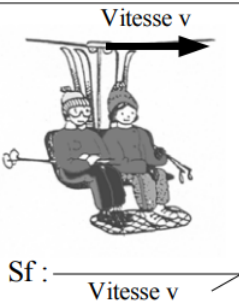
Exemple 1

Domaine électrique	Domaine mécanique
Source de tension, alimentation par une source d'impédance nulle.	Moteur d'entraînement ayant des pertes nulles et fournissant une force de propulsion F.

b. Source de flux

	<p>Ici cette source est la duale de la précédente Dans le domaine électrique cela correspond à une source de courant d'impédance infinie.</p>
---	--

Exemple 2

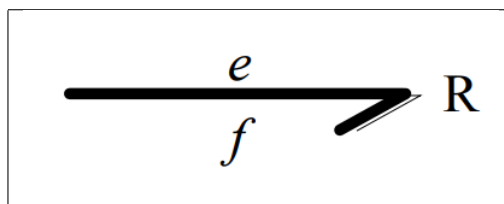
Domaine électrique	Domaine mécanique
	
Source de courant, alimentation par une source d'impédance infinie.	Moteur d'entraînement ayant une inertie infinie et fournissant une vitesse constante.

2.3.2 Éléments passifs

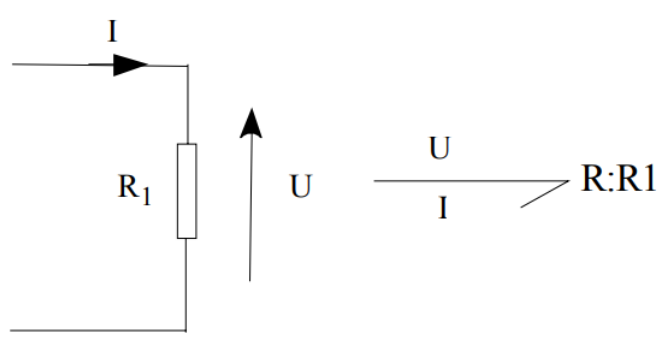
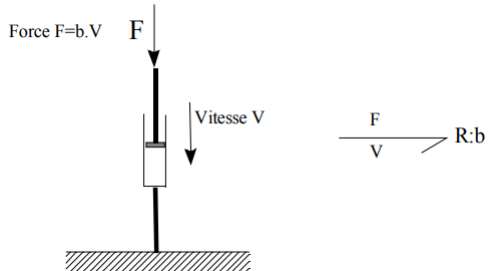
Ces éléments du bond graph sont appelés passifs car ils changent la puissance reçue en puissance dissipée (élément R), stockée sous énergie potentielle (élément C) ou cinétique (élément I) [20].

a. Élément R

On utilise cet élément afin de représenter un phénomène physique qui relie les variables flux et effort. Cet élément est une résistance dans le domaine électrique, en mécanique c'est un amortisseur ou un phénomène de frottement. Et enfin, dans le domaine hydraulique, il est une restriction.



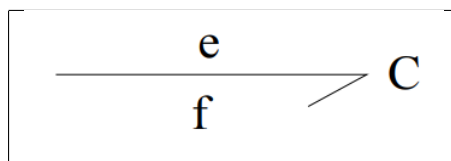
Exemple 3

Domaine électrique	Domaine mécanique
	
<p>La résistance :</p> <p>Puissance dissipée $P = U \cdot I = R_1 \cdot I^2$.</p>	<p>La force $F = b \cdot V$</p> <p>Frottement s'opposant à un déplacement.</p> <p>Frottement fluide ; $F = b \cdot V$</p> <p>$P = V \cdot F = b \cdot V^2$</p>

2.3.3 Éléments de stockage

Les éléments de stockage, bien qu'ils soient passifs, peuvent transformer l'énergie de manière réversible. Par exemple, un barrage conserve l'énergie potentielle, tandis qu'une inertie en rotation stocke de l'énergie cinétique. Dans le domaine électrique, un condensateur emmagasine de l'électricité et une inductance, de l'énergie magnétique [20].

c. Élément C (stockage de type potentiel)



Cet élément se rapporte au stockage d'énergie sous forme d'effort. L'élément C est utilisé pour décrire tout phénomène physique qui relie la variable d'effort à celle de déplacement, et ce stockage est qualifié de potentiel. Un déplacement est défini par la relation $q = \varphi_c(C, e)$, dans le cas linéaire $q = C \cdot e$. L'énergie stockée s'exprime par la formule [20] :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0) \quad (1)$$

Le déplacement s'exprimant vis-à-vis du flux par $q(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot d\tau$, il vient : $E(q) = \int_{q_0}^q e(q) dq + E(q_0)$.

Applications :

- Énergie stockée dans un ressort :

Pour un ressort la force est proportionnelle à l'écrasement soit : $F = k \cdot x$,

$$E(x) = \int_{x_0}^x F(x)dx + E(x_0) = \int_{x_0}^x k \cdot x \cdot dx + E(x_0) = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad (2)$$

- Énergie accumulée dans un condensateur :

la charge Q dans un condensateur Q (déplacement) est reliée à la tension (effort) par cette relation $Q = C \cdot U$.

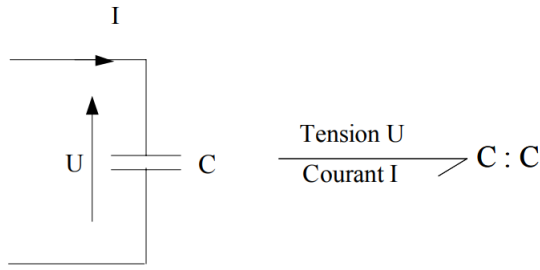
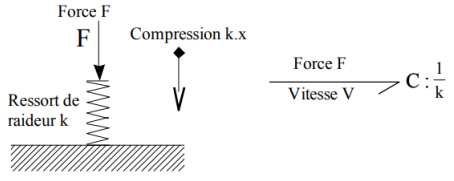
$$E(x) = \int_{q_0}^q F(q)dq + E(q_0) = \int_{q_0}^q \frac{q}{C} \cdot dq + E(q_0) = \frac{q^2}{2 \cdot C} \quad (3)$$

Si l'on formule cette énergie emmagasinée.

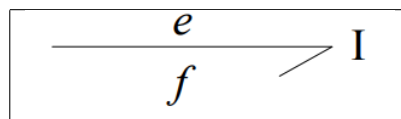
Causalité intégrale : $e = \frac{1}{C} \int f$, l'effort est égale l'intégrale du flux.

Causalité dérivée : $f = C \cdot \dot{e}$, le *flux* est égale la dérivée de l'effort.

Exemple 4

Domaine électrique	Domaine mécanique
	
<p>Le condensateur permet, lorsqu'il reçoit un courant (<i>flux</i>), d'emmagasiner une charge électrique exprimée en Coulomb (déplacement).</p> <p><u>Déplacement</u> $q = \int f \Rightarrow q(t) = \int_0^t i(\tau) \cdot d\tau$ Sachant que pour un condensateur : $u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \Rightarrow q = C \cdot u$ nous retrouvons la relation générique en régime linéaire $q = C \cdot e$ où q représente la quantité d'électricité en Coulomb.</p> <p><u>Causalité</u> Pour avoir une causalité intégrale, un condensateur doit être alimenté par une source de courant, la tension étant la conséquence. En causalité intégrale : $u(t) = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) \cdot d\tau$. En causalité dérivée : $i(t) = C \cdot \dot{u}(t)$</p>	<p>Le ressort permet, lorsqu'il est soumis à une vitesse (<i>flux</i>), d'emmagasiner un déplacement exprimé en mètre.</p> <p><u>Déplacement</u> $q = \int f \Rightarrow q(t) = \int_0^t V(\tau) \cdot d\tau$ Pour un ressort, la force due à la compression vaut : $F(t) = k \int_0^t V(\tau) d\tau \Rightarrow q = \frac{F}{k}$ et nous retrouvons, comme pour le condensateur, la relation valable dans le cas linéaire $q = C \cdot e$. Nous vérifions ici que le déplacement correspond à la compression $x = \frac{F}{k}$ et que la valeur de la variable C de cet élément vaut $C = \frac{1}{k}$.</p> <p><u>Causalité</u> En causalité intégrale : $F = F_0 + k \int_0^t V(\tau) \cdot d\tau$. En causalité dérivée : $V(t) = \frac{1}{k} \cdot \dot{F}(t)$</p>

d. Élément I (stockage de type inertiel)



Ces éléments permettent de la modélisation de tous phénomène liant le flux à un moment $p = \varphi_1(I, f)$.

dans le cas où le système est linéaire $p = I \cdot f$. Le stockage est inertiel.

L'énergie stockée donner par [20] :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau)f(\tau)d\tau + E(0) \quad (4)$$

Le déplacement donner par la relation suivante :

$$p(t) = \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

il vient :

$$E(p) = \int_{p_0}^p f(p)dp + E(p_0).$$

- Énergie accumulée dans une masse :

Où p est une quantité de mouvement

$$p = M \cdot V \quad \text{et} \quad E(p) = \int_{p_0}^p V(p) \cdot dp + E(p_0) = \int_{p_0}^p \frac{p}{M} \cdot dp + E(p_0) \quad (6)$$

d'où $E(p) = \frac{1}{2}M \cdot V^2$, qui correspond à l'énergie cinétique.

- Énergie accumulée dans une inductance :

L'élément I peut s'exprimer par deux causalités :

Causalité intégrale : $f = \frac{1}{I} \int e$, le *flux* est l'intégrale de l'effort.

Causalité dérivée : $e = I \cdot \dot{f}$, l'effort est la dérivée du flux.

2.3.4 Jonctions

a. Jonction 0

La jonction 0 est un élément de couplage qui permet de lier les éléments soumis à un même effort [20].

Les efforts sont égaux : $e_1 = e_2 = e_3 = e$

La somme des flux entrant est égal à la somme des flux sortants $f_1 = f_2 + f_3$

Le bilan de puissance est nulle

$$e_1 \cdot f_1 - e_2 \cdot f_2 - e_3 \cdot f_3 = 0.$$

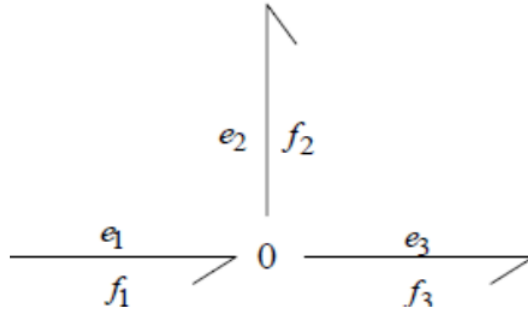


FIGURE 2.1 – Jonction 0

Exemple 5

Domaine électrique	Domaine mécanique
Alimentation par une source de tension d'une inductance et d'une résistance en parallèle.	Association en série d'éléments soumis à une même force.
<p>L'effort étant commun, ici la tension, la jonction 0 correspond à la mise en parallèle d'éléments. Nous retrouvons ici une source de tension S_e, un élément dissipatif R qui dissipera par effet Joule.</p>	<p>L'amortisseur est considéré sans masse, les forces sont identiques à chaque extrémité. L'amortisseur est animé de la vitesse $V = V_1 - V_2$ et perdra une puissance $b.V^2$.</p>

b. Jonction 1

Pour une jonction 1, les flux sont communs, $f_1 = f_2 = f_3 = f$.

Et l'effort entrant est égal à la somme des efforts sortants $e_1 = e_2 + e_3$ [20].

Comme précédemment, le bilan de puissance est $e_1 \cdot f_1 - e_2 \cdot f_2 - e_3 \cdot f_3 = 0$.

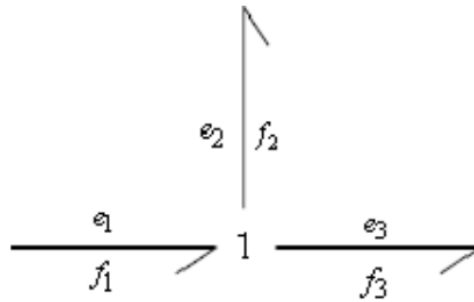
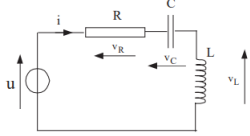
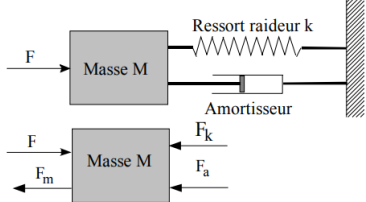
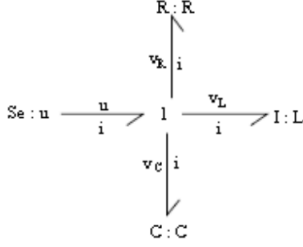
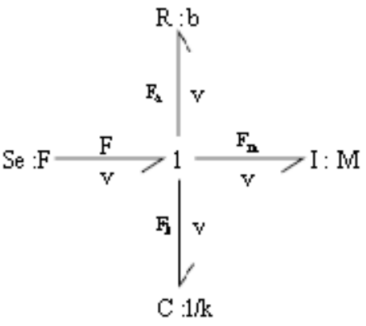


FIGURE 2.2 – Jonction 1

Domaine électrique	Domaine mécanique
<p>Une jonction 1 partageant le même flux, cela correspond en électricité à la mise en série de composants.</p>	<p>Considérons une masse reliée à un ressort et à un amortisseur conformément au schéma de principe suivant.</p>
	
	
<p>Avec cette jonction le courant est constant (flux). Les liens reliés aux éléments R, L et C traduisent respectivement les tensions aux bornes de la résistance, de l'inductance et du condensateur.</p>	<p>Pour cette jonction la vitesse est commune, ce qui traduit l'état d'équilibre de la masse M. Les liens permettant de prendre en compte la force motrice (source Se) et les forces résistantes du ressort et de l'amortisseur (liens reliés aux éléments R et C). La force d'inertie due à l'accélération correspond au lien aboutissant à l'élément I.</p>

Exemple 6

2.3.5 Éléments de transformation

a. Transformateur TF

C'est un élément composé de deux ports permettant des changements entre les flux et les efforts avec conservation de puissance [20].

Il est caractérisé par la relation suivante

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{f_2}{f_1} = m$$

Où m est le coefficient de transformation

Nous voyons bien à partir de cette relation que le transformateur TF conserve la puissance, en effet :

$$e_1 \cdot f_1 = e_2 \cdot f_2 = P$$

Ce transformateur sert à modéliser des transformateur électrique, en mécanique il modélise les engrenages, les leviers et les poulies.

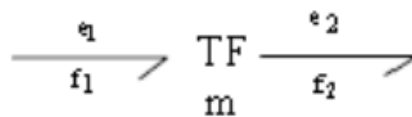


FIGURE 2.3 – Transformateur

Exemple 7

Domaine électrique	Domaine mécanique
Transformateur électrique	Transmission par courroie
<p>Pour un transformateur idéal sans pertes : m, représentant le facteur de transformation. $P = u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$ d'où $\frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2} = m$</p>	<p>L'absence des pertes implique puissance conservée. $P = C_{m1} \cdot \Omega_1 = C_{m2} \cdot \Omega_2$ donc $\frac{R_1}{R_2} = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{C_{m1}}{C_{m2}} = m$</p>

b. Gyrateur GY

C'est un élément à deux ports qui permet de transformer l'effort à un flux, et il est conservatif et est caractérisé par les équations [20] :

$$r = \frac{e_1}{f_2} = \frac{e_2}{f_1}$$

Le gyrateur prend en compte les changements dans le domaine physique qui s'établissent avec conservation de puissance.

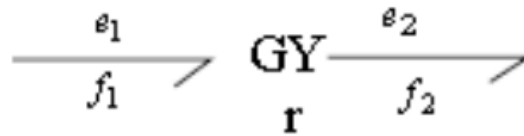


FIGURE 2.4 – Gyrateur

Exemple 8

Un moteur donne de l'énergie mécanique à partir de l'électrique.
Le couple d'un moteur à courant continu est proportionnel au flux de l'inductance F et au courant dans l'induit I .

$$C = K \cdot F \cdot I$$

La proportionnalité de la force contre- électromotrice au flux et à la vitesse est donné par la relation,

$$\hat{E} = K \cdot F \cdot \omega \text{ (} K \text{ constante technologique).}$$

Pour les variables électriques nous avons : effort $e_1 = \hat{E}$, flux $f_1 = I$. Pour les grandeurs mécaniques, effort $e_2 = C$ flux $f_2 = \omega$. Ainsi :

$$\hat{E} = K \cdot F \cdot \omega \equiv e_1 = K \cdot F \cdot f_2 \text{ et } C = K \cdot F \cdot I \equiv e_2 = K \cdot F \cdot f_1$$

2.4 Détecteurs

Un détecteur est un élément, qui placé au niveau dans un système montre l'existence d'un capteur ou d'un instrument de mesure idéal.

On peut distinguer deux types de détecteurs suivant le type de mesure appliqué et ceci dans le cas où le détecteur ne consomme aucune puissance [18] :

a. Pour l'effort : le détecteur est représenté par

$$\frac{e}{f=0} \rightarrow D_e$$

b. Pour le flux : le détecteur est représenté par

$$\frac{e=0}{f} \rightarrow D_f$$

2.5 Construction des modèles bond graphs

2.5.1 En application électrique

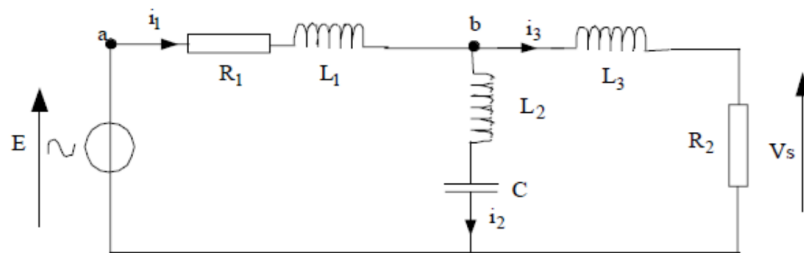


FIGURE 2.5 – Circuit électrique

la méthode est décrite par les étapes suivantes [4] :

1. Identification des composants des systèmes en question.
2. Identification, nomination des différents points du système où les variables d'effort sont distinctes. mettre une jonction 0 pour chacune de ces valeurs.
3. Placement des jonctions de valeurs 1 entre les jonctions de valeurs 0.
4. Respect du sens de transfert de la puissance lors de la liaison des jonctions.
5. Placement des composants essentiels existant dans le circuit, à l'extrémité de la liaison libre, ou sur la jonction visée.
6. Suppression des liaisons ayant un potentiel égale au potentiel déterminé pour référence, ensuite supprimer toutes les jonctions correspondant à deux lien ne causant pas un changement dans le signe.

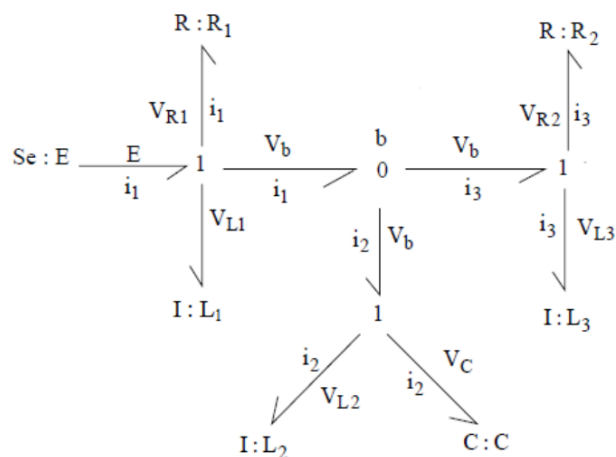


FIGURE 2.6 – Circuit électrique par bond graph

2.5.2 En application hydraulique

Un système hydraulique peut-être construit par un modèle bond graph comme suit [4] :

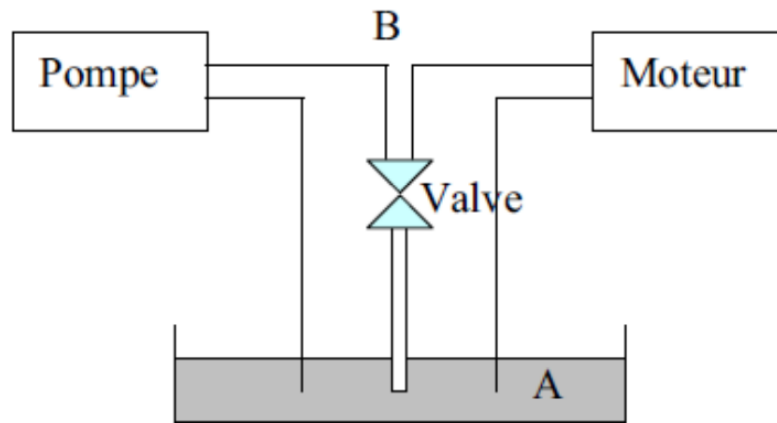


FIGURE 2.7 – système hydraulique

1. Fixation du sens de la direction du mouvement du fluide, ce sens sera choisi pour sens d'échange (transfert) de la puissance.
2. Recherche des nœuds de pressions différentes, et placement de jonction 0 par nœud.
3. Placement entre chaque couple de jonctions 0 une jonction 1 et attachement des composants subissant une différence de pression.
4. Respect du sens de transfert de la puissance lors de la liaison des jonctions.
5. Simplification en prenant une pression comme référence.

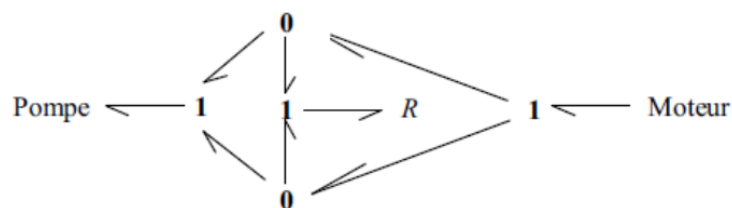


FIGURE 2.8 – Bond graph du circuit hydraulique

2.5.3 En application mécanique

Pour la construction d'un modèle Bond graph d'un système mécanique [4] :

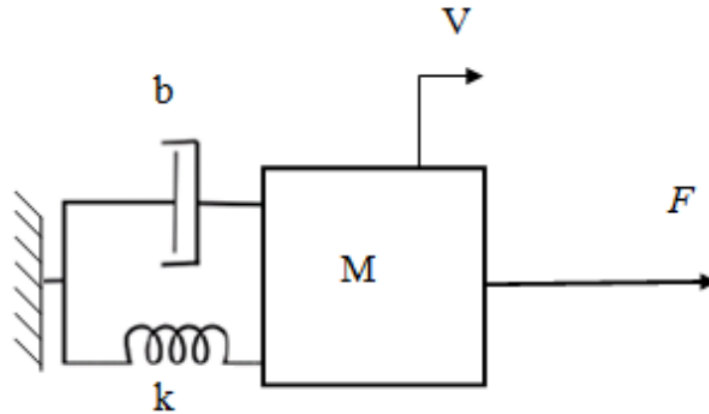


FIGURE 2.9 – Système mécanique masse-ressort

1. Identification de tous les éléments du système.
2. Identification et nomination des points du système dont les variables de flux sont distinctes (vitesse, courant). Pour toutes les valeurs du flux placer une jonction 1. Fixation d'un axe de référence pour le flux (vitesse).
3. Placement de jonction 0 entre les jonctions 1 afin de prendre en compte les relations existantes entre les efforts (tension, force).
4. Liaison des jonctions par des liens en respectant le sens de transfert de la puissance.
5. Placement des éléments de base présents dans le système, soit sur l'extrémité du lien libre associé, soit sur la jonction concernée.
6. Élimination des liens dont le potentiel correspond au potentiel choisi comme référence, puis l'élimination des jonctions 0 et 1 relatives à deux liens n'introduisant pas de changement de signe.

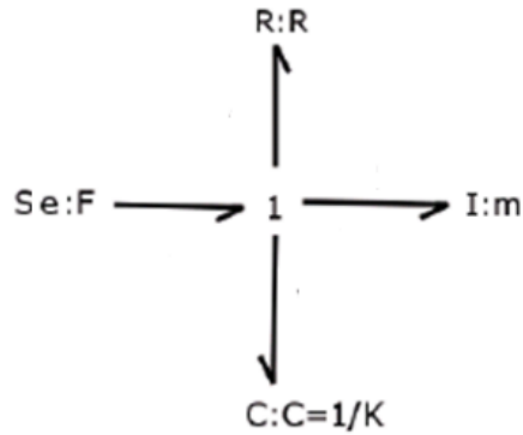


FIGURE 2.10 – Bond graph du circuit mécanique

2.6 Notion de causalité des bond graphs

Définition 2.1. *Pour mettre en évidence la relation de cause à effet dans un système et d'en tirer un modèle mathématique approprié, on fait appel à la notion de causalité. L'aspect graphique du modèle bond graph associé à la causalité peut être utilisé de façon directe pour analyser les propriétés du système physique, en parcourant le modèle bond graph causal suivant des chemins particuliers appelés chemins causaux.*

Considérons un système linéaire multivariable décrit par son équation d'état (7) :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du. \end{cases} \quad (7)$$

Où A, B, C et D sont des matrices de types respectifs $n \times n, n \times m, p \times n$ et $p \times m$.

(7) est le modèle d'état déduit du modèle bond graph, où $\dim x = n$ est le nombre d'éléments dynamiques (I ou C) en causalité intégrale quand le modèle bond graph est en causalité intégrale, $\dim u = m$ est le nombre d'entrées, sources d'effort ou de flux (S_e ou S_f), présentes dans le modèle bond graph et $\dim y = p$ est le nombre de sorties, détecteurs d'effort ou de flux (D_e ou D_f), présentes dans le modèle bond graph. On suppose que les bond graphs contiennent uniquement des liens de puissance (absence de signaux) et que l'équation d'état associée au modèle bond graph étudié est supposée linéaire.

Les différents vecteurs d'état, entrées et sorties utilisés sont représentés par l'équation ci-dessous.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{I_1} \\ p_{I_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{C_1} \\ q_{C_2} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{e_1} \\ S_{e_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ S_{f_1} \\ S_{f_2} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{e_1} \\ D_{e_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ D_{f_1} \\ D_{f_2} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}.$$

p_I et q_C sont des variables de moment généralisé et de déplacement généralisé associées respectivement aux éléments I et C.

Par abus de langage, un élément dynamique (I ou C) et sa variable dynamique associée x_i seront confondus [34].

2.6.1 Chemin causal

Un chemin causal, dans une structure de jonction d'un bond graph causal, est une alternance de liens et de nœuds entre un élément de la famille (S_e, S_f, I, C, R) et un élément de la famille ($1, C, R, D_e, D_f$), telle que deux liens de ce chemin, au niveau d'une même jonction, présentent des orientations causales opposées (sauf en présence d'une jonction GY) [5].

Définition 2.2. Si un chemin causal est parcouru en suivant toujours la même variable alors il est dit simple. Il y a pour une séquence fixée de liens et de nœuds, deux chemins parcourant soit l'effort soit le flux (figure 2.11), [13].

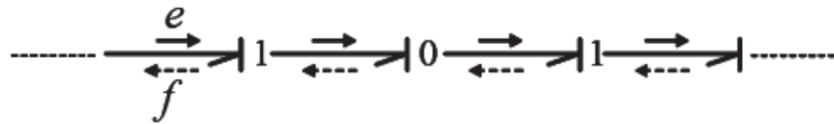


FIGURE 2.11 – Chemin causal simple

Définition 2.3. Si lors du parcours, on doit changer de variable, le chemin est dit mixte. Ainsi en présence d'un gyrateur GY, le chemin est mixte direct. Et quand il faut traverser un élément R, C ou I, le chemin est mixte indirect [13].

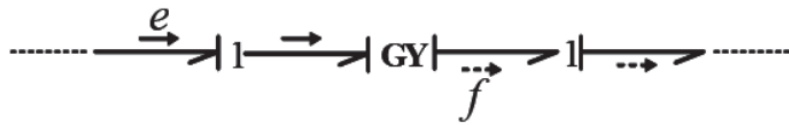


FIGURE 2.12 – Chemin causal mixte direct

2.6.2 Causalité des éléments bond graphs

Il existe plusieurs causalités qui caractérisent les éléments bond graphs [18].

- Causalité des sources

La source d'effort impose l'effort, donc la causalité est imposée (figure 4.20).



FIGURE 2.13 – Causalité imposée par la source d'effort

La source de flux impose le flux, rendant ainsi la causalité contraignante (Figure 2.14).

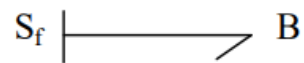


FIGURE 2.14 – Causalité imposée par la source de flux

- Causalité de l'élément R

La causalité de l'élément R est qualifiée d'indifférente. On distingue deux types : [20] :

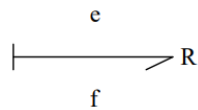


FIGURE 2.15 – Causalité résistance

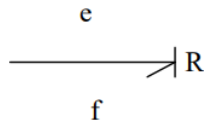


FIGURE 2.16 – Causalité conductance

la première causalité R reçoit le flux f et renvoie l'effort e (figure 2.15)
l'équation associée à la figure 2.15.

$$e = R.f$$

la seconde causalité R reçoit l'effort e et renvoie le flux f (figure 2.16).
l'équation associée à la figure 2.16

$$f = \frac{1}{R}.e$$

- Causalité de l'élément I

Deux types de causalité sont possibles :

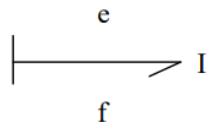


FIGURE 2.17 – Causalité dérivée

L'équation associée à la figure 2.17 :

$$f = \frac{df}{dt}.I$$

L'équation associée à la figure 2.18 :

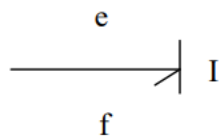


FIGURE 2.18 – Causalité intégrale

$$f = \frac{1}{I} \int c.dt$$

- Causalité de l'élément C

Deux types de causalité sont possibles :

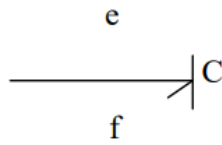


FIGURE 2.19 – Causalité dérivée

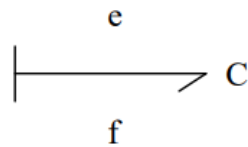


FIGURE 2.20 – Causalité intégrale

L'équation associée à la figure 2.19 :

$$e = \frac{1}{C} \int f \cdot dt$$

L'équation associée à la figure 2.20 :

$$f = C \cdot \frac{de}{dt}$$

- Causalité de la jonction 0

La jonction 0 représente une égalité des efforts. Ainsi, un seul lien peut imposer l'effort à cette jonction, ce qui signifie qu'il n'y aura qu'un seul lien avec barre de causalité à cet endroit.

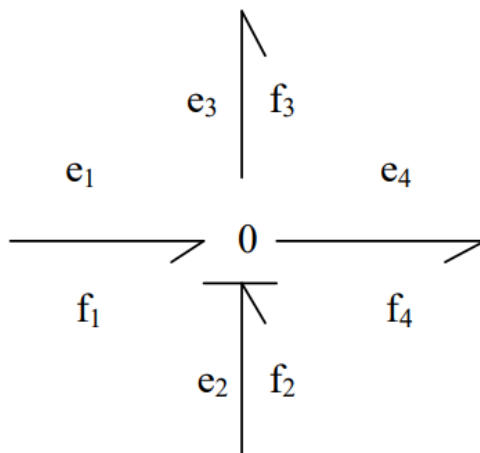


FIGURE 2.21 – Causalité de jonction 0

Les équations associées à la figure 2.21 :

$$e_1 = e_3 = e_4 = e_2$$

$$f_2 = -f_1 + f_3 + f_4$$

- Causalité de la jonction 1

La jonction 1 représente une égalité des flux. Par conséquent, un seul lien peut imposer son flux à cette jonction, ce qui signifie qu'il n'y aura qu'un seul lien sans barre de causalité à cet endroit.

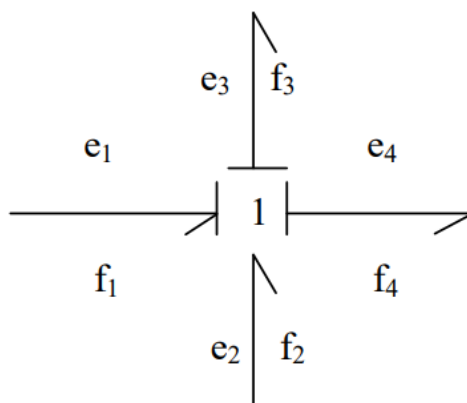


FIGURE 2.22 – Causalité de jonction 1

Les équations associées à la figure 2.22 :

$$f_1 = f_3 = f_4 = f_2$$

$$e_2 = -e_1 + e_3 + e_4$$

- Causalité de transformateur

Deux situations peuvent se présenter en fonction de si le lien d'entrée impose un flux ou un effort.

Considérons que le flux f_1 est imposé à l'entrée (figure 2.23).

Considérons que l'effort e_1 est imposé à l'entrée (figure 2.24).

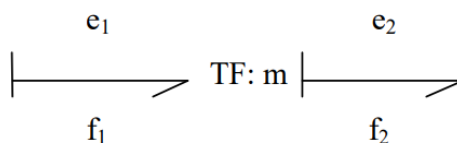


FIGURE 2.23 – Première causalité associée à un TF.

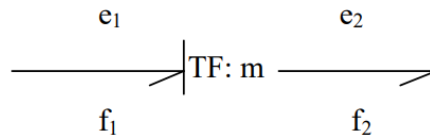


FIGURE 2.24 – Deuxième causalité associée à un TF

Les équations qui correspondent à la figure 2.23 sont :

$$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$$

Les équations qui correspondent à la figure 2.24 sont :

$$\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$$

- Causalité de gyrateur GY :

Deux situations peuvent se présenter en fonction de si le lien d'entrée impose un flux ou un effort. Considérons que le flux f_1 est imposé à l'entrée (figure 2.25), Considérons que l'effort e_1 est imposé à l'entrée (figure 2.26).

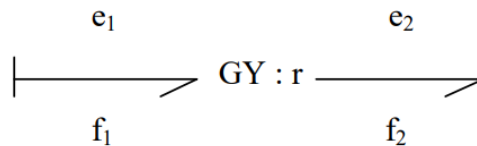


FIGURE 2.25 – Première causalité associée à un GY

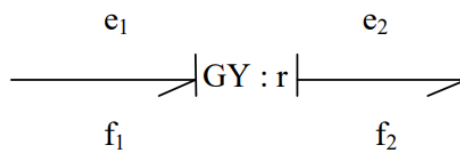


FIGURE 2.26 – Deuxième causalité associée à un GY

Les équations qui correspondent à la figure 2.25 sont :

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

Les équations qui correspondent à la figure 2.26 sont :

$$\begin{cases} f_2 = \frac{1}{r}.e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r}.e_2 \end{cases}$$

2.7 Règles d'affectation de la causalité

Le mécanisme d'affectation des causalités SCAP (Procédure d'application de causalité séquentielle) s'effectue de la manière suivante [13] :

1. Assigner la causalité aux sources..
2. Établir les éléments « I » et « C » en causalité intégrale, puis assigner la causalité aux « R » non-linéaires et en répercuter les effets sur l'environnement. On s'efforcera toujours d'attribuer aux éléments « C » et « I » une causalité liée à une loi de type intégrale, car il est plus simple et plus fiable d'intégrer que de dériver.
3. Assigner les causalités aux jonctions 0, 1, TF et GY tout en tenant compte des contraintes causales.
4. Assigner les causalités aux éléments « R » linéaires selon les possibilités restantes.
5. Identifier les conflits de causalité. En cas de conflit, revenir au point 2 et ajuster la causalité sur l'élément « I » ou « C » à l'origine du conflit. Il arrive parfois qu'il soit nécessaire d'ajouter des éléments « C » ou « I » (représentant un phénomène physique) afin d'obtenir une causalité intégrale.

Deuxième partie

Diagnostic par bond graph

2.8 Diagnostic d'un système par bond graph

Le monde industriel maîtrise largement le contrôle et la régulation industrielle, la surveillance en ligne est peu développée. Elle est souvent réduite au suivi de paramètres ou gestion d'alarmes en utilisant une limitation de variables. Les algorithmes de monitorabilité et localisabilité des défaillances en ligne, également appelés Fault Détection & Isolation (FDI), jouent un rôle essentiel dans l'amélioration du fonctionnement sûr des systèmes. On met en place des systèmes de surveillance qui visent à être en mesure, à n'importe quel moment, de décrire l'état de fonctionnement des divers composants d'un système technologique. L'opérateur de supervision gère deux types d'informations, à la fois en ce qui concerne la détection et l'isolation des fautes (FDI) et la tolérance aux fautes (FTC : Fault Tolerant Control). Le premier traite la détection et de l'élimination des défauts dans l'installation, tandis que le second présente les différentes options pour maintenir ou arrêter le processus. Le fondement de la « FDI » et la « FTC » est résumé dans la figure 1.3. En ce qui concerne la FTC, il est possible de distinguer deux approches l'une passive et l'autre active [31]. Celle qui est passive repose sur la méthode de commande robuste qui cherche à établir des régulateurs insensibles aux erreurs pour les systèmes contrôlés en boucle fermée [15]. Les algorithmes de « FDI » ne fournissent aucune information sur les défaillances, et la structure du système n'est pas modifiée. Toutefois, l'approche active, comme son nom l'indique, exploite en temps réel les données du module « FDI » afin d'ajuster le système à sa nouvelle situation en cas de dysfonctionnements [35], [43].

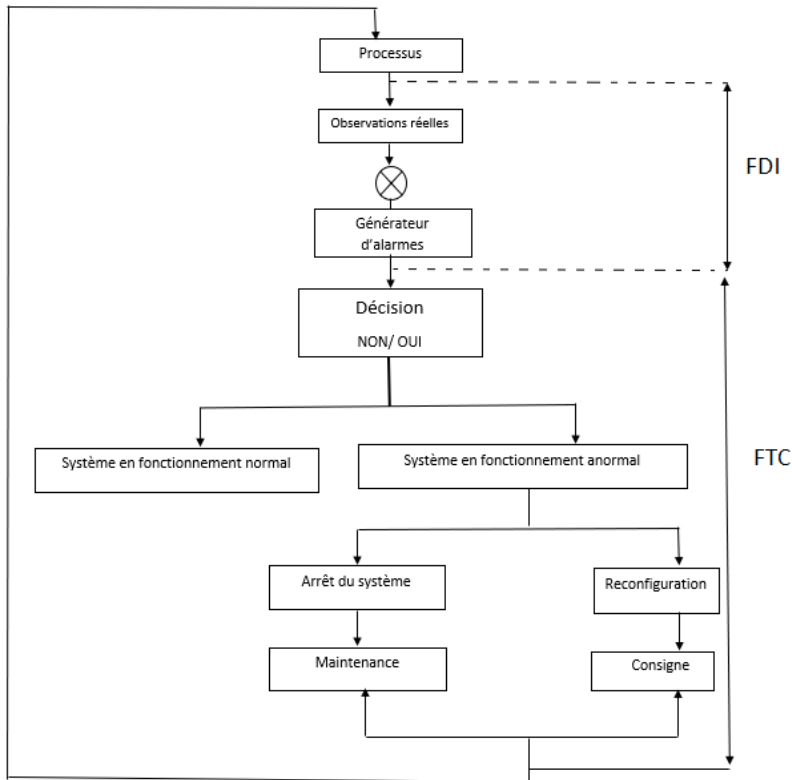


FIGURE 2.27 – Schéma de principe de la supervision

Définition 2.4. Dans le domaine industriel un processus est une collection fonctionnelle d'éléments technologique reliés les uns au autre de manière à constituer un corps unique capable d'accomplir une activité industrielle définie au préalable. [44]

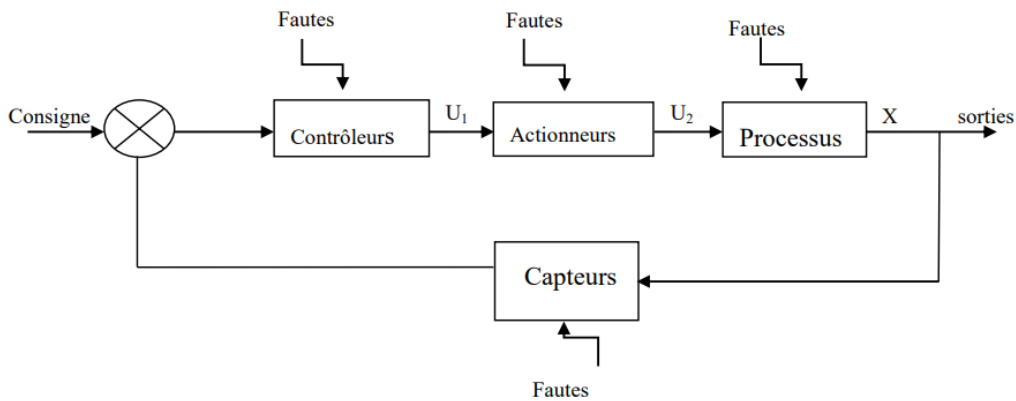


FIGURE 2.28 – Fonctionnement d'un système régulé

Définition 2.5. Un composant ou un élément industriel est une composante d'un système industriel. Il est possible que cela soit impacté par des pannes (voir figure 1.3).

Définition 2.6. une perturbation ou une déviation d'une variable ou d'un paramètre calculée par rapport à une valeur fixé est appelée faute ou défaut [43].

Définition 2.7. *Une panne est un arrêt permanent de la capacité du système à réaliser le travail prédit.*

Définition 2.8. *Le diagnostic des processus facilite l'identification des causes de la défaillance. Son objectif est la fourniture de la prédiction et l'information sur l'instant et la grandeur de la défaillance [32].*

2.9 Bond graph et surveillance des systèmes

Dans le cadre d'une représentation par approche bond graph, on peut identifier principalement deux aspects : le premier concerne le transfert de l'énergie et la puissance, générer par le processus et les actionneurs. La deuxième partie se concentre sur les signaux, incluant le système d'information, en d'autres termes le système de régulation et les capteurs. La partie énergétique du système est représentée par la modélisation bond graph. La modélisation du processus se fait par les éléments du bond graph (C,I,R,J1,J0). Les source d'effort et de flux permettent de modéliser les différents types de sources, électriques, thermiques,...

On peut utiliser les source d'effort soit simple de ou modulées (MSe, MSf), Cela signifie qu'elles sont pilotées par un signal externe émis par un agent ou un contrôleur. Il existe deux méthodes bond graph pour la surveillance des systèmes : une méthode qualitative et l'autre quantitative [43].

2.9.1 Méthode qualitative

un modèle trop détaillé n'est pas exigé pour cette méthode. Comparés aux méthodes conventionnelles de représentation des informations et connaissances qui utilisent divers outils comme les schémas bloc ou les équations différentielles pour décrire la structure et état d'un système, les bond graphs qualitatifs se limitent à la description de la disposition des composants et de leurs connexions. La surveillance fondée sur les bonds graphs qualitatifs est plus simple par rapport aux approches quantitatives, puisqu'elle n'exige pas de modèle fixé. Ces représentations qualitatives sont élaborées indépendamment des paramètres spécifiques du système. elles se fondent sur des valeurs de l'ensemble $\{1, +, 0, -, -1, ?\}$. Les opérateurs sont donc qualitatifs et sont définie par les opérations sur les nombres réels : $+, -, \times, \div, =$. Le système d'équations qualitatives est résolu dans le but d'identifier la cause des défaillances.

Des analyses se basent sur les problèmes d'état linéaires en vue de trouver les causes principales de défaillances. L'avantage de cette méthode réside dans le faite qu'elle n'exige pas des informations approfondie de l'état du système et des valeurs paramétriques [43].

2.9.2 Méthode quantitative

Celle-ci repose sur la comparaison entre l'état normal du système et le comportement du modèle numérique. au contraire de à la qualitative, cette méthode s'appuie sur des lois

et équations physiques et nécessitant ainsi une analyse approfondie du système, ainsi que la connaissance des valeurs des paramètres. Les représentations, quelle que soit leur forme (fonction de transfert, équations d'état, etc.), sont élaborés à partir de lois physiques fondamentales ou par identification statistique des paramètres. Depuis 1995, l'approche bond graph quantitative est directement mise dans la conception des systèmes de surveillance. Cette approche présente beaucoup d'avantages comparée aux méthodes s'appuyant sur les observateurs, notamment la clarté de la compréhension des relations de redondance analytique (RRA). En effet, ces relations correspondent directement aux relations et variables affichées par l'approche bond graph. Ces relations sont directement dérivées de cette représentation graphique et peuvent être exprimées sous forme symbolique, ce qui facilite leur intégration informatique. [43].

2.10 Procédure de génération des RRAs

L'algorithme suivant génère des relations de redondance analytiques de manière automatique utilisant un modèle bond graph :

1. Convertir le modèle bond graph en causalité intégrale au causalité dérivée préférentielle BGD.
2. Former les équations du modèle : état des mesures, des sources, des commandes et des jonctions.
3. Dans chaque équation de jonction 1 ou 0 ayant un détecteur ou plus.
 - Supprimer les inconnues en suivant des chemins causaux sur le modèle bond graph.
 - Déduire une RRA pour tout détecteur à causalité inversée.
 - Déduire une RRA pour tout détecteur ayant une causalité ne pouvant pas être inversée en mettant sa sortie à égalité avec celle d'un détecteur de même nature (redondance matérielle) [43].

2.11 Représentation de signature des défaillances

La structure des relations de redondance analytique (RRA) se présente sous la forme d'une matrice booléenne S , qui indique la susceptibilité des résidus aux défauts des composants du système physique, tels que les capteurs, les actionneurs, les régulateurs. Les coefficients de la matrice S sont établis par :

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

S est connue sous le nom de matrice de signatures des défaillances, fournit les informations nécessaires pour localiser les défaillances détectées pendant le fonctionnement du système. La procédure de localisation, ou d'isolation a pour but de présenter à l'agent les

différents composants défectueux. On associe à chaque élément une signature décrite par un vecteur dans la matrice. Une panne d'un composant est détecté si la variable liée à ce composant apparaît dans des relations de redondance analytiques (RRAs) correspondant à des résidus. Pour qu'une défaillance soit localisable, sa signature doit être unique, c'est-à-dire distincte de celles des autres composants [43].

	Défaillances affectant les composants				
	$COMP_1$...	$COMP_j$...	$COMP_n$
RRA_1	S_{11}	...	S_{1j}	...	S_{1n}
...
RRA_i	S_{i1}	...	S_{ij}	...	S_{in}
...
RRA_i	S_{i1}	...	S_{ij}	...	S_{in}

FIGURE 2.29 – Vecteurs de signatures des composants

La matrice MSF est obtenue en ajoutant deux lignes supplémentaires. Les colonnes de la matrice obtenue s'appellent vecteurs de signature de l'élément correspondant $COMP_j$. On ajoute une ligne de la détectabilité D_b et une autre pour l'isolabilité I_b . L'élément $D_b(j)$ est égal à 1 si la variable $COMP_j$ se trouve dans une RRA (au plus). si $I_b(j) = 1$ alors il y a unicité de vecteur de signature correspondant à la variable de rang j . Lorsqu'une variable est en panne, elle peut être immédiatement identifiée et localisée. La matrice MSF constitue une méthode très efficace pour l'évaluation de la surveillance, surtout si les vecteurs de signature des éléments sont tous distincts deux à deux [43].

	Défaillances affectant les composants				
	$COMP_1$...	$COMP_j$...	$COMP_n$
RRA_1	S_{11}	...	S_{1j}	...	S_{1n}
...
RRA_i	S_{i1}	...	S_{ij}	...	S_{in}
...
RRA_m	S_{m1}	...	S_{mj}	...	S_{mn}
D_b	0	...	1	...	1
I_b	1	...	0	...	0

FIGURE 2.30 – Matrice de signature des fautes

2.12 Conclusion

Les bond graphs mettent en lumière l'importance de cet outil en ingénierie pour la modélisation et l'analyse des systèmes dynamiques. Ils offrent une description graphique puissante des interférences énergétiques entre les composants d'un processus, permettant une conversion efficace des processus en une représentation d'espace d'états. Nous venons de voir l'approche bond graph, ses éléments et ses caractéristiques, nous avons aussi parlé des propriétés de la causalité et citer quelques exemples. Les bond graphs jouent un rôle important dans la modélisation, la simulation et la surveillance des systèmes physiques. Mais aussi la classification des variables par le concept de degré d'observabilité, ainsi le placement de capteurs qui vont être introduit dans le suivant chapitre.

Chapitre 3

Degré d'observabilité et placement de capteurs

3.1 Introduction

Les bond graphs ont été, à l'origine, utilisés pour modéliser des systèmes physiques. L'idée d'utiliser une représentation unique (bond graph) pour modéliser, analyser et synthétiser des lois de commande en exploitant les relations causales, est récente. Il existe un énorme intérêt pour la sélection de ce modèle pour la surveillance, la détection et la localisation des défauts. Les performances du système surveillé dépendent principalement de l'architecture de l'instrument. Il se compose d'un ensemble de composants à surveiller trouvés dans la spécification.

3.2 Classification des variables d'un système

Dans un modèle bond graph, nous employons deux types de détecteurs le détecteur d'effort et de flux dans le but de mesurer les éléments (les variables) d'un système [6]. On peut distinguer deux types essentiels deux variables (éléments) : les variables mesurées et celle déductibles.

- Les variables mesurées sont connectées au capteur par un chemin causal direct, on peut lire la valeur directement en utilisant les détecteurs.

- Les variables déductibles, quant à elles, sont celles dont la valeur ne peut être déterminée que par le biais d'autres variables ces variables sont liées aux détecteurs par des chemins causaux indirectes [3].

Règle 1

La variable mesurée est considéré estimable (redondante) si elle fait partie à au moins deux chemins causaux directes qui mènent à deux capteurs différents.

Règle 2

Une variable mesurée est considéré non estimable si elle fait partie à un chemin causal unique aboutissant à un capteur [3].

Règle 3

Une variable est non mesurée et déductible, si elle fait partie à deux chemins causaux indirects au moins menant à un détecteur [3].

Règle 4

Une variable est considérée non mesurable et non déductible (non estimable) si il n'y a aucun chemin conduisant à un capteur [3].

Principe :

Les variables faisant partie d'un chemin causal menant à un détecteur sont de redondance de degré zéro (elles ont un degré d'observabilité nul) [3].

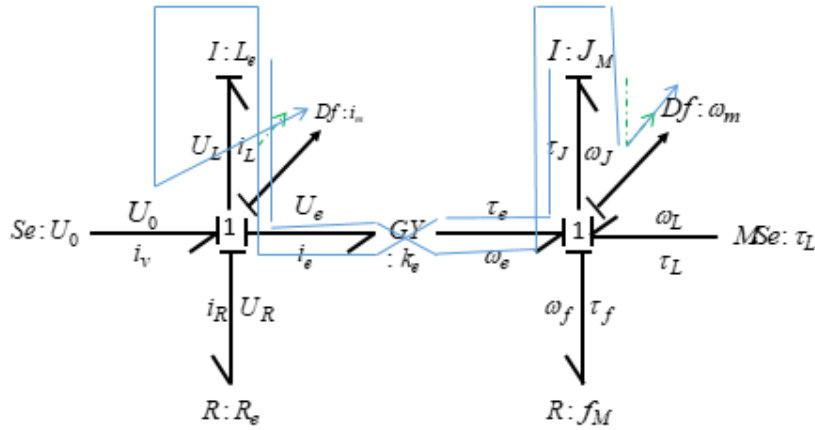


FIGURE 3.1 – chemin causal des variables mesurables

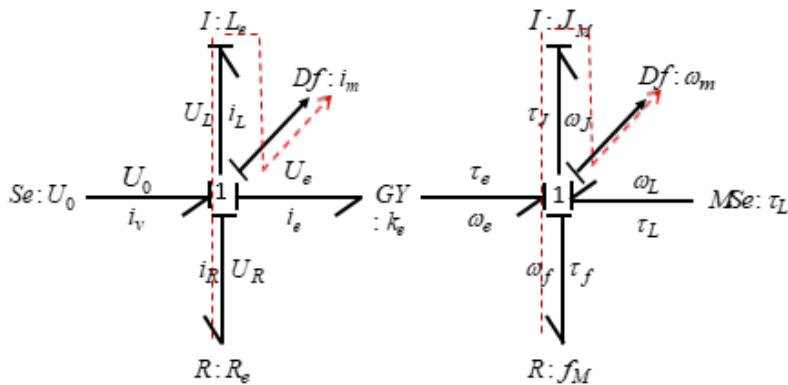


FIGURE 3.2 – Chemin causal des variables déductibles

3.3 Degré d'observabilité (degré de redondance)

le concept de degré d'observabilité revêt une grande importance pour différencier les variables observables aux variables non observables.

Pour une variable le degré d'observabilité est défini par le nombre de détecteurs, ayant une liaison avec cette variables, moins un. Une variable liée à un détecteur au plus est observable. A noter que le degré redondance indique le nombre de détecteurs (capteurs) ayant une liaison avec la variable au moyen de chemins causaux disjoints[3] [41].

Il existe deux niveaux de redondances, à savoir :

3.3.1 Observabilité minimale

Une variable est redondante de degré 0, s'il existe au moins une configuration (ou plus) dans laquelle un détecteur défaillant dans le processus rend inaccessible la variable concernée [3] [23] [33].

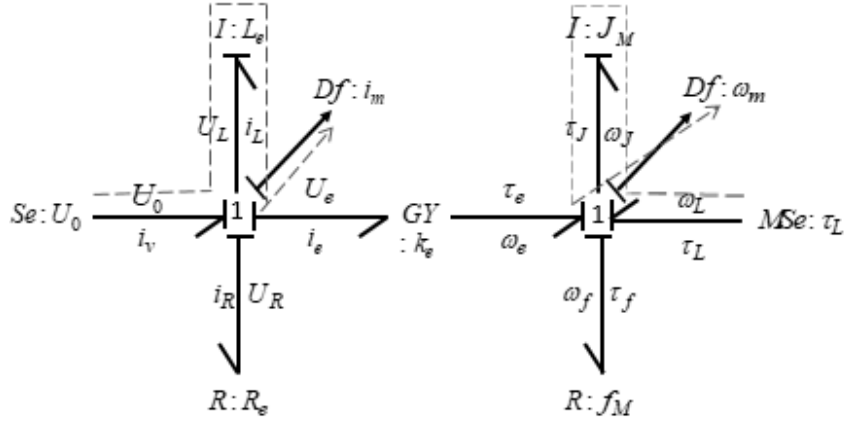


FIGURE 3.3 – Chemin causal des variables déductibles

3.3.2 Observabilité de degré quelconque

Une variable est dite redondante ou observable de degré k si elle est observable et sa valeur peut être déduite quoique k capteurs du système défailent. La mesure du niveau de redondance d'une variable est réalisée en utilisant la règle 1 suivante [3] [23] [33].

Lemme 3.1. *Si une variable admet un degré d'observabilité nul alors elle est observable. Si elle a un degré d'observabilité égale à $k \geq 1$ alors elle est surveillable.*

On applique ces notions à n'importe quel processus contenant de nombreuses variables avec des degrés d'observabilité variés. Effectivement, on note que le degré d'observabilité d'un système est défini comme étant le minimum des degrés de ses éléments. Ainsi, il est possible de conclure qu'un processus observable possède un degré d'observabilité nul et qu'un processus de degré $k > 0$ est surveillable. Les définitions vues plu-haut servent à définir une variable en fonction du degré de redondance qui témoigne de sa disponibilité en ce qui concerne la localisation des capteurs [3] [36].

3.4 Surveillabilité

La mise en place d'un capteur est primordiale pour concevoir les systèmes de diagnostic intégrés, ceci est dû au fait que la surveillabilité d'un processus industriel est liée au nombre de capteur et leur positionnement(placement). La nature du placement de capteurs est (combinatoire), ou graphique (manuelle) sur le bond graph [14].

Voici le résumé de toutes les définitions dans la figure 3.4 ci-dessous

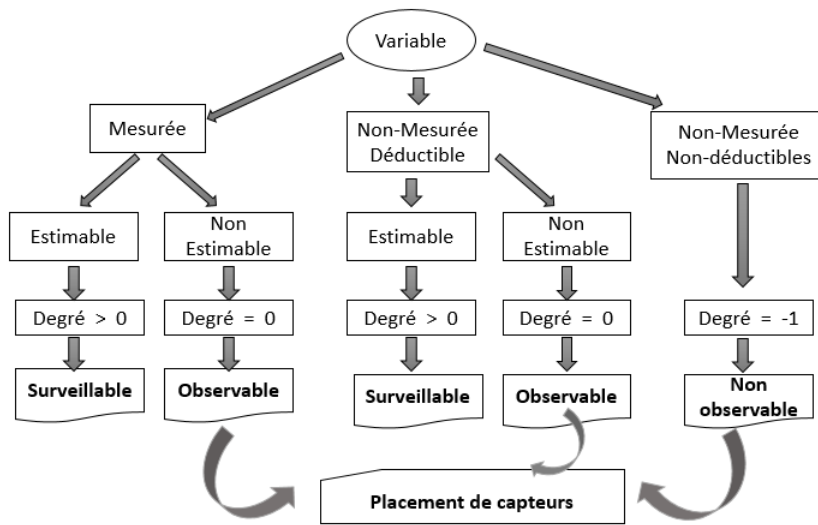


FIGURE 3.4 – Classification des variables

3.5 Comparaison entre la théorie des graphes et bond graph

Les résultats suivants sont obtenus à partir des recherches dans la théorie des graphes et sont comparés à ceux obtenus par bond graph comme le montrent les tableaux ci-dessous [3].

Théorie des graphes	Bond graphs
Nœuds	Éléments BG (R,C,I,0,1,TF,GY,Se,Sf)
capteurs	De,Df
arcs	Bonds
Chemin	Chemin causal
Circuit	Boucle causale
cycle	chemin causal vers un capteur

3.6 Conclusion

Nous venons de voir la classification des différentes variables d'un système linéaire et nous avons défini et expliqué le concept de degré d'observabilité et ses différents types. On a également évoqué l'intérêt du placement de capteurs sur un système linéaire modélisé par un bond graph et son rôle pour déterminer une méthode en vue de la surveillance des composants.

En plus, une comparaison entre la théorie des graphes et les bond graphs a été établie. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation d'un système hydraulique en utilisant le logiciel Symbols Shakti.

Chapitre 4

Modélisation par logiciel Symbols

4.1 Introduction

Le logiciel Symbols est un outil utilisé pour simuler et modéliser des processus dynamiques en utilisant l'approche bond graphs. Il est souvent utilisé en conjonction avec d'autres logiciels tels que Matlab Simulink et 20-sim pour la conception et l'analyse de systèmes complexes. Les bond graphs sont des représentations symbolique et graphique des systèmes industriels qui permet de visualiser les interactions entre les différents composants et de déduire les équations d'équilibre et de comportement. Le logiciel Symbols offre une boîte à outil "ModelBuilder" qui permettent de générer automatiquement les équations d'équilibre à partir du modèle bond graph. Ces équations peuvent être utilisées pour simuler le comportement du système dans différentes conditions et pour détecter les défaillances potentielles. Le logiciel Symbols est donc un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes physiques complexes, en particulier dans les domaines de la mécanique, de l'électricité et de l'hydraulique. Il est utilisé pour la génération de modèles TLF (Transformations Linéaires Fractionnaires), des relations de redondances analytiques et des matrices de signature des défauts selon un cahier des charges établi. La mise en place adéquate des détecteurs (capteurs) peut être considérée pour renforcer la surveillance des processus industriels.

Symbols peut être utilisé pour la modélisation des systèmes de supervision en offrant une interface conviviale et des fonctionnalités avancées pour la création de modèles bond graphs. Voici comment le logiciel Symbols peut être utilisé pour la modélisation des systèmes de supervision :

1. Création de Modèles bond graphs : Symbols permet de créer des modèles bond graphs afin de représenter les interactions énergétiques entre les éléments d'un système de supervision.
2. Visualisation des Interactions : Le logiciel Symbols offre une représentation graphique claire des interactions entre les différents éléments d'un processus, facilitant la compréhension de la dynamique du système de supervision.
3. Génération d'Équations d'Équilibre : Symbols permet de générer automatiquement les équations d'équilibre à partir du modèle bond graph, ce qui facilite l'analyse et la simulation du système de supervision.
4. Optimisation du placement des capteurs : En utilisant Symbols, il est possible d'optimiser la en place des détecteurs (capteurs) pour améliorer la surveillance et le contrôle en temps réel du système.

En résumé, on retient que le logiciel Symbols est un outil efficace pour la modélisation des processus ou systèmes de supervision en ligne, offrant des fonctionnalités avancées pour la création de modèles bond graphs, la visualisation des interactions, la génération d'équations d'équilibre et l'optimisation du placement des capteurs pour une surveillance efficace et une gestion optimale des systèmes en ligne.

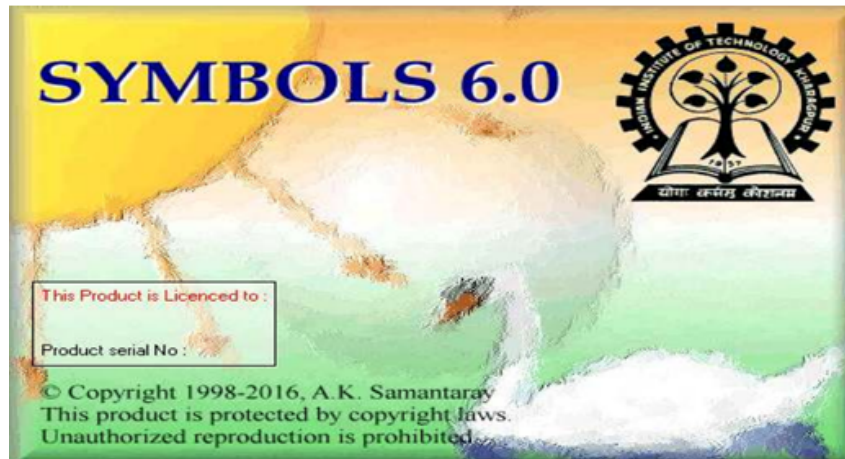


FIGURE 4.1 – Interface du logiciel « SYMBOLS 6.0 »

4.2 Propriétés du logiciel Symbols

Les principales fonctionnalités du logiciel Symbols sont les suivantes :

- Deux classes d'interconnexion sont considérées : la première des équations et la seconde graphique .
- la mise en place ou la suppression des capteurs et des composants permet l'adaptation de causalité.
- la détection, l'analyse et la localisation des défauts dans le modèle.
- il permet de regrouper des modèle afin de concevoir des nouvelles phases de composants.

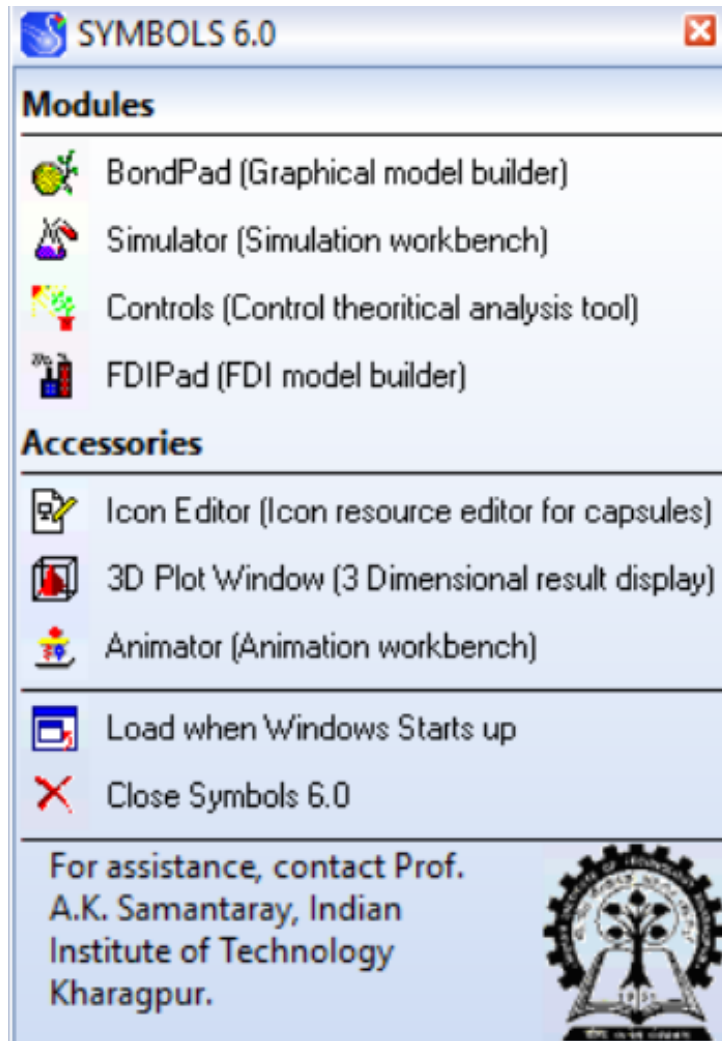


FIGURE 4.2 – Éléments Symbols

4.3 Modules du Symbols Shakti

Le logiciel Symbols contient des algorithmes intégrés distincts pour garantir des simulation rapide et donner des résultats spécifiques. La modélisation se fait de manière très simple et facile en utilisant les modules Bond Pad et FDI Pad qui permettent de construire une combinaison dans un modèle principal qui contient également, un modèle générique appelé capsules pour le but de la construction des modèle complexe.

Symbols est composé des modules suivants [22] :

4.3.1 Module BondPad

C'est le premier module sera utilisé pour la modélisation le système. Lorsqu'on ouvre BondPad, la fenêtre principale est affichée dans la figure (4.3). Une partie contient des objets (outils) permettant de dessiner et de modifier des modèles bond graphs d'obligations, ainsi qu'une autre partie de contient des capsules. Les capsules et les outils présenter dans

la partie d'objets permet la conception du modèle bond graph dans la zone au milieu. La zone d'expression permet d'afficher l'équation correspondant au modèle bond graph [22].

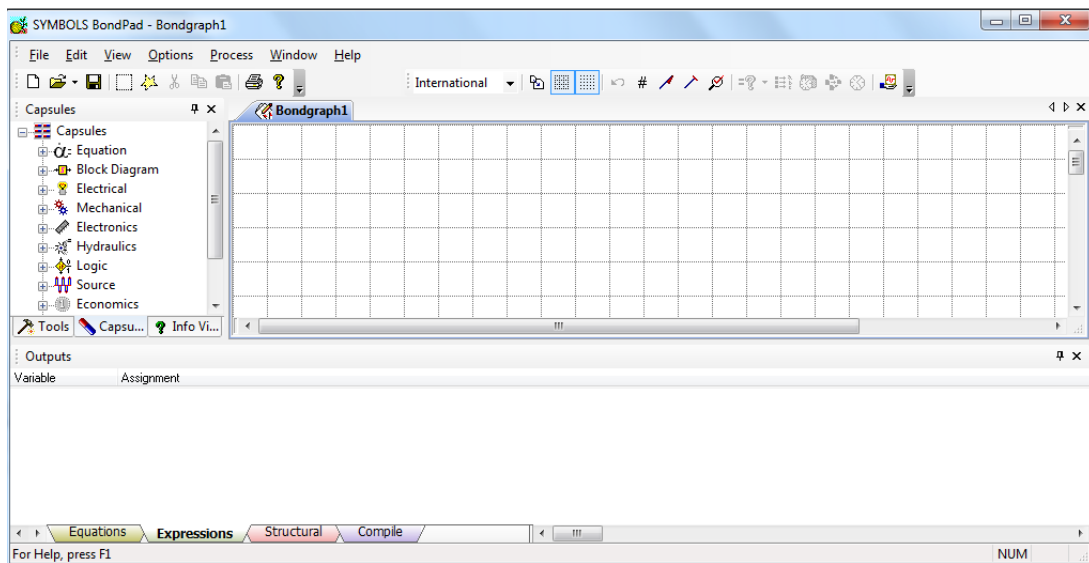


FIGURE 4.3 – Fenêtre du module bond-pad

4.3.2 Module FDIPad (constructeur de modèles graphiques)

L'objectif principal de cet outil est de décrire le comportement du processus et d'analyser ses propriétés. Structure permettant de dériver symboliquement les RRAs et de générer des signatures de défauts [22].

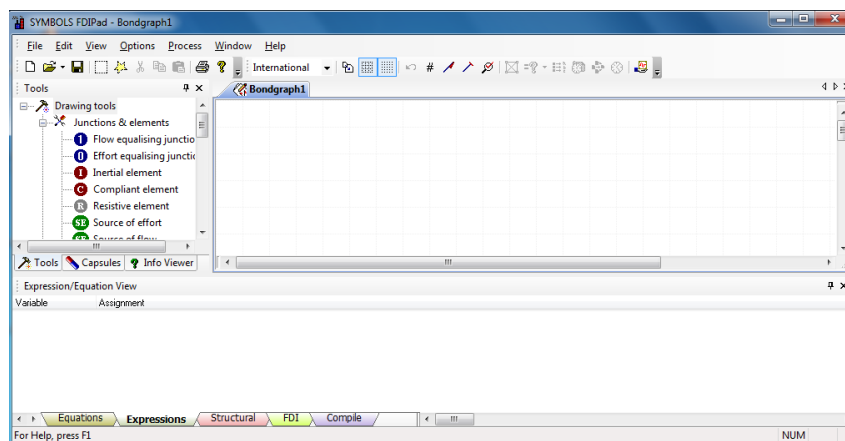


FIGURE 4.4 – Fenêtre du module Fdi-pad

4.3.3 Interface de simulation

Appelée aussi module du simulation, il est utilisé pour la résolution des équations dynamiques. Il aide les usagers en intervention dans la simulation. La fenêtre de ce module est illustrée dans la figure 4.5 :

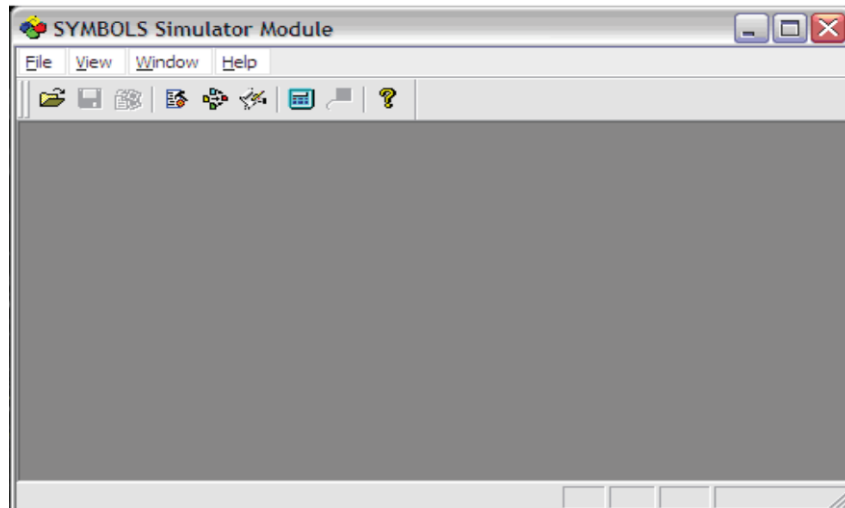


FIGURE 4.5 – Fenêtre du module simulateur

Le simulateur a un point d'entrée qui n'est autre que le fichier de définition de module (fichier.sym) généré par le module Bond Pad. Ce fichier est ensuite exécuté pour créer un fichier d'expérimentation du simulateur. Dès-que la compilation démarre, les messages d'erreurs et d'avertissements ainsi que l'état de la compilation sont affichés, voir la figure (4.6) :

A la fin de la compilation, on passe par des étapes suivantes pour tracer les graphes de simulation :

1. Affecter les valeurs des élément.
2. Affecter les valeurs initiales et les finales des graphes de simulation.
3. la commande START permet de faire la simulation [22].

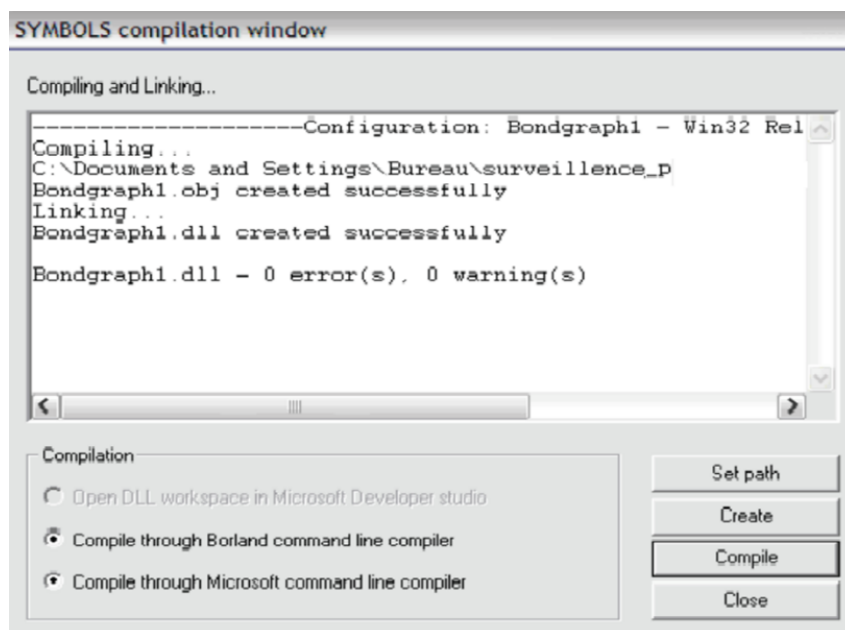


FIGURE 4.6 – Fenêtre de compilation

4.4 Création des capsules

Une capsule est un outils dérivé d'un bond graph. Elles englobes des informations sur son modèle interne, ses lois et équations, ses relations mathématiques et ses ports externes. Une capsule bien conçue est explicite, complète en elle-même et abstraite au niveau de l'implémentation finale du modélisateur [28].

4.4.1 Caractéristiques

Symbols Shakti nous permet la création des différentes capsules :

- Les capsules peuvent être contenues dans des modèles et apparaître plusieurs fois.
- Plusieurs capsules peuvent être contenues dans une même capsule.
- Les capsules sont numérotées automatiquement suivant le sens du transfert d'énergie.
- Les capsules génèrent la modélisation causale. Ces capsules représentent différentes options pour d'éventuelles relations causales. Une fois le modèle implanté, la capsule appropriée est insérée.
- On définit une capsule générique comme étant un ensemble de capsules apparentées dans différentes postures causales. Lorsqu'on implémente une capsule générique dans le modèle, selon les besoins variables des conditions aux limites décrites comme causalité, la capsule interne cachée est chargée de manière transparente pour l'utilisateur [17].

4.5 Étapes de création des capsules

1. Sous le module BondPad nous réalisons le modèle bond graph pour créer la capsule réservoir (tank).

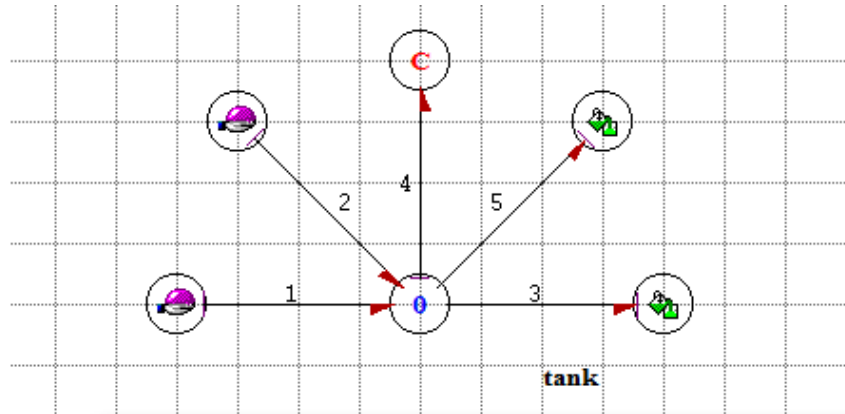


FIGURE 4.7 – Modèle de capsule Tank

2. La deuxième étape c'est la compilation du modèle pour vérifier s'il n'y a pas d'erreurs.

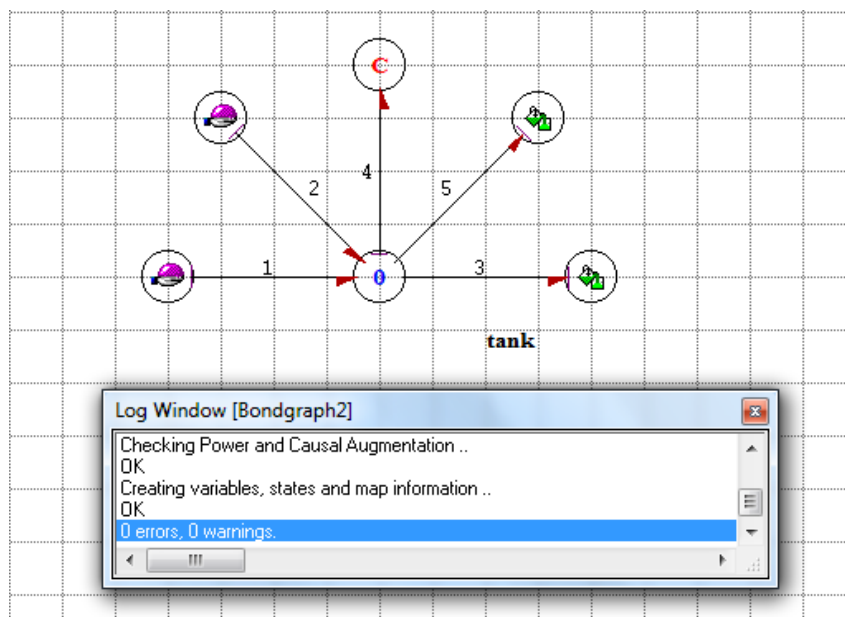


FIGURE 4.8 – Compilation du modèle

3. Enregistrement de modèle sous type 'Capsule file'.

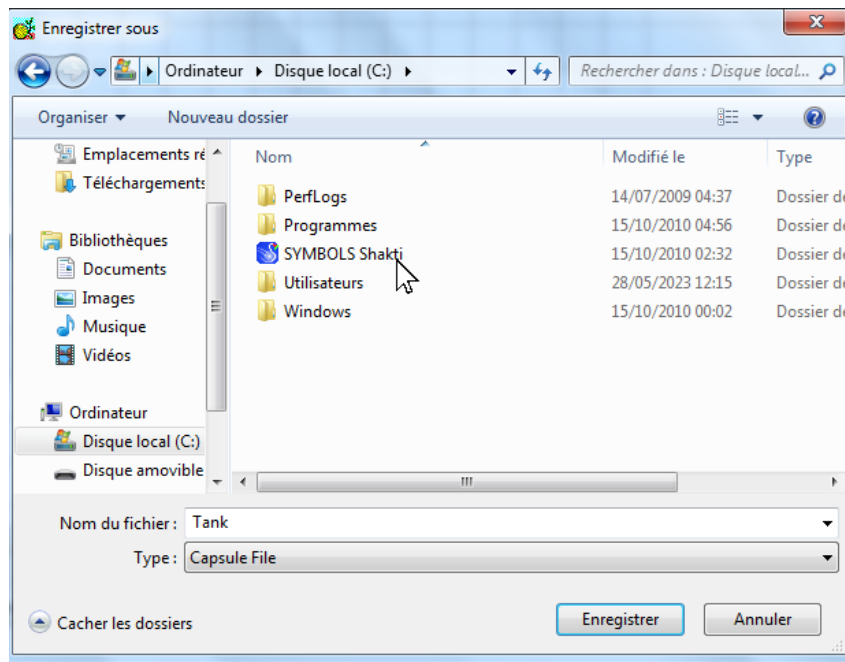


FIGURE 4.9 – Enregistrement du modèle

4. Enregistrer le modèle dans le dossier relatif aux capsules 'FDIOObjects' du logiciel Symbols.

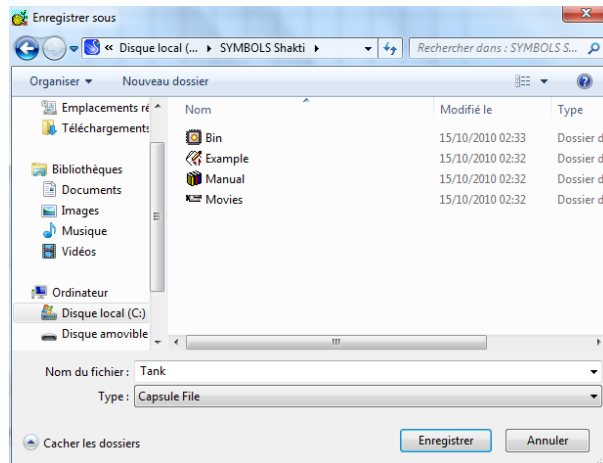


FIGURE 4.10 – Enregistrement du modèle

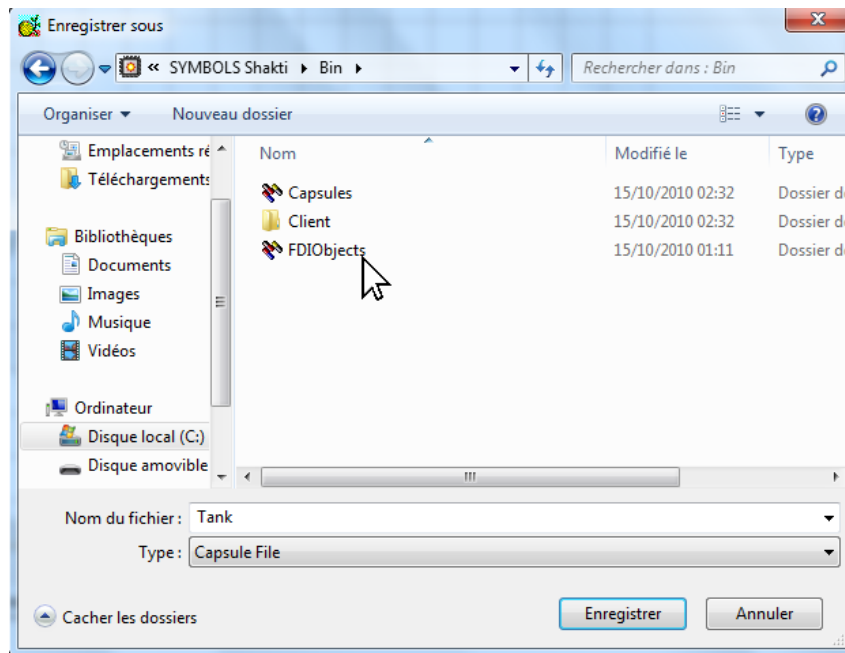


FIGURE 4.11 – Enregistrement du modèle

5. Placement automatique de la capsule créée dans la zone des capsules choisie [17].

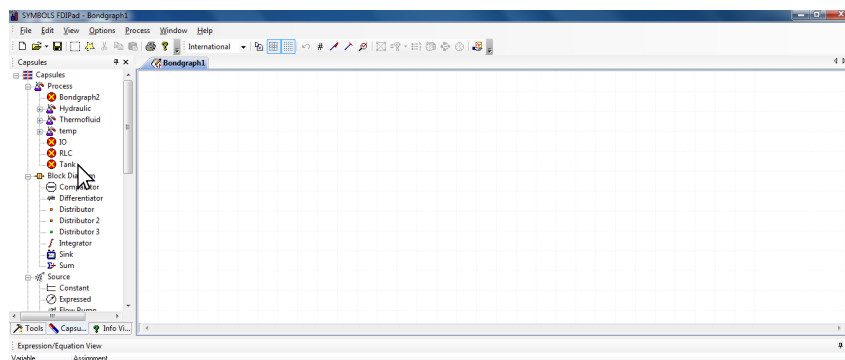


FIGURE 4.12 – Capsule créée

– Voici toutes les capsules d’un système hydraulique

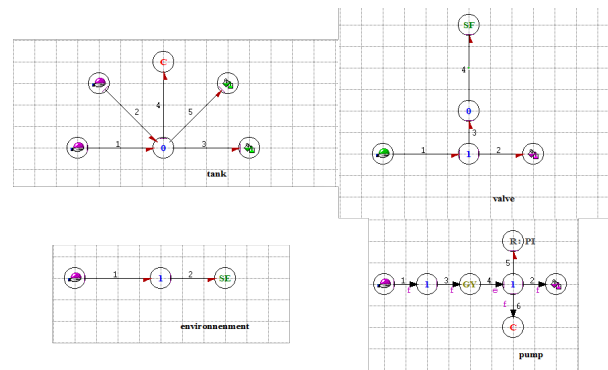


FIGURE 4.13 – Capsules d’un système hydraulique

4.6 Généralités sur les systèmes hydrauliques

4.6.1 Définitions

4.6.1.1 Fluide

Tout liquide utilisé comme moyen de transmission de puissance dans un système ou processus hydraulique s’appelle fluide ou huile hydraulique.

On distingue deux types de fluides :

- **Les liquides** : Ils sont utilisés en hydraulique pour de fortes pressions à cause de leur faible compressibilité.
- **Les gaz** : Sont des mauvais transporteurs d’énergie car ils sont très compressibles. [19].

4.6.1.2 Débit

C’est le rapport de la quantité de fluide traversant une coupe droite de la conduite par la temps nécessaire pour cet écoulement [7].

Les variables primaires d’un système hydraulique : masse, pression, débit massique.

Pour tout récipient contenant une masse de fluide M , le taux de changement de masse dans le conteneur doit être égal au débit d’entrée de masse totale Q_i moins le débit de masse total Q_0 :

$$\frac{dM}{dt} = Q_i - Q_0.$$

La masse de fluide M est liée au volume de fluide dans le récipient de volume V par l’équation :

$$M = \rho V$$

où ρ est la densité du fluide.

La pression hydrostatique à la base du réservoir est donnée par :

$$P = \rho g H.$$

Le débit Q_0 dépend de P et, pour le cas d'écoulement laminaire, est classiquement décrit par une équation de la forme :

$$Q_0 = \frac{P}{R}$$

où R la résistance de fluide [29].

4.6.1.3 Conformité des fluides

La conformité des fluides est similaire au ressort mécanique et au condensateur électrique. La relation constitutive de l'élément de conformité fluide doit être similaire à l'élément mécanique et électrique; c'est-à-dire que la pression (l'effort généralisé) doit être proportionnelle au déplacement de fluide (intégrale de flow généralisé). La forme la plus courante de ceci dans le circuit fluide est un réservoir de stockage de section transversale constante. Lorsque le fluide pénètre dans le réservoir et le détruit, l'énergie potentielle est stockée. La hauteur du fluide dans le réservoir est donnée par

$$H = \frac{V}{A}$$

et la pression dans le réservoir à n'importe quel niveau est donnée par Hg . Par conséquent, l'équation constitutive peut être écrite comme suit [37] :

$$C = \frac{q}{e} = \frac{V}{P} = \frac{V}{\rho g H} = \frac{A}{\rho g}$$

4.6.1.4 Résistance du fluide

La valeur de résistance est décrite en mécanique des fluides par :

$$R = \frac{8\mu L}{\pi a^4}$$

où μ est la viscosité absolue du fluide, L est la longueur du tube et a est le rayon interne du tube [37].

4.7 Application sous Symbols Shakti

4.7.1 Description du processus

Notre système à deux réservoirs vise principalement à offrir un débit d'eau continu Q_0 à un utilisateur. Il s'agit de deux réservoirs T1 et T2 qui sont reliés par un tuyau équipé d'une vanne.

A l'aide d'une pompe le réservoir T1, on remplit. Une vanne R1 permet de réguler le débit d'eau entre les réservoirs T1 et T2. La vanne R2 est responsable du contrôle de la quantité d'eau sortante vers le consommateur (figure 4.14).

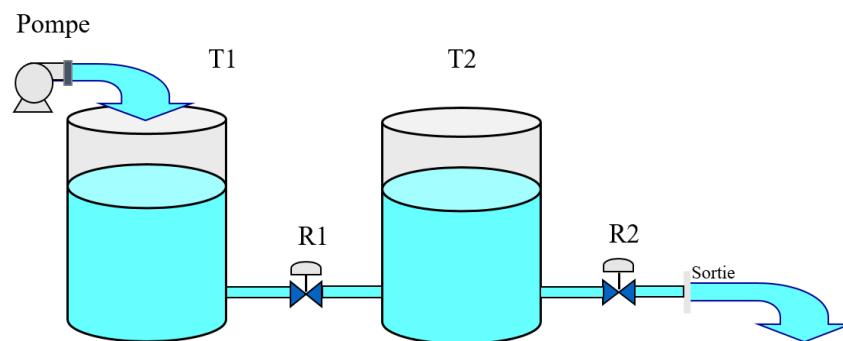


FIGURE 4.14 – Système à deux réservoirs

Modèle bond graph de système sous module BondPad

Les étapes générales de la modélisation du système hydraulique :

1. Reconnaître les éléments qui composent le système. Ici les réservoirs sont des éléments C stockant l'énergie potentielle et les vannes sont les éléments R qui dissipent l'énergie.
2. Attribuer une jonction 0 à chaque point de pression du système.
3. Attribuer une jonction 1 pour chaque élément du système, pour permettre de prendre en considération les chutes de pression liées à chaque élément situé entre deux jonctions 0 adjacentes, puisque la jonction 1 est un sommateur d'effort.
4. Sélectionner un nœud du système comme référence, c'est-à-dire le point de pression atmosphérique et lui affecter un élément de jonction 0. Si des pressions manométriques sont utilisées, cette jonction 0 et toutes les liaisons de puissance connectées peuvent être éliminées pour simplifier le modèle.
5. Attribuer l'élément C pour le stockage/condensateurs, l'élément R pour le frottement, et S_e pour la pression et S_f pour les sources de débit.
6. Connecter les éléments avec des liens de pouvoir et attribuer des causalités. Simplifier en négligeant les liaisons et la jonction 0 qui sont reliées à la jonction 0 représentant la pression atmosphérique [37].

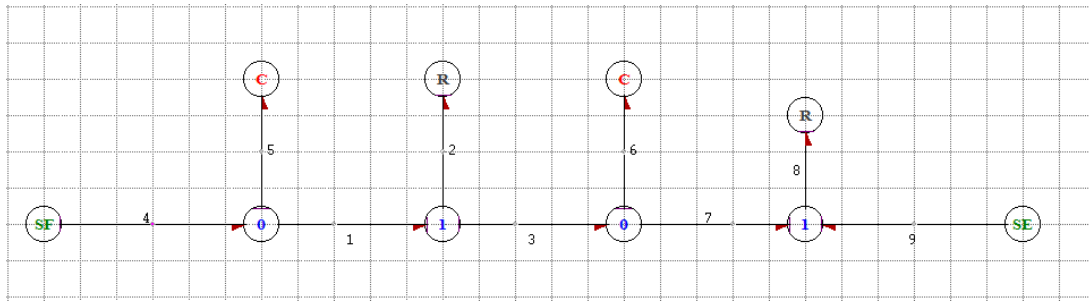


FIGURE 4.15 – Modèle bond graph du système deux réservoirs

4.7.2 Contribution au placement de capteurs

Dans cette section nous proposerons une mise en place de détecteurs dans les but d'augmenter les propriétés structurales du système et sa surveillabilité avec un degré d'observabilité nul. Où nous avons surveillé chaque composant de ce système à deux réservoirs par un seul détecteur la procédure est illustrée dans la figure 4.16 [24].

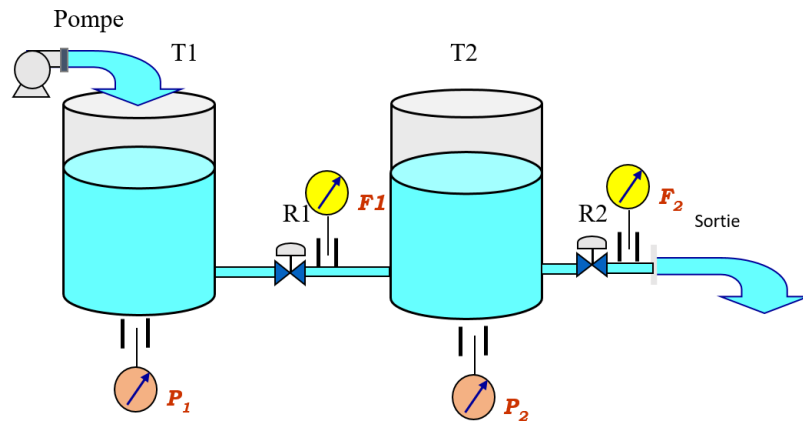


FIGURE 4.16 – Système à deux réservoirs avec détecteurs

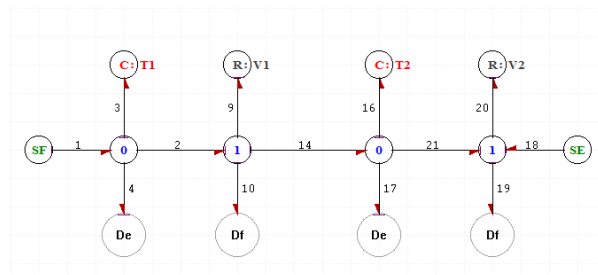


FIGURE 4.17 – Modèle bond graph

4.7.3 Étude structurelle

Les systèmes modélisés par bond graph sont structurellement commandables si les conditions suivantes sont satisfaites :

1. l'existence d'un chemin causal reliant une source (respectivement un capteur) à chaque élément dynamique I et C dans le cas où le bond graph est mis en causalité intégrale.
2. les éléments I et C possèdent une causalité dérivée lorsqu'on met le bond graph en dérivée, et quand on dualise les sources [34] [3].

Pour l'observabilité structurelle, on remplace source par capteur dans les conditions précédentes.

- **Commandabilité structurelle :**

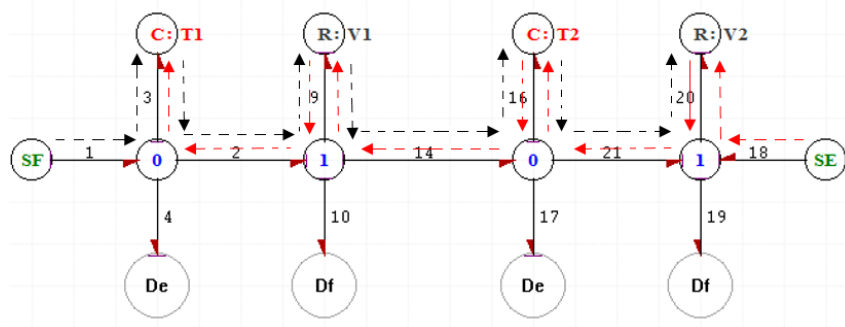


FIGURE 4.18 – Chemins causaux des sources

La première condition est vérifiée pour notre système hydraulique. schéma en causalité dérivée du modèle bond graph :

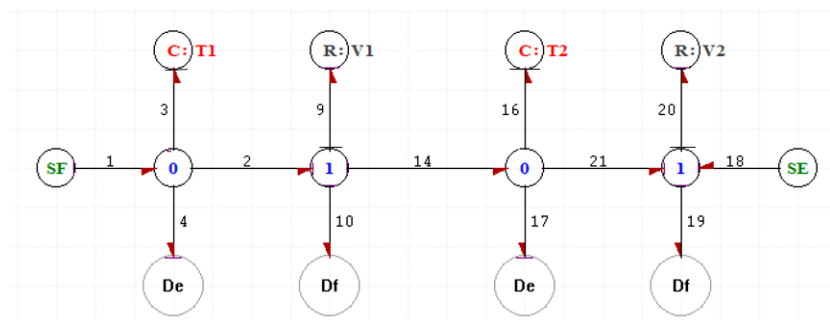


FIGURE 4.19 – Modèle BG en causalité dérivée

Modèle BGD obtenu par dualisation :

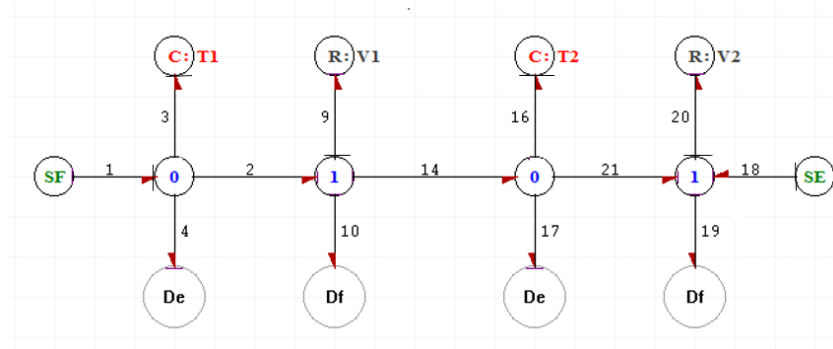


FIGURE 4.20 – Modèle BGD dualisé

La deuxième condition est vérifiée donc le système est structurellement commandable.

- **Observabilité structurelle :**

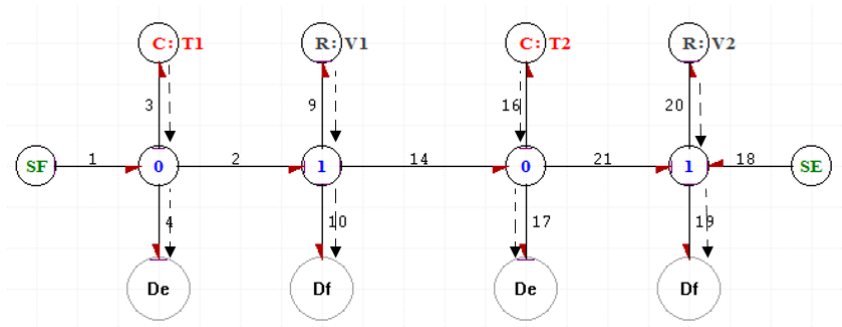


FIGURE 4.21 – Chemins causaux des capteurs

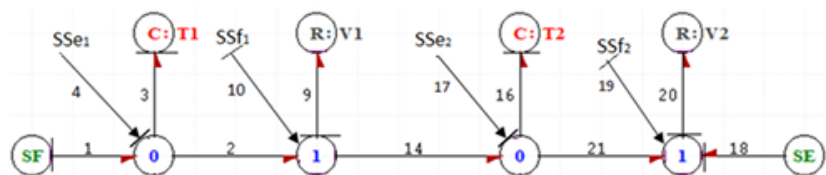


FIGURE 4.22 – Modèle bond graph dualisé

Sur le modèle bond graph, il existe un chemin causal entre les détecteurs d'effort et de flux et les éléments C en causalité intégrale.

donc la première condition est vérifiée.

Les éléments C possèdent une causalité dérivée ainsi la deuxième condition est vérifiée.

Donc le système est structurellement observable.

4.7.4 Degré d'observabilité

L'élément C : T1 (respectivement C :T2) est degré zéro (0 degré de redondance) car il est lié à un seul détecteur ; cette variable est mesurée et non estimable car elle est possédée à un unique chemin causal aboutissant à un seul détecteur.

La variable C : T1 est observable car son degré d'observabilité est nul.

L'élément R : V1 (respectivement R :V2) est degré zéro (0 degré de redondance) car il est lié à un seul détecteur ; cette variable est mesurée et non estimable car elle est possédée à un unique chemin causal aboutissant à un seul détecteur.

La variable R : V1 est observable car son degré d'observabilité est nul.

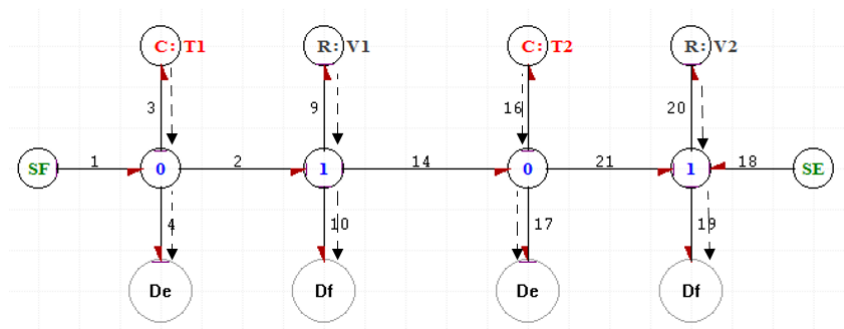


FIGURE 4.23 – Chemins causaux des capteurs

On peut donc conclure que tous les éléments de notre système sont observables car leurs degrés d'observabilité sont nuls.

Pour vérifier la surveillabilité il faut augmenter le degré d'observabilité des variables pour rendre les variables surveillables.

- L'observabilité est une condition nécessaire mais non suffisante pour la surveillabilité, pour notre système on va vérifier au moyen de calcul de la matrice de signature des défauts si les éléments sont surveillables avec un degré d'observabilité nul.

4.7.5 Diagnostic par l'approche qualitative du bond graph

L'analyse structurelle du système hydraulique à deux réservoirs nous donne, après la mise en place des capteurs, les résultats suivants :

- elle montre que le système est d'ordre 2 et aussi de rang 2.
- elle montre qu'il y a absence de source de contrôle, et que le système est non contrôlable, mais peut très facilement rendu contrôlable, en rendant nos sources paramétrables (ie) au lieu d'avoir Sf ou Se, on les transforme en MSe, et éventuellement en MSf .
- elle garantit que le système est structurellement observable et ses états admettent un chemin causal vers un détecteur ou plus.

Results of Structural Analysis

Mode Test:

- Order of the system is : 2.
- Bond Graph Rank of the system is : 2.
- There are no structurally null modes in the system.
It is sufficient to observe this system by a suitably placed observer only if the system is not disjoint.

Controllability Test:

- There are no control (modulated) sources in this model.
- The system is structurally (thus always) uncontrollable without control sources.

Observability Test:

- Number of observers in the system is : 4.
- All states have causal path to at least one observer.
- The system is structurally observable.
- Following observers are superfluous :
 - (1) Observer at bond number 10.
 - (2) Observer at bond number 19.

FIGURE 4.24 – Analyse structurelle du système

4.7.6 Approche quantitative du bond graph pour le diagnostic

Les lois physiques génèrent l'approche quantitative donc il est nécessaire d'avoir une connaissance profonde sur le système et sa structure ainsi que ses valeurs numériques ses paramètres. Le principe de cette approche est de différencier l'état normal du processus et le modèle de référence numérique. Les messages de modèle globale nous oblige de transformer notre modèle bond graph en modèle ne contenant que des capsules comme montre la figure 4.25 [9].

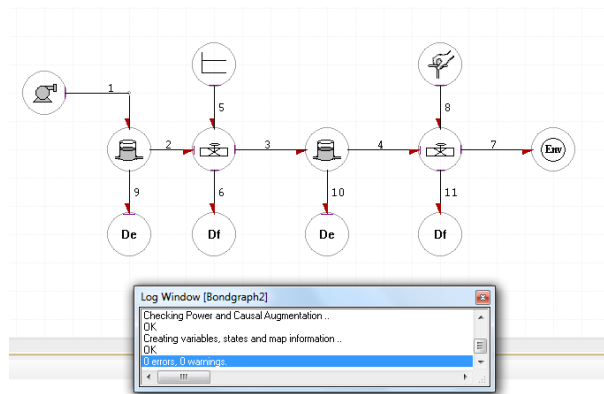


FIGURE 4.25 – Modèle icônique

4.7.7 Génération des relations de redondance analytique RRAs

Les valeurs numériques des résidus ainsi que la matrice de signature des défauts sont obtenues par le modèle bond graph. En effet, cette matrice est essentielle pour la localisation des défauts pouvant surgir pendant le fonctionnement du système. L'élimination des variables inconnues pour générer des RRAs (Relations de Redondance Analytique)

est assurée par le parcours des chemins causaux.

En utilisant la commande " Derive ARRr" du logiciel Symbols les résidus RRA dans notre système peuvent être généralisés, comme montre la figure 4.27 [41]

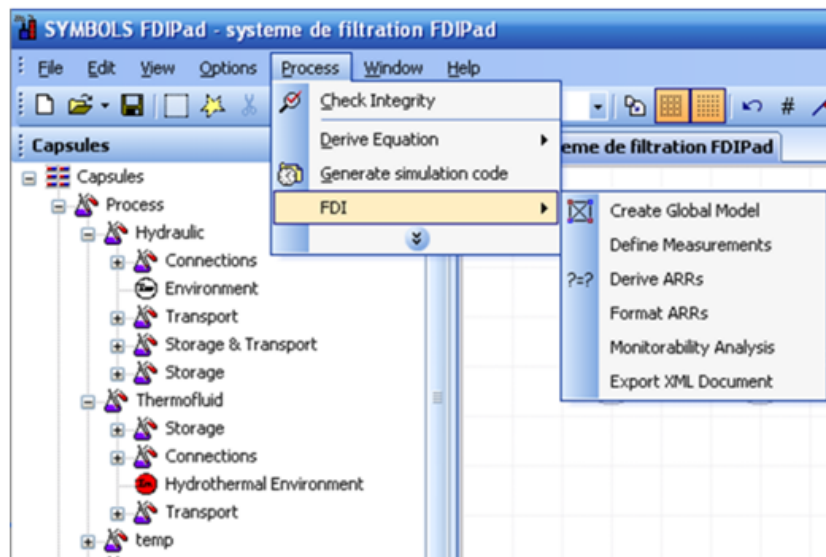


FIGURE 4.26 – Sous-menu FDI de ModelBuilder

```

Expression/Equation View
Residuals
Arr1=FlowPum1_Output-Tank1_C2*ddt(De1_Measurement)-Df1_Measurement
Arr2=Df2_Measurement-Valve2_Cd*sign(De2_Measurement-Environ1_Pressure)*sqrt(fabs(De2_Measurement-Environ1_Pressure))*Variabl1_Output
Arr3=Df1_Measurement-Valve1_Cd*sign(De1_Measurement-De2_Measurement)*sqrt(fabs(De1_Measurement-De2_Measurement))*Constan1_Output
Arr4=Df1_Measurement-Tank2_C2*ddt(De2_Measurement)-Df2_Measurement
    
```

FIGURE 4.27 – Relation de redondance analytique RRAs

Interprétation des RRAs :

Nous remarquons en se basant sur ces résultats que :

Le système possède quatre détecteurs. c'est le même nombre des RRAs que nous avons obtenu. ceci montre que le modèle est correct, ainsi loi qui dit "n nombre de détecteurs est égal à n nombre de RRAs" est vérifiée.

Les RRAs sont structurellement indépendantes. Nous avons un BG observable ce qui implique : pour chaque jonction 0 ou 1 avec un seul détecteur, correspond une RRA.

Expression/Equation View	
Variable	Assignment
FlowPump1_Flow (double) : Additional supply flow from the pump	
FlowPump1_Output (double)	FlowPump1_Output=FlowPump1_SF1;
Tank1_Leakage (double) : Leakage flow as tank fault	
Tank1_K2 (double)	
Tank2_Leakage (double) : Leakage flow as tank fault	
Tank2_K2 (double)	
Valve1_Cd (double) : Coefficient of Discharge	
Valve1_Fault (double) : A non-zero value indicates a fault	
Valve2_Cd (double) : Coefficient of Discharge	
Valve2_Fault (double) : A non-zero value indicates a fault	
Environ1_Patm (double) : this is gage environment pressure (
Environ1_Pressure (double)	Environ1_Pressure=Environ1_SE2;
Df1_SensorFault (double) : Non-Zero value indicates a fault	
Constan1_Amp (double) : Amplitude of constant source	
Constan1_Output (double) : Amplitude of constant source	Constan1_Output=Constan1_SF1;
Variabl1_Amp (double) : Magnitude of opening (0 to 1)	
Variabl1_Output (double) : Magnitude of opening (0 to 1)	Variabl1_Output=Variabl1_SF1;

FIGURE 4.28 – Paramètres du système à deux réservoirs

Expression/Equation View	
ID1=1/Tank1_C2*Tank1_Q2-1/Tank2_C2*Tank2_Q2	
ID2=1/Tank2_C2*Tank2_Q2-Environ1_SE2	
Tank1_f2=FlowPump1_SF1-Valve1_Cd*sign(ID1)*sqrt(fabs(ID1))*Constan1_SF1	
Df2_f2=Valve2_Cd*sign(ID2)*sqrt(fabs(ID2))*Variabl1_SF1	
Df1_f2=Valve1_Cd*sign(ID1)*sqrt(fabs(ID1))*Constan1_SF1	
De2_e2=1/Tank2_C2*Tank2_Q2	
De1_e2=1/Tank1_C2*Tank1_Q2	
Tank2_f2=Valve1_Cd*sign(ID1)*sqrt(fabs(ID1))*Constan1_SF1-Valve2_Cd*sign(ID2)*sqrt(fabs(ID2))*Variabl1_SF1	

FIGURE 4.29 – Equations du système hydraulique de deux réservoirs

4.7.7.1 Génération de la matrice de signatures des fautes (MSF)

En utilisant les RRAs générées par ModelBuilder du logiciel, La monitorabilité et localisabilité des éléments du système peuvent être examinées. A cette effet, il suffit d'abord d'éliminer les éléments concernés par la supervision , ou par l'analyse suivant le cahier des charges fixé, supposés infaillibles.

Nous choisissons l'environnement comme élément d'installation qui n'est jamais tombé défaillant et on ne peut pas le surveiller 4.30.

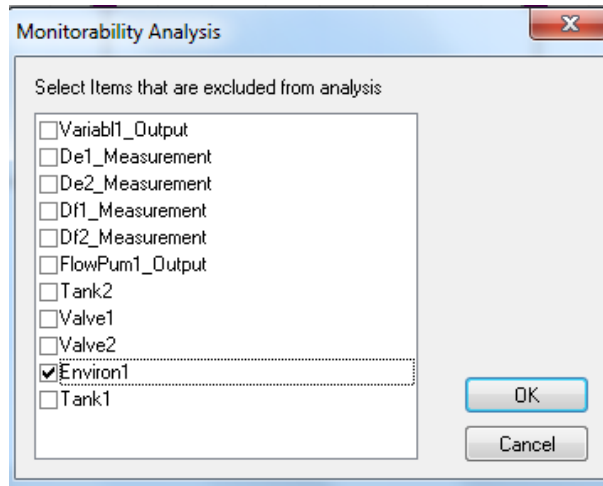


FIGURE 4.30 – Spécification sur ModelBuilder des composants à surveiller

Interprétation de la MSF :

Dans la figure 4.31 concernant la matrice des signatures, R1, R2, R3, R4 désignent les résidus correspondant aux relations de redondance analytiques, M_b et I_b représentent respectivement la détectabilité et l'isolabilité des défauts; telles que le vecteur de détectabilité (appelé aussi vecteur de monitorabilité) M_b , indique si le composant en question tombe en panne, on arrive à détecter cette panne, et le vecteur de la localisabilité I_b indique si le composant est en panne donc on arrive à le localiser i.e. on peut décider que c'est bien le composant qui a causé la panne.

- Toutes les valeurs de la colonne M_b égales à 1, donc toutes les défaillances du système peuvent être détectées.
- Concernant la deuxième colonne I_b qui décrit le vecteur de localisabilité , on remarque que tous les détecteurs de flux et d'effort sont isolables ainsi que la vanne 1 et le réservoir 2 car chacun d'eux a un vecteur de signature unique.
- Les signatures de la pompe et du réservoir 1 (Tank1) sont égales, ceci signifie que les défauts affectant ces éléments sont non isolables, par conséquent le détecteur d'effort ne peut pas contribuer efficacement à la supervision du tank1.
- Les signatures de la vanne 2 (Valve2) et la vanne manuelle (variabl1-Output) sont identiques : les défaillances affectant ces éléments sont non isolables, donc le détecteur de flux ne peut pas contribuer efficacement à la supervision du vanne 2 et bientôt la sortie .

- Le réservoir 2 (Tank2) et la vanne 1 (Valve1) sont surveillables car leurs signatures sont différentes.
- Nous avons constaté que tous les défauts au niveau de réservoir 1(Tank1) ne sont pas totalement surveillables.

Monitorability Analysis

	M _D	I _D	R1	R2	R3	R4
FlowPum1_Output	1	0	1	0	0	0
Df1_Measurement	1	1	1	0	1	1
Variabl1_Output	1	0	0	1	0	0
De1_Measurement	1	1	1	0	1	0
De2_Measurement	1	1	0	1	1	1
Df2_Measurement	1	1	0	1	0	1
Tank1	1	0	1	0	0	0
Tank2	1	1	0	0	0	1
Valve1	1	1	0	0	1	0
Valve2	1	0	0	1	0	0

FIGURE 4.31 – Matrice FDI générée par le logiciel

- Après l'interprétation de la matrice de signature des défauts nous avons constaté que les variables Tank2 et Valve1 sont surveillables donc on n'a pas besoin d'augmenter leurs degrés d'observabilité (l'ajout de nouveau capteur), un degré d'observabilité égal à zéro est suffisant pour assurer la surveillance du deuxième réservoir (Tank2) et la première vanne (Valve1).
- Contrairement les variables Tank1 et Valve2 ne sont pas totalement surveillables (la deuxième condition de la surveillabilité n'est pas vérifiée) donc il faut augmenter le degré d'observabilité de ces variables par l'ajout de nouveaux capteurs (détecteurs de flux pour la vanne et d'effort pour le réservoir).

4.8 Génération des indicateurs de fautes

L'algorithme de génération des RRAs à partir du modèle BG est réalisé selon les étapes suivantes :

1. il faut mettre le modèle Bond graph en causalité dérivée en inversant les causalités des capteurs. Ainsi les capteurs deviennent des sources d'information notées SSf ou SSe (sources de signal).

R : Résistance dans la vanne V_1 liée au bond numéro 9.

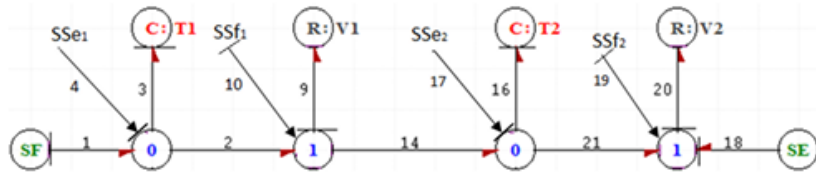


FIGURE 4.32 – Modèle bond graph en causalité dérivée

R : Résistance dans la vanne V_2 et V_2' liée au bond numéro 20.

C : Capacité hydraulique du réservoir T_1 liée au bond numéro 3.

C : Capacité hydraulique du réservoir T_2 liée au bond numéro 16.

SF : Source de flux liée au bond numéro 1.

2. Écrire l'équation de structure pour chacune des jonctions 0 et 1 (représentant la conservation de puissance) contenant au moins un détecteur, $\sum_1^n e_i=0$, ou $\sum_1^n f_i=0$

- Éliminer les variables inconnues (e ou f) en parcourant les chemins causaux sur le bond graph de la variable inconnue vers une variable connue (capteur ou source).
- Pour tout détecteur dont la causalité est inversée, une RRA est déduite.
- Pour tout détecteur dont la causalité ne peut être inversée, une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature situé dans la même jonction.

Jonction 0

$$f_1 - f_2 - f_3 = 0$$

$$f_1 = S_f$$

$$f_2 = SSf_1$$

$$f_3 - T_1 - e_3 - SSe_1 = 0 \Rightarrow f_3 = T_1 \frac{dSSe_1}{dt}$$

$$RRA_1 : S_f - T_1 \frac{dSSe_1}{dt} - SSf_1 = 0$$

Jonction 1

$$e_{21} + e_{18} - e_{20} = 0$$

$$e_{21} = SSe_2$$

$$e_{18} = S_e$$

$$e_{20} - V_2 - f_{20} - SSf_2=0 \Rightarrow e_{20} = (V_2 \cdot ddt(SSf_2)) \cdot V_2'$$

$$RRA_2 : SS e_2 + S_e - (V_2 \cdot ddt(SSf_2)) \cdot V_2' =0$$

Jonction 1

$$e_2 - e_{14} - e_9=0$$

$$e_2 = SS e_1$$

$$e_{14}=SS e_2$$

$$e_9 - V_1 - f_9 - SSf_1=0 \Rightarrow e_9=V_1 \cdot ddt(SSf_1)$$

$$RRA_3 : SS e_1 - V_1 \cdot ddt(SSf_1) - SS e_2 =0$$

Jonction 0

$$f_{14} - f_{21} - f_{16}=0$$

$$f_{14} = SSf_1$$

$$f_{21}=SSf_2$$

$$f_{16} - T_2 - e_{16} - SS e_2=0 \Rightarrow f_{16}=T_2 \cdot \frac{dSSe_2}{dt}$$

$$RRA_4 : SSf_1 - T_2 \cdot \frac{dSSe_2}{dt} - SSf_2 =0$$

4.8.1 Calcul de Monitorabilité et d'Isolabilité

La monitorabilité $M_b = 1$ car il existe au moins un 1 dans le vecteur de signatures de chaque composant du systeme.

L'isolabilité I_b des composants SSf_1 , SSe_1 et V_1 , $Tank_2$ est égale à 1 car leurs signatures est unique donc ces éléments sont isolables, et I_b des autres composants est égale à 0 car leurs signatures se répètent donc ces composants sont non isolables.

4.8.2 Matrice de signature des fautes

Les calculs précédents nous donnent la matrice des signatures suivante :

	M_b	I_b	R1	R2	R3	R4
SF	1	0	1	0	0	0
SSf_1	1	1	1	0	1	1
V_2'	1	0	0	1	0	0
SSe_1	1	1	1	0	1	0
SSe_2	1	1	0	1	1	1
SSf_2	1	1	0	1	0	1
$Tank_1$	1	0	1	0	0	0
$Tank_2$	1	1	0	0	0	1
V_1	1	1	0	0	1	0
V_2	1	0	0	1	0	0

4.9 Comparaison entre la MSF calculée et celle trouvée par Symbols

Les résultats effectués par calcul et par logiciel symbols sont identiques, ce qui montre l'efficacité de l'outil utilisé bond graph, pour la construction des modèles de connaissance de systèmes, et aussi la conception des systèmes de surveillance, car les propriétés graphiques permettent de détecter et localiser les défauts, ainsi que la génération des algorithmes de diagnostic. L'avantage du logiciel par rapport au calcul réside dans sa rapidité et dans l'exactitude de ses résultats.

4.10 Conclusion

On utilise le logiciel Symbols pour modéliser, analyser, contrôler et simuler les différents systèmes.

nous venons de présenté et de décrire le logiciel Symbols ainsi que ses modules en détails. Nous avons détaillé la création des capsules et leurs utilités pour le diagnostic. Pour la deuxième partie on a travaillé sur la modélisation d'un système à deux réservoirs par l'approche bond graph, où nous avons diagnostiqué ce système avec un degré d'observabilité égal à zéro, à l'aide d'un placement de capteurs adéquat dont le but de minimiser le coût des capteurs.

Finalement on a généré la matrice de signatures des défauts par le ModelBuilder. Sur celui-ci, on a créé les modèles bond graphs des composants des systèmes. L'objectif de ceci est de confirmer l'utilité du bond graph et le logiciel Symbols, et l'utilité de la notion de degré d'observabilité d'une variable et l'analyse structurelle du processus pour la surveillance des variables du système.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre nous avons parlé de la supervision industrielle et ses modes de fonctionnement et les fonctions de la supervision. Nous avons aussi distingué les deux types de diagnostic qui sont la méthode sans modèle et la méthode avec modèle.

Dans le deuxième chapitre nous avons essayé d'éclairer le concept du bond graph qui a été initialement employé pour la modélisation des systèmes physiques ainsi que la synthèse et l'analyse des lois de commande avec l'utilisation de la causalité. La deuxième partie du chapitre a été consacrée au rôle du bond graph dans le diagnostic des systèmes pour détecter et d'isoler les pannes. Nous avons aussi rappelé les approches qualitatives et quantitatives, et la génération des relations de la redondance analytique.

Quatre propriétés ont été discutées dans le troisième chapitre, la classification des variables d'un système, le degré d'observabilité, la surveillabilité et la mise en place de capteurs proposés qui permet de remplir les conditions du cahier de charge.

Ce mémoire a été une occasion pour simuler un système hydraulique à deux réservoirs. La pompe et la vanne servent respectivement de source d'entrée et source de sortie, nous avons placé des capteurs, selon le concept de degré d'observabilité adéquat pour le diagnostic des systèmes.

Nous avons généré un modèle dynamique et spécifique des mesures de défaillance tout en calculant la matrice de signatures des fautes, celle-ci est affichée via une interface conviviale et un logiciel Symbols Shakti approprié. Pour chaque partie du processus, des capsules ont été utilisées, et à l'aide de ce modèle des relations de redondance analytique ont été obtenues qui ont permis de générer la matrice de signature des fautes.

Bibliographie

- [1] S. Abdul. Scada (supervisory control and data acquisition). 2019.
- [2] T. Adams. SCADA System Fundamentals. 2014.
- [3] M. Benkhaled. *Placement de capteurs pour la surveillance des systèmes modélisés par les bond graphs*. PhD thesis, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- [4] M. Benkhaled. Manuel d'initiation aux bond-graphs cours et exercices corrigés, 2017.
- [5] MP. Borne. *Application de la modélisation bond graph a la surveillance des système complexe*. PhD thesis, 1995.
- [6] M. Khemliche ; B. Ould Bouamama and H. Haffaf. Sensor placement for component diagnosability using bond-graph. *Sensors and Actuators A : Physical*, 132(2) :547–556, 2006.
- [7] A. Boubakir. Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique ce105 à réservoirs couplés. *Magister Thesis*, 2007.
- [8] JAUME Brunet, D Jaume, M Labarrère, Andre Rault, and Michel Verge. Détection et diagnostic de pannes : approche par modélisation. *Hermès Sciences publication*, 1990.
- [9] F. Busson. *Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés*. PhD thesis, Université des sciences et technologies de Lille 1, 2002.
- [10] M. Combacau, P. Berruet, E. Zamai, P. Charbonnaud, and A. Khatab. Supervision and monitoring of production systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(17) :849–854, 2000.
- [11] 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, Lille 1, 1996.
- [12] H. Derbel. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. thèse de doctorat. 2009.
- [13] M. A. Djeziri. *Diagnostic des systèmes incertains par l'approche Bond Graph*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2007.

- [14] W. El Osta. *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I; ECOLE CENTRALE DE LILLE, 2005.
- [15] J. S. Eterno, J. L. Weiss, D. P. Looze, and A. Willsky. Design issues for fault tolerant-restructurable aircraft control. In *1985 24th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 900–905. IEEE, 1985.
- [16] Ph. Fichou. Bond graphs : une méthode pluridisciplinaire. *Technologie magazine*, pages 37–46, 2004.
- [17] Tarek GUELLOUH and Nassr Allah GUEZOULI. *Diagnostic d'un système industriel par les bond-graphs*. PhD thesis, Mme M. BENALLEL, 2020.
- [18] H. Hamri. *Modélisation des systèmes dynamiques par l'outil bond graph*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2010.
- [19] BRAHMIA Oussama KENNAT Mohammed. Modélisation et commande d'un système hydraulique à trois réservoirs. 2022.
- [20] Y. Khellaf and Y. Aichoun. Création d'une boîte à outils à éléments bond graphs pour simulation des systèmes dynamiques, 2012.
- [21] M. S. Lamri and Z. Tati . *Supervision en temps réel d'un procédé industriel basé sur un automate programmable utilisant SCADA et MATLAB*. PhD thesis, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [22] I.B. Mahdad and M. Belhadj. Modélisation et détection des défauts par bond graph, application à un banc de régulation de niveau. *Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen*, 2013.
- [23] DIDIER Maquin, MARIE Luong, and JOSE Ragot. Sureté de fonctionnement et redondance analytique. *1er congrés Pluridisciplinaire Qualité et sureté de fonctionnement, Compiègne, France*, 1994.
- [24] Kamal Medjaher. *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels*. PhD thesis, Université des sciences et technologies de Lille 1, 2005.
- [25] AYAB MEZDOUR Hala. Etude et réalisation d'un système de supervision sous yokogawa cs3000. 2019.
- [26] J. Montmain. *Interprétation qualitative de simulations pour le diagnostic en ligne de procédés continus*. PhD thesis, Grenoble INPG, 1992.
- [27] H. Mouss. Supervision des systèmes industriels, 2021.
- [28] Amalendu Mukherjee and AK Samantaray. System modelling through bond graph objects on symbols 2000. *Simulation Series*, 33(1) :164–170, 2001.
- [29] D. J. Murray-Smith. Case Study I — A Two-Tank Liquid Level Control System. In D. J. Murray-Smith, editor, *Continuous System Simulation*, pages 153–162. Springer US, Boston, MA, 1995.

- [30] S. Oulmi. *Étude d'un système de supervision et de contrôle SCADA du réseau électrique de la Sonelgaz SDA*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [31] R. J. Patton. Fault-tolerant control : the 1997 situation. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18) :1029–1051, 1997.
- [32] P. Balle R. Iserman. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control engineering practice*, 5(5) :709–719, 1997.
- [33] J. Ragot, D. Maquin, and F. Kratz. Observability and redundancy decomposition application to diagnosis. In *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, pages 51–85. Springer, 2000.
- [34] A. Rahmani, C. Sueur, and G. Dauphin-Tanguy. Approche des bond graphs pour l'analyse structurelle des systèmes linéaires. *Linear Algebra and its applications*, 259 :101–131, 1997.
- [35] M. Staroswiecki and A. L. Gehin. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25 :1–11, 2001.
- [36] C Sueur and G Dauphin-Tanguy. Bond-graph approach for structural analysis of mimo linear systems. *Journal of the Franklin Institute*, 328(1) :55–70, 1991.
- [37] Mehrzad Tabatabaian. Engineering systems dynamics modelling, simulation, and design. 2021.
- [38] M. Tagina. *Application de la modélisation bond graph à la surveillance des systèmes complexes*. PhD thesis, Lille 1, 1995.
- [39] J. Thoma and B. Ould Bouamama. *Modelling and simulation in thermal and chemical engineering : A bond graph approach*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [40] Jean U Thoma. *Introduction to bond graphs and their applications*. Elsevier, 2016.
- [41] Y. MESSAOUD and M. MESSAOUDI. L'observabilité structurelle d'un moteur à courant continu par l'approche bond-graph.
- [42] R. Zemouri. *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2003.
- [43] C. Ziouche and M. Hamlaoui. *Surveillance des systèmes de production par bondgraph*. PhD thesis, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [44] G. Zwingelstein. *Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès, 1995.

خلاصة

يعد تشخيص الأعطال أمرًا بالغ الأهمية لضمان موثوقية وكفاءة الأنظمة. تركز هذه الأطروحة على مراقبة النظام من خلال اختبار الدرجة المثلى من قابلية المراقبة، وبالتالي تمكين أجهزة الاستشعار من التوضع المناسب للكشف عن الأعطال في النظام المادي. لقد استخدمنا أداة الرسم البياني للرابطة للتحقق من الشروط الهيكلية لاسترداد الأعطال، مع الأخذ بعين الاعتبار تحليل التحكم والمعلومات من مرحلة التشخيص.

من خلال استغلال الخصائص الهيكلية والخصائص السببية، بالإضافة إلى درجة قابلية الملاحظة وموقع أجهزة الاستشعار في أداة الرسم البياني للرابطة، يمكننا من تحليل قابلية المراقبة والملاحظة وتوليد علاقات التكرار التحليلية (المتبقيات، RRA) ومصنوفات توقيع الأعطال (FSM).

الكلمات المفتاحية: درجة قابلية المراقبة، الرسم البياني للرابطة، RRA، صندوق النقد الدولي، قابلية المراقبة، إمكانية المراقبة، الرصد.

Résumé

Le diagnostic des pannes est crucial pour garantir la fiabilité et l'efficacité des systèmes.

Ce mémoire porte sur la surveillance d'un système en choisissant un degré d'observabilité optimal, permettant ainsi de positionner les capteurs de manière adéquate pour détecter les défauts d'un système physique. Nous avons employé l'outil bond graph afin de vérifier les conditions structurelles de recouvrement des défauts, en tenant compte de l'analyse de commande et des informations issues de l'étape de diagnostic.

L'exploitation des propriétés structurelles et causales, ainsi que le degré d'observabilité et le positionnement des capteurs dans l'outil bond graph, nous ont permis d'analyser la surveillabilité, l'observabilité, ainsi que la génération des relations de redondance analytique (résidus, RRA) et des matrices de signatures des défaillances (MSF).

Mots clés : degré d'observabilité, Bond Graph (BG), RRA , MSF , Observabilité , Surveillance.

Abstract

Fault diagnosis is crucial to ensure the reliability and efficiency of systems. This thesis focuses on the monitoring of a system by selecting an optimal degree of observability,

thus allowing the sensors to be positioned adequately to detect defects in a physical system. We used the bond graph tool to verify the structural conditions for the recovery of the defects, taking into account the order analysis and the information from the diagnostic step.

The exploitation of structural and causal properties, as well as the degree of observability and the positioning of sensors in the bond graph tool, allowed us to analyze the monitorability, observability, as well as the generation of analytical redundancy relationships (residuals, RRAs) and failure signature matrices (MSF).

Keywords : degree of observability, Bond Graph (BG), RRA, MSF, Observability, Monitoring.