

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



MÉMOIRE

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

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Par :

Ras Mohammed Nabil & Guendouz Salim

Sujet :

Analyse structurelle par l'approche Bond-Graph
d'un système énergétique

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
Mlle Handouzi Wahiba	MCB	Université de Tlemcen	Président
M Mokhtari Med Réda	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mme Benallel Mounira	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire 2024 - 2025

REMERCIEMENTS

Je veux remercier toutes les personnes qui ont aidé, de près ou de loin, à la création de ce mémoire.

Un grand merci va à mon prof pour son soutien. Malgré un emploi du temps chargé, il m'a toujours encouragé à donner le meilleur et ses remarques ont vraiment aidé à améliorer mon travail.

Je remercie également ma famille pour leur soutien inconditionnel, leur amour et leur confiance en moi pendant les moments difficiles.

Merci aussi à mes collègues de promo pour leur aide précieuse, leur bonne humeur et tous les bons moments passés ensemble.

Enfin, je pense aussi aux enseignants qui nous ont transmis leurs connaissances avec passion.

Ras Mohammed Nabil

REMERCIEMENTS

J'ai envie de dire un grand merci à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont participé à ce mémoire.

J'ai une pensée particulière pour mon professeur. Il a pris le temps de me guider, même avec un agenda chargé, toujours avec patience et gentillesse. Il m'a poussé à me dépasser et ses conseils m'ont aidé à améliorer ce travail.

Un immense merci aussi à ma famille. Leur soutien, leur amour, leur confiance ont été précieux, surtout quand j'ai eu des passages plus compliqués.

Je n'oublie pas non plus mes camarades de promo. Leur aide, leur bonne humeur, les discussions et les moments partagés ont rendu ce parcours bien plus agréable.

Et puis un clin d'œil à tous les enseignants qui ont su transmettre leur passion et leurs connaissances.

DÉDICACE

Une fois de plus, nous dédions ce travail à nos parents bien-aimés sans qui tout cela n'aurait pas été possible.

Nous tenons à vous remercier pour votre amour inconditionnel et pour tous les sacrifices que vous avez endurés pour nous.

À notre famille et à nos amis pour nous soutenir et rester à nos côtés tout au long de cette tâche, vous avez joué un rôle très important car vous étiez notre rempart et notre source de motivation.

Enfin, merci à tous ceux qui ont eu confiance en nous et qui nous ont donné l'impulsion dont nous avons besoin pour continuer lorsque le découragement se pointait.

Ras Mohammed Nabil
Guendouz Salim

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
DÉDICACE	4
INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
1 Analyse structurelle classique	13
1.1 Introduction	13
1.2 Définition	14
1.3 Les étapes principales pour réaliser une analyse structurelle classique	14
1.4 Commandabilité	15
1.5 Observabilité	16
1.6 Stabilité	17
1.7 Conclusion	17
2 Bond Graph	19
2.1 Introduction	19
2.2 Exemples de Bond graph	20
2.3 Fondements des bonds graphes	24
2.3.1 Points de départ	24
2.3.2 Bonds et ports	25
2.4 Expressions de la puissance et de l'énergie	28
2.4.1 La variable de puissance (P)	28
2.4.2 La variable de moment généralisé $p(t)$	28
2.4.3 La variable de déplacement généralisé $q(t)$	29
2.4.4 Variable d'énergie $E(t)$	30
2.5 Éléments du bond graph	30

2.5.1	Éléments de stockage	31
2.5.2	Résistances	33
2.5.3	Sources	35
2.5.4	Transformateur	35
2.5.5	Gyrateur	38
2.5.6	Les détecteurs	39
2.6	Jonctions	40
2.6.1	Orientation positive	41
2.6.2	Dualité et double domaine	42
2.7	Procédures de construction de modèles	43
2.8	Conclusion	45
3	Analyse structurelle à partir de la modélisation par bond-graphs	46
3.1	Introduction	46
3.2	Rang-hg de la matrice d'état associée au bond-graph	47
3.3	Commandabilité/observabilité structurelles	49
3.4	Analyse des systèmes énergétiques	50
3.4.1	Symbols	50
3.4.2	Des exemples	54
3.5	Modélisation et Simulation par Bond Graph d'un Système Mécatronique	56
3.5.1	Étude de cas	57
3.5.2	Modélisation et simulation du modèle bond graph	58
3.5.3	Résultats et discussion	58
3.5.4	Construction des capsules pour générer la matrice FDI	60
3.6	La causalité	61
3.6.1	Définition	61
3.6.2	Procédure d'affectation de la causalité (SCAP)	62
3.6.3	Causalité intégrale et causalité dérivée	63
3.7	Conclusion	64
4	Degré d'observabilité	66
4.1	Introduction	66
4.2	Classification des variables d'un système	66
4.3	Définition du degré d'observabilité (degré de redondance)	67
4.3.1	Observabilité minimale	67
4.3.2	Observabilité de degré quelconque	68
4.4	Surveillabilité	68
4.5	Étude d'un cas	69
4.5.1	Degré d'observabilité	70

4.5.2 Diagnostic par l'approche qualitative du bond graph	71
4.6 Conclusion	72
CONCLUSION GÉNÉRALE	73
BIBLIOGRAPHIE	75
RÉSUMÉ	78

Table des figures

2.1	Le circuit RLC	20
2.2	Éléments électriques avec ports d'alimentation	21
2.3	BG avec des symboles électriques (à gauche) et avec des symboles standard (à droite).	22
2.4	Le système de ressort à masse amortie	22
2.5	bond graph avec des symboles mécaniques (à gauche) et avec des symboles standard (à droite)	23
2.6	Le flux d'énergie entre deux sous-modèles représentés par une bond	25
2.7	Déterminez la direction du signal de l'effort et du flux (nous n'utilisons pas la direction de puissance au niveau des liaisons, donc ce n'est pas montré ici). . .	26
2.8	Conventions d'un lien	26
2.9	Représentations d'un lien entre deux ports	27
2.10	Bond graph à mots	27
2.11	Exemples d'éléments C	32
2.12	Exemples d'éléments I	33
2.13	Exemples de résistances	34
2.14	Exemples de sources	35
2.15	Exemple d'une source de tension modulée	35
2.16	Détecteur d'effort	40
2.17	Détecteur de flux	40
2.18	Exemple d'une 0-jonction	41
2.19	Exemple d'une 1-jonction	41
3.1	bond-graph acausal associé a un systeme d'ordre 4	48
3.2	bond graph en causalité intégrale associe a un système d'ordre 4	48
3.3	bond-graph en causalité dérivée	49

3.4	50
3.5	51
3.6	52
3.7	53
3.8	54
3.9	55
3.10	56
3.11 Présentation de la table porte pièce	57
3.12 Modèle bond graph proposé avec ses différents composants	58
3.13 Équations générées par le logiciel et resultat d'analyse	59
3.14 Modèle bond graph	59
3.15 Résultats d'analyse structurelle	60
3.16 Équations générées par le logiciel	60
3.17 RRAs générées par le logiciel	61
3.18	62
3.19	63
4.1 Chemin causal des variables déductibles	67
4.2 Classification des variables	68
4.3 Système hydraulique à deux réservoirs	69
4.4 Modèle bond graph du système	69
4.5 Modèle bond graph avec détecteurs	70
4.6 Chemins causaux des capteurs	70

Liste des tableaux

2.1 Résumé des variables d'effort et de flux 30

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'optimisation et la maîtrise des systèmes énergétiques sont actuellement un problème stratégique de grand intérêt, tant du point de vue industriel qu'à cet égard du point de vue scientifique. Devant la demande en énergie qui demeure en constant augment, face aux besoins de rendement accru ainsi que face au besoin de réduction de l'impact sur l'environnement, il faut doter des outils permettant de modéliser, d'analyser et de surveiller en efficacité ces systèmes. Un modèle solide ne se contente pas de reproduire un comportement observé : il doit également reproduire avec précision la structure interne du système, pour permettre une compréhension solide de ses propriétés dynamiques et d'interactions internes.

L'analyse structurelle se situe à l'intérieur de cette approche comme une démarche solide et autonome par rapport aux paramètres numériques exacts. Elle établit la possibilité d'analyser un système en fonction de sa configuration et de ses interconnexions, mettant en avant ses variables mesurables, ses variables calculables et celles qui sont restées inaccessibles. La démarche est tout spécialement applicable pour déterminer l'opportunité du contrôle ou de l'observation d'un système avant même d'y faire une simulation ou une expérimentation.

Dans un premier temps, ce mémoire débute par une présentation de l'analyse structurelle classique. Cette méthode repose sur une représentation mathématique traditionnelle, souvent sous forme d'équations différentielles ou algébriques, qui traduit le comportement dynamique du système. Elle offre une base solide pour comprendre la logique interne des modèles, mais peut devenir moins intuitive lorsqu'il s'agit de systèmes complexes où plusieurs formes d'énergie interagissent.

C'est afin de répondre à ces faiblesses qu'intervient le formalisme du bond graph. Présenté au deuxième chapitre, c'est un langage de modélisation unifié basé sur la notion d'échange de puissance. Sa force se trouve dans sa capacité à décrire des systèmes multi domaines —

électriques, mécaniques, thermiques, hydrauliques — au sein d'une même représentation cohérente. En identifiant explicitement les flux d'énergie et les ports d'interconnexion, cette approche facilite la compréhension globale du fonctionnement du système et la transition vers l'analyse structurelle.

Le troisième chapitre concerne l'analyse structurelle en utilisant le bond graph. Il s'agit d'une étape de charnière où sont juxtaposées les forces du formalisme et de l'analyse structurelle. Cette synergie permet non seulement d'extraire la structure interne du modèle mais bien de conserver la vision énergétique globale, élément déterminant pour un système énergétique où les interactions entre sous-systèmes sont constantes et déterminantes.

Enfin, le quatrième chapitre aborde le degré d'observabilité, un concept important dans le domaine du contrôle et de la supervision. L'observabilité désigne la possibilité de reconstruire l'état interne d'un système à partir de variables mesurables. Grâce à la mesure de ce niveau, on peut évaluer la qualité d'un appareil de mesure, identifier les lacunes potentielles et développer des stratégies de diagnostic ou de contrôle plus efficaces.

En conclusion, ce mémoire adhère à une logique de développement : en commençant par les bases classiques de l'analyse structurelle, en présentant le Bond Graph formaliste, en utilisant ce formalisme pour étendre l'analyse structurelle, et enfin en appliquant ces outils pour évaluer l'observabilité d'un système énergétique. Cette approche vise à prouver que la méthode mixte de ces méthodes cède la place à un bon cadre d'étude complet et répondant aux besoins du moment en matière de modélisation et de supervision des systèmes complexes.

1.1 Introduction

L'analyse structurelle est une phase fondamentale dans la pensée d'analyse des systèmes dynamiques à plusieurs variables. L'analyse structurelle vise à révéler, sur la base du modèle mathématique, la structure interne du système et la relation entre ses variables d'état, d'entrée et de sortie. L'approche structurelle, en opposition à une approche numérique stricte, est axée sur des caractéristiques inhérentes du système indépendantes de la valeur spécifique des paramètres, offrant par là une vision plus globale de son comportement.

Ce chapitre introduira les principes de l'analyse structurelle classique, appliqués aux systèmes dynamiques qui sont linéaires et non linéaires. Le but est de définir, via la modélisation à l'aide d'équations d'état, les principales caractéristiques suivantes :

- La détermination des variables d'état indépendantes,
- le pointage des redondances et des contraintes algébriques,
- la détermination de la taille effective du système,
- l'évaluation de la commandabilité et de l'observabilité dans un contexte structuré.

Cette approche simplifiera une meilleure compréhension de la structure interne des systèmes énergétiques à l'étude, tout en fournissant une structure méthodologique pour les étapes de recherche suivantes. Elle constituera un référentiel pour l'analyse structurelle dérivée du formalisme Bond Graph, qui sera traitée dans les chapitres suivants, en fin d'être employée pour démontrer la valeur comme outil facilitateur et unificateur pour la recherche sur des systèmes complexes.

1.2 Définition

L'analyse structurelle classique est une méthode qui vise à étudier un système en identifiant ses composants physiques ou fonctionnels ainsi que leurs relations d'interconnexion, afin de comprendre la structure, le comportement et la dynamique globale du système. Elle repose sur la modélisation mathématique traditionnelle basée sur les lois physiques (mécanique, électricité, thermique, etc.) sous forme d'équations différentielles ou algébriques, et sur la représentation du système à l'aide de schémas blocs ou diagrammes fonctionnels.

Cette approche ne fait pas appel au formalisme graphique énergétique et causal du BG. Au lieu de cela, elle utilise directement les équations des composants et les relations entre variables d'état, variables d'entrée et de sortie pour analyser la stabilité, le fonctionnement et la réponse dynamique du système.

1.3 Les étapes principales pour réaliser une analyse structurelle classique

1. Identification des composants du système
 - Repérer tous les éléments physiques ou fonctionnels (éléments de stockage, de dissipation, sources, transformateurs, etc.). [1.1]
 - Définir clairement chaque composant et son rôle dans le système. [1.1]
2. Écriture des équations physiques et mathématiques
 - Formuler les équations différentielles ou algébriques qui modélisent le comportement de chaque composant, en s'appuyant sur les lois physiques (lois de conservation, bilans énergétiques, lois de Kirchhoff, etc.). [1.1]
3. Construction du schéma fonctionnel ou schéma blocs
 - Représenter la structure du système par un schéma fonctionnel ou par un diagramme blocs, où les connexions entre composants illustrent les relations d'entrée-sortie ou flux de variables pertinentes. [1.1]
 - Cette représentation ne formalise pas les flux énergétiques comme dans un bond graph, mais organise les éléments selon leur fonction et liaison. [1.1]
4. Identification des variables d'état et dynamique du système
 - Déterminer les variables d'état nécessaires à la description complète du système (quantités représentant l'état dynamique). [1.1]
 - Analyser les relations entre variables d'entrée, de sortie et variables d'état. [1.1]
5. Étude de la stabilité et du comportement

- Examiner la stabilité du système à partir des équations. [1.1]
- Évaluer la réponse dynamique, la performance et le comportement pour différentes conditions. [1.1]

6. Utilisation des outils classiques d'analyse

- Application de méthodes mathématiques classiques comme la transformée de Laplace pour les systèmes linéaires. [1.1]
- Réalisation de bilans énergétiques, bilans de masse, ou autres méthodes adaptées pour les systèmes non linéaires. [1.1]

En résumé, cette démarche s'appuie sur la modélisation mathématique traditionnelle et la représentation fonctionnelle ou schématisée du système, sans recourir à la formalisation graphique énergétique spécifique au bond graph. C'est une méthode largement utilisée car elle est simple, directe, et basée sur des principes physiques essentiels.

1.4 Commandabilité

La commandabilité est une propriété fondamentale des systèmes dynamiques, notamment dans le cadre de la représentation d'état. Elle exprime la capacité, via les entrées du système, à déplacer l'état du système d'une position initiale à n'importe quelle position finale, dans un temps fini donné. [1.2]

Définition formelle [1.2]

Un système linéaire continu de la forme :

$$\dot{X} = Ax + Bu$$

est commandable si, pour tout intervalle de temps $[t_i, t_f]$ et pour tous états x_i et x_f , il existe une commande $u(t)$ permettant de passer de $x(t_i) = x_i$ à $x(t_f) = x_f$.

Critère de Kalman [1.2]

La condition nécessaire et suffisante de commandabilité pour un système linéaire est donnée par le critère de Kalman :

Le système (A, B) est commandable si et seulement si $\text{rang}(\Gamma) = n$

où n est la dimension de l'espace d'état et Γ la matrice de commandabilité :

$$\Gamma = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

Si le rang de cette matrice est égal à n , alors toutes les variables d'état peuvent être atteintes par une commande appropriée.

Interprétation géométrique

Le sous-espace commandable X_c est défini comme l'ensemble des états accessibles par les commandes, autrement dit l'espace engendré par les images successives de la matrice B sous l'action de A :

$$X_c = \sum_{k=1}^n A^{k-1} B$$

où B est l'image de la matrice B (c'est-à-dire l'ensemble des vecteurs pouvant être atteints par l'action directe de B) et n est la dimension de l'espace d'état X .

Le système est dit commandable si et seulement si l'ensemble accessible par les commandes est tout l'espace d'état, c'est-à-dire :

$$X_c = X$$

Modes non commandables

Si le système n'est pas commandable, certains modes (valeurs propres de A) ne peuvent pas être influencés par les entrées. Ces modes sont dits non commandables et sont associés à des zéros de découplage en entrée.

Test de Popov-Belevich-Hautus (PBH)

Une autre méthode pour tester la commandabilité est le critère PBH : le système est commandable si, pour tout $s \in \mathbb{C}$, le rang de la matrice $[sI - A \ B]$ est égal à n .

Importance

La commandabilité est essentielle pour la conception des lois de commande : un système non commandable ne peut pas être piloté arbitrairement, ce qui limite fortement les performances et la robustesse de tout régulateur ou observateur associé.

1.5 Observabilité

L'observabilité est une propriété essentielle des systèmes dynamiques qui mesure la capacité à déduire l'état interne d'un système à partir de ses sorties mesurées sur une période de temps donnée. En d'autres termes, un système est dit observable si, en connaissant les entrées et les sorties sur un intervalle fini, il est possible de déterminer de façon unique l'état initial du système. [1.2]

Définition formelle[1.2]

Pour un système linéaire continu représenté en espace d'état :

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

le système est observable si, pour tout état initial x_0 , la connaissance des sorties $y(t)$ et des entrées $u(t)$ sur un intervalle fini permet de retrouver x_0 .

Critère de Kalman[1.2]

La condition nécessaire et suffisante d'observabilité pour un système linéaire est que la

matrice d'observabilité ait un rang égal à l'ordre du système (nombre d'états n) :

Matrice d'observabilité [1.2]

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

Le système est observable si $\text{rang}(O) = n$.

Interprétation

- Si le système est observable, toutes les variables d'état peuvent être reconstruites à partir des mesures de sortie.
- Si le système n'est pas observable, il existe des états internes qui n'influencent jamais la sortie et qui ne peuvent donc pas être détectés ou estimés à partir des sorties seules.

Importance

L'observabilité est fondamentale pour la conception d'observateurs (estimateurs d'état) et pour le diagnostic des systèmes. Elle garantit qu'il est possible de surveiller et de contrôler efficacement le comportement du système, d'identifier des défaillances, et de prendre des décisions de pilotage ou de maintenance.

1.6 Stabilité

La stabilité est une propriété fondamentale des systèmes physiques et mécaniques, notamment dans l'analyse structurelle. Elle désigne la capacité d'une structure ou d'un système à conserver ou à retrouver un état d'équilibre après avoir subi une petite perturbation.

Définition générale

Un état d'équilibre est stable si, lorsqu'on soumet le système à une perturbation légère (déplacement ou force), il revient à son état initial ou reste dans un voisinage proche de cet état. À l'inverse, un état d'équilibre est instable si une petite perturbation conduit le système à s'éloigner de plus en plus de l'équilibre.

« L'équilibre d'un système mécanique est stable si, lorsque l'on déplace les points du système de leur position d'équilibre d'une quantité infinitésimale et en leur donnant à chacun d'eux une faible vitesse initiale, les déplacements des différents points du système restent, pendant le déplacement, contenus dans des limites imposées faibles. » (Définition de Dirichlet)

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les principes de base de l'analyse structurelle traditionnelle des systèmes dynamiques. Cette approche, qui repose sur l'utilisation d'équations

d'état, nous a aidés à déterminer les variables indépendantes, à souligner les contraintes internes et à examiner les caractéristiques cruciales de la commandabilité et de l'observabilité. Elle propose donc une perspective d'ensemble sur la structure mathématique et fonctionnelle d'un système, sans tenir compte des valeurs spécifiques de ses paramètres.

Malgré cela, bien que cette approche traditionnelle soit théoriquement correcte, elle a certains désavantages dans le cas de systèmes multiformes et multidimensionnels. Car les relations énergétiques entre diverses composantes (par exemple, l'électrique, le mécanique, l'hydraulique, thermique, etc.) rendent-elles difficiles à équilibrer d'une manière conjuguée.

C'est dans cette perspective que le formalisme BG se présente comme une option plutôt adaptée. En effet, il offre non seulement la possibilité de représenter de manière homogène les transferts d'énergie entre divers sous-systèmes mais aussi de tirer directement les informations structurelles requises pour l'analyse à partir du graphe causalisé.

Par conséquent, le prochain chapitre sera consacré à la modélisation en utilisant Bond Graph, qui constitue une généralisation naturelle de l'analyse structurelle classique. C'est également le départ pour un développement plus approfondi de la commandabilité, de l'observabilité et de la simulation des systèmes énergétiques complexes.

2.1 Introduction

Les bonds graphes sont une description graphique indépendante du domaine du comportement dynamique des systèmes physiques. Cela signifie que les systèmes de différents domaines (cf. électrique, mécanique, hydraulique, acoustique, thermodynamique, matériel) sont décrits de la même manière. La base est que les graphiques obligatoires sont basés sur l'énergie et l'échange d'énergie. Les analogies entre domaines sont plus que de simples équations étant analogues : les concepts physiques utilisés sont analogues.

La modélisation par bond-graph est un outil puissant pour modéliser des systèmes d'ingénierie, en particulier lorsque différents domaines physiques sont impliqués. De plus, les sous-modèles bond-graph peuvent être réutilisés avec élégance, car les modèles bond-graph sont non causaux. Les sous-modèles peuvent être vus comme des objets ; la modélisation bond-graph est une forme de modélisation de systèmes physiques orientée objet.

Les BG sont des graphes étiquetés et orientés, dans lesquels les sommets représentent des sous-modèles et les arêtes représentent une connexion énergétique idéale entre les ports d'alimentation. Les sommets sont des descriptions idéalisées de phénomènes physiques : ce sont des concepts, désignant les aspects pertinents (c'est-à-dire dominants et intéressants) du comportement dynamique du système. Il peut s'agir de graphes bond eux-mêmes, permettant ainsi des modèles hiérarchiques, ou bien d'un ensemble d'équations dans les variables des ports (deux à chaque port). Les arêtes sont appelées des liaisons. Elles désignent les connexions point à point entre les ports de sous-modèle. Lors de la préparation pour

la simulation, les liaisons sont incarnées comme des connexions à deux signaux avec des directions opposées. De plus, une liaison a une direction de puissance et une direction de causalité computationnelle. Une attribution correcte de la direction de puissance résout le problème de placement de panneaux lors de la connexion des structures de sous-modèles. Les internes des sous-modèles donnent des préférences à la direction computationnelle des liaisons à connecter.

Le concept des graphiques d'obligations a été lancé par Paynter (1961). L'idée a été développée par Karnopp et Rosenberg dans leurs manuels (1968, 1975, 1983, 1990), de sorte qu'elle pouvait être utilisée en pratique (Thoma, 1975; Van Dixhoorn, 1982). Grâce à la formulation par Breedveld (1984, 1985) d'un cadre basé sur la thermodynamique, la description du modèle bond-graph a évolué vers une théorie des systèmes.

Dans la prochaine section, nous introduirons la méthode bond graph par quelques exemples, où nous partons d'un réseau donné composé de modèles physiques idéaux. La transformation en bond graph conduit à un modèle indépendant du domaine. Nous introduirons les fondements des BG, et présenter les éléments de base et nous discuterons d'une méthode systématique pour dériver des BG à partir des systèmes d'ingénierie, nous passons en revue ce chapitre et incluons quelques conseils pour une lecture plus approfondie.

2.2 Exemples de Bond graph

Pour introduire les bond graph, nous discuterons d'exemples de deux domaines physiques différents, à savoir un circuit RLC (domaine électrique) et un système à ressort à masse amortie (domaine mécanique, traduction). Le circuit RLC est donné dans la figure 2.1.

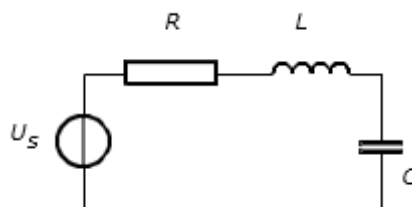


FIGURE 2.1 – Le circuit RLC

Dans les réseaux électriques, les variables de port des éléments du bond graph sont la tension électrique sur le port d'élément et le courant électrique à travers le port d'élément. Notez qu'un port est une interface d'un élément avec d'autres éléments; c'est le point de connexion des liaisons. La puissance échangée par un port avec le reste du système est le

produit de la tension et du courant : $P = ui$. Les équations d'une résistance, d'un condensateur et d'un inducteur sont :

$$u_R = i \times R$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad \text{ou} \quad i_L = \frac{1}{L} \int u dt$$

Afin de faciliter la conversion en bond graph, nous dessinons les différents éléments du domaine électrique de manière à ce que leurs ports deviennent visibles (Figure 2.2). À ce port, nous connectons une liaison de puissance ou une liaison courte. Cette liaison indique l'échange d'énergie entre les éléments. Une liaison est dessinée comme un bord avec une demi-flèche. La direction de cette demi-flèche indique la direction positive du flux d'énergie. En principe, la source de tension fournit l'énergie et les autres éléments absorbent l'énergie.

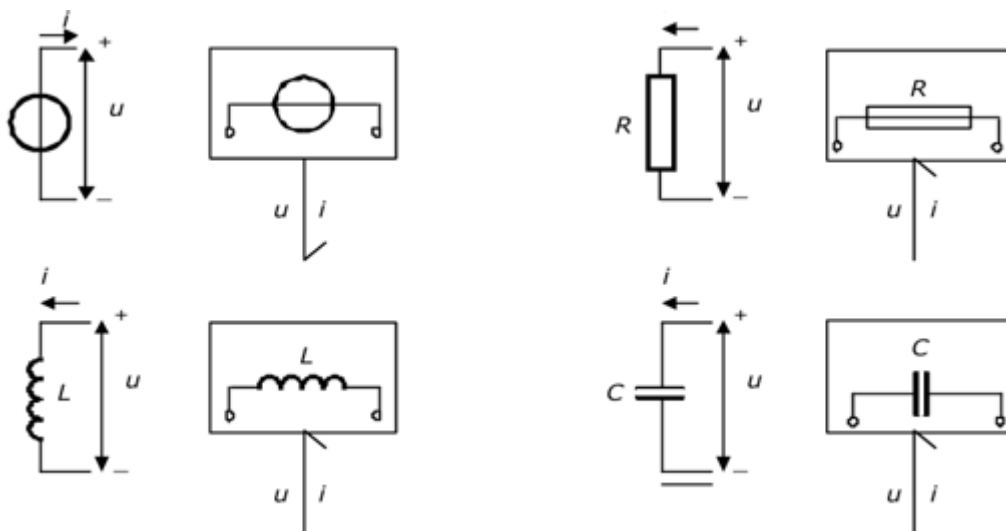


FIGURE 2.2 – Éléments électriques avec ports d'alimentation

En considérant le circuit de la figure 2.2, nous voyons que la tension sur les éléments est différente et que tous les éléments circulent le même courant. Nous indiquons ce courant avec i et connectons les liaisons de tous les éléments avec ce courant I (Figure 3). Changer les symboles électriques en mnémotechniques de bond graph correspondantes, donne le bond graph du circuit électrique. Le i commun est changé en un '1', une soi-disant 1-jonction. L'écriture des variables spécifiques le long des liaisons fait du bond graph électrique. La tension est mappée sur la variable d'effort indépendante du domaine—et les cartes de courant sur la variable de flux indépendante du domaine— (le courant toujours du côté de la flèche). La jonction 1 signifie que le courant (flux) à travers toutes les liaisons connectées

est le même, et que les tensions (efforts) s'élèvent à zéro, en considérant le signe. Ce signe est lié à la direction de puissance (c'est-à-dire la direction de la demi-flèche) de la liaison. Cette équation de sommation est la loi de tension de Kirchhoff.

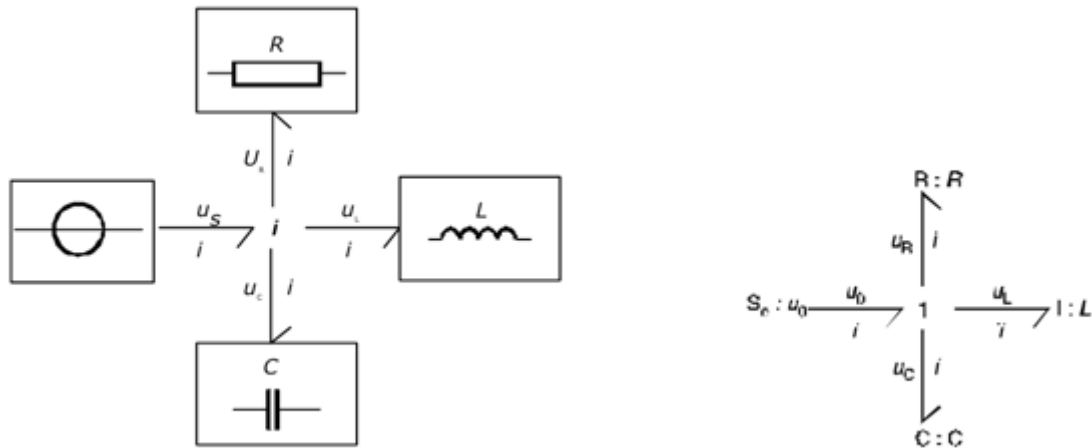


FIGURE 2.3 – BG avec des symboles électriques (à gauche) et avec des symboles standard (à droite).

Les connexions parallèles, dans lesquelles la tension sur tous les éléments connectés est la même, sont désignées par un u dans le réseau de symboles du port-. La mnémotechnique du bond-graph est un 0, le soi-disant 0-jonction. Une jonction 0-signifie que la tension (effort) sur toutes les liaisons connectées est la même, et que les courants (flux) s'additionnent à zéro, en considérant le signe. Cette équation de sommation est la loi actuelle de Kirchhoff.

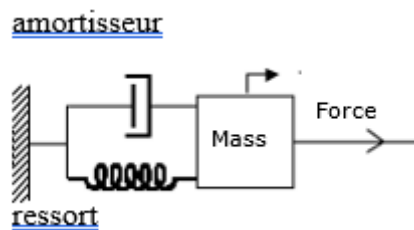


FIGURE 2.4 – Le système de ressort à masse amortie

Le deuxième exemple est le système de ressort à masse amortie-, un système mécanique illustré dans la figure 2.4. Dans les diagrammes mécaniques, les variables des éléments du bond graph sont la force sur l'élément port et la vitesse de l'élément port. Pour le domaine mécanique de rotation, les variables du port sont le couple et la vitesse angulaire. Encore une fois, deux variables sont impliquées. La puissance échangée par un port avec le reste du système est le produit de la force et de la vitesse : $P = Fv$ ($P = T\omega$ pour le cas de rotation). Les équations d'un amortisseur, du ressort et de la masse sont (nous utilisons le coefficient d'amortissement α , le coefficient de ressort K_s , la masse m et la force appliquée F_a) :

$$F_d = \alpha v$$

$$F_s = K_s \int v dt = \frac{1}{C_s} \int v dt$$

$$F_m = m \frac{dv}{dt} \quad \text{ou} \quad v = \frac{1}{m} \int F_m dt$$

F_a = force

De la même manière qu’avec le circuit électrique, nous pouvons redessiner l’élément de telle sorte que leurs ports deviennent visibles (Figure 2.5). Les extrémités libres de l’exemple ont toutes la même vitesse, ce qui est indiqué par un v . Cet élément de jonction implique également que les forces s’accumulent jusqu’à zéro, compte tenu du signe (lié à la direction de la puissance). La force est mappée sur un effort et la vitesse sur un flux. Pour le domaine mécanique de rotation, le couple est mappé sur un effort et la vitesse angulaire sur un écoulement. Cela implique que la force est liée à la tension électrique et que la vitesse est liée au courant électrique.

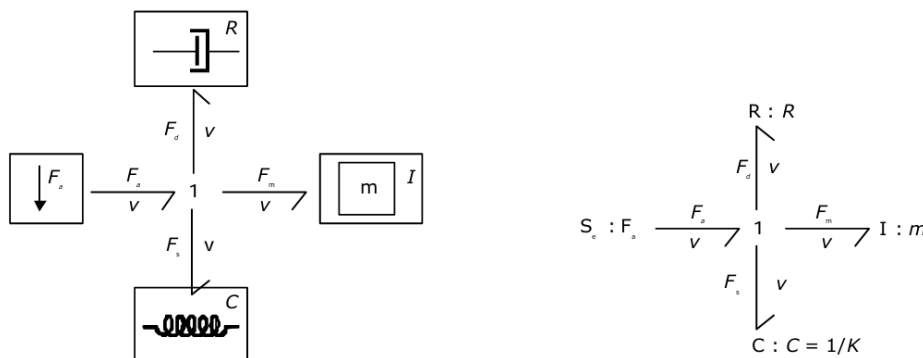


FIGURE 2.5 – bond graph avec des symboles mécaniques (à gauche) et avec des symboles standard (à droite)

Nous voyons les analogies suivantes entre les éléments mécaniques et électriques :

- L’amortisseur est analogue à la résistance.
- Le ressort est analogue au condensateur; la compliance mécanique correspond à la capacité électrique.
- La masse est analogue à l’inducteur.
- La source de force est analogue à la source de tension.
- La vitesse commune est analogue au courant de boucle.

En plus des points avec une vitesse commune, il existe également des points avec une force commune dans les systèmes mécaniques. Alors les forces sont toutes égales et les vi-

tesses s' additionnent pour être nulles, en considérant le signe (lié à la direction de puissance). Ces points de force communs sont dénotés comme des 0-jonctions dans un bond graph (un exemple est une concaténation d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur : les trois éléments sont connectés en 'série'). Une élaboration plus approfondie sur les analogies peut être trouvée dans la section suivante, où les fondements des graphiques obligatoires sont discutés.

À travers ces deux exemples, nous avons introduit la plupart des symboles de bond graph et indiqué comment dans deux domaines physiques les éléments sont transformés en mnémoniques de bond graph. Un groupe d'éléments du bond graph n'a pas encore été introduit : à savoir les transducteurs. Les exemples sont le transformateur électrique, un moteur électrique et des roues dentées. Dans la section suivante, nous discuterons des fondements des bonds graphes.

2.3 Fondements des bonds graphes

Les analogies entre différents systèmes ont été montrées dans la section précédente : Différents systèmes peuvent être représentés par le même ensemble d'équations différentielles. Ces analogies ont une base physique : les concepts physiques sous-jacents sont analogues, et par conséquent, les équations différentielles qui en résultent sont analogues. Les concepts physiques sont basés sur l'énergie et l'échange d'énergie. Le comportement par rapport à l'énergie est indépendant du domaine. C'est le même dans toutes les disciplines d'ingénierie, comme on peut en conclure en comparant le circuit RLC avec le système de ressort à masse amortie. Cela conduit à BG identiques.

2.3.1 Points de départ

Avant de discuter des propriétés spécifiques des BG et des concepts physiques élémentaires, nous rappelons d'abord les hypothèses générales pour les descriptions de réseau de systèmes physiques, comme les réseaux électriques, les schémas mécaniques ou hydrauliques :

- La loi sur la conservation de l'énergie est applicable.
- Il est possible d'utiliser une approche regroupée

Cela implique qu'il est possible de séparer les propriétés du système les unes des autres et de les désigner distinctement, tandis que les connexions entre ces sous-modèles sont idéales. Les propriétés du système séparé signifient des concepts physiques et les connexions idéales représentent le flux d'énergie, c'est-à-dire les liaisons entre les sous-modèles. Cette propriété d'idéalité des connexions signifie que dans ces connexions, aucune énergie ne peut être générée ou dissipée.

Les sous-modèles du système sont des concepts, des descriptions idéalisées de phénomènes physiques, qui sont reconnus comme le comportement dominant dans les composants (c'est à dire la vie réelle, les parties tangibles du système). Cela implique qu'un modèle d'une pièce concrète n'est pas seulement nécessaire à un concept, mais peut consister en un ensemble de concepts interconnectés.

2.3.2 Bonds et ports

Le point de contact d'un sous-modèle auquel une connexion idéale sera connectée est appelé un port d'alimentation ou port en abrégé. La connexion entre deux sous-modèles est appelée liaison de puissance ou liaison; elle est tracée comme une seule ligne (Figure 2.6). Ce lien désigne un flux d'énergie idéal entre les deux sous-modèles connectés. L'énergie entrant dans le lien d'un côté quitte immédiatement le lien de l'autre côté (continuité de puissance).

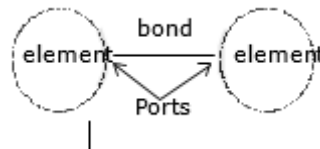


FIGURE 2.6 – Le flux d'énergie entre deux sous-modèles représentés par une bond

Figure6 : Le flux d'énergie le long d'une liaison a la dimension physique du pouvoir, étant le produit de deux variables. L'interprétation est utile dans chaque domaine physique où il y a une telle combinaison de variables. Dans les réseaux électriques, les deux variables sont la tension et le courant. Dans les systèmes mécaniques, les paires variables sont la force et la vitesse pour la translation et le couple et la vitesse angulaire pour la rotation. En hydraulique, c'est la pression et le débit volumique. Pour les systèmes thermodynamiques, on utilise la température et l'entropie. Ces paires de variables sont appelées (puissance-) variables conjuguées.

Afin de comprendre la connexion telle qu'établie par un lien, ce lien peut être interprété de deux manières différentes, à savoir :

1. Comme une interaction d'énergie.

Les sous-systèmes connectés forment une charge entre eux par leur échange d'énergie. Une liaison de puissance incarne une connexion où une quantité physique est échangée.

2. Comme un flux de signal bilatéral.

La connexion est interprétée comme deux signaux, un effort et un flux, circulant dans des directions opposées, déterminant ainsi la direction computationnelle des variables de liaison. En ce qui concerne l'un des sous-modèles connectés, l'effort est l'entrée et le flux la sortie, tandis que pour l'autre sous-modèle, l'entrée et la sortie sont bien sûr établies par le flux et l'effort respectivement.

Ces deux façons de concevoir une liaison sont essentielles dans la modélisation des BG. La modélisation commence par indiquer la structure physique du système. Les liaisons sont d'abord interprétées comme des interactions d'énergie, puis les liaisons sont dotées de la direction computationnelle, interprétant les liaisons comme des flux de signaux bilatéraux. Pendant la modélisation, il n'est pas encore nécessaire de décider quelle est la direction computationnelle des variables de liaison. Ce n'est pas que, déterminer la direction computationnelle lors de la modélisation restreint la réutilisation du sous-modèle. Il est cependant nécessaire de dériver le modèle mathématique (ensemble d'équations différentielles) à partir du graphique. Le processus de détermination de la direction computationnelle des variables liées est appelé analyse causale. Le résultat est indiqué dans le graphique par le soi-disant trait causal, indiquant la direction de l'effort, et est appelé la causalité du lien (Figure 2.7).

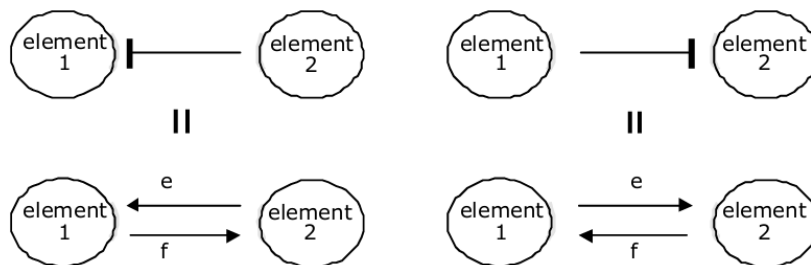


FIGURE 2.7 – Déterminez la direction du signal de l'effort et du flux (nous n'utilisons pas la direction de puissance au niveau des liaisons, donc ce n'est pas montré ici).

Sous forme d'équation, la figure 2.7 peut être écrite comme :

$$\begin{array}{ll} \text{élément1.e} := \text{élément2.e} & \text{élément2.e} := \text{élément1.e} \\ \text{élément2.f} := \text{élément1.f} & \text{élément1.f} := \text{élément2.f} \end{array}$$

Comme nous venons de l'entrevoir, cette approche permet de représenter les échanges d'énergie en terme de flux et d'effort entre les éléments du système physique appelé ports.

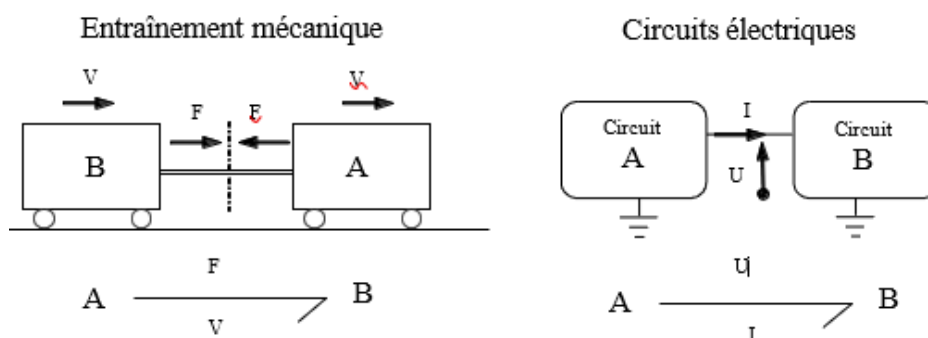


FIGURE 2.8 – Conventions d'un lien

Ainsi si le véhicule A entraîne la charge B, la force de traction F sera l'effort et la vitesse le flux; la demi-flèche donne alors le sens de passage de l'énergie.

Dans le domaine électrique, lorsque le circuit A alimente le circuit B, la tension U représente l'effort et le courant I le flux (au sens des bond graphs).

Pour résumer, si deux composants d'un système physique s'échangent de l'énergie. Par convention la demi-flèche appelée lien indique le sens du transit. Pour ce sens, le transfert de la puissance sera considéré comme positive. Par convention, A sera le port d'entrée et B le port de sortie.

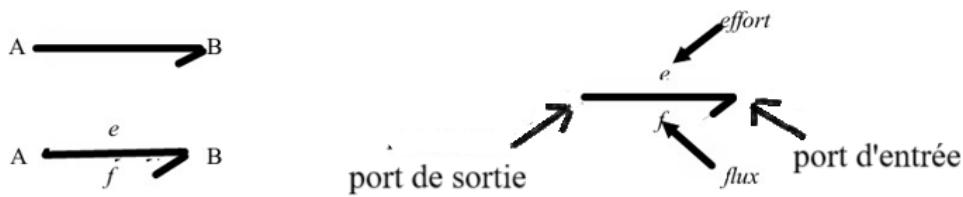


FIGURE 2.9 – Représentations d'un lien entre deux ports

Le lien comportera deux grandeurs, la variable de flux notée f est une variable extensive et correspond à un nombre de particules par unité de temps. La variable d'effort, notée e est une variable intensive indépendante de toute quantité de matière. La variable f de flux est notée du côté de la demi-flèche et l'effort e sur le côté opposé. Le produit de l'effort par le flux représente la puissance échangée.

Lors de l'élaboration d'un bond graph, chaque élément est schématisé par un ensemble de ports communiquant par des liens indiquant le sens de transfert de la puissance.

Pour des ensembles importants, il est parfois utile de faire une analyse plus macroscopique en définissant des sous-systèmes, dans ce cas le bond graph à mots est utilisé.

Afin d'illustrer cette approche, pour un véhicule électrique, une analyse par bond graph à mots donne la décomposition suivante :

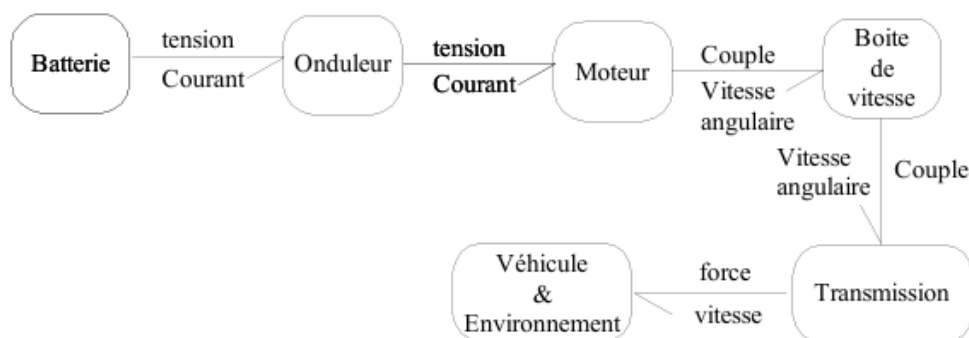


FIGURE 2.10 – Bond graph à mots

2.4 Expressions de la puissance et de l'énergie

A partir des grandeurs de *flux* et d'*effort* d'autres variables peuvent être définies :

2.4.1 La variable de puissance (P)

La puissance échangée résulte du produit d'un *flux* par un *effort*.

$$P = e \cdot f$$

Exemples :

En mécanique l'*effort*, est la force ou le couple et le *flux* la vitesse linéaire ou angulaire, nous aurons dans ce domaine les expressions classiques

$$P = F \cdot V$$

avec la *force* en newton et le *flux* en m/s.

$$P = C \cdot \omega$$

Ici la *force* correspond au couple en Nm et le *flux* à la vitesse angulaire en rad/s.

2.4.2 La variable de moment généralisé p(t)

Le moment généralisé noté p(t) correspond à l'intégrale de l'effort

$$p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau + p(0)$$

Exemples :

Domaine électrique.

Ici l'effort et le flux sont représentés, respectivement par la tension et le courant, il vient :

$$p(t) = \int_0^t V(\tau) d\tau + p(0)$$

Domaine mécanique.

Pour un mouvement de translation, l'effort est la force et le flux la vitesse linéaire.

Dans le cas d'une translation

$$p(t) = \int_0^t F(\tau) d\tau + p(0)$$

Ici, le moment généralisé p(t) représente l'impulsion en Ns.

Pour les mouvements de rotation, l'effort est le couple et le flux la vitesse de rotation angulaire.

En rotation

$$p(t) = \int_0^t C(\tau) d\tau + p(0)$$

et le moment généralisé $p(t)$ sera l'impulsion angulaire en Nms.

2.4.3 La variable de déplacement généralisé $q(t)$

Cette notion de déplacement est la grandeur duale du moment généralisé. Cette variable s'exprime par l'intégrale du flux soit :

Exemples :

Domaine électrique.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'effort et le flux correspondent respectivement à la tension et au courant.

$$q(t) = \int_0^t I(\tau) d\tau + q(0)$$

Dans le domaine électrique le déplacement représente la charge en Coulomb.

Domaine mécanique.

Pour un mouvement de translation

$$q(t) = \int_0^t V(\tau) d\tau + q(0)$$

L'intégrale de la vitesse est ici le déplacement exprimé en m.

$$x(t) = \int_{t_0}^t V(\tau) d\tau + x(0)$$

C'est de la particularité, de cette variable dans le domaine mécanique, que vient la dénomination de déplacement.

Pour un mouvement en rotation

$$q(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + q(0)$$

L'intégration de la vitesse angulaire donne l'angle, dans ce domaine le déplacement correspond donc à la rotation angulaire exprimée en rad.

$$\theta(t) = \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$$

2.4.4 Variable d'énergie E(t)

L'énergie correspond à l'intégration de la puissance

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

Exemples :

Domaine électrique.

Dans le domaine électrique nous aurons :

$$E(t) = \int_0^t V(\tau) \cdot I(\tau) d\tau + E(0)$$

Domaine mécanique.

Pour un mouvement de translation l'effort est la force et le flux la vitesse linéaire. En rotation l'effort est le couple et le flux la vitesse de rotation.

En translation

$$E(t) = \int_0^t F(\tau)V(\tau)d\tau + E(0)$$

En rotation

$$E(t) = \int_0^t C(\tau)\omega(\tau)d\tau + E(0)$$

Variables de flux et d'effort

Domaine	Effort e	Flux f	Moment p	Déplacement q
Electrique	Tension en Volt	Courant en ampère	Impulsion en V.s	Charge en Coulomb
Magnétique	Force magnétomotrice	Dérivée du flux magnétique		Flux magnétique
Mécanique translation	Force en N	Vitesse en m/s	Impulsion en N.s	Déplacement en mètre
Mécanique rotation	Couple en Nm	Vitesse en rad/s	Impulsion en N.m.s	Angle en radian
Hydraulique	Pression en Pascal (N/m ²)	Débit		Volume en m ³
Thermique	Température °K	Dérivée de l'entropie S		Entropie S
Chimique	Potentiel chimique μ	Flux molaire		Nombre de moles

TABLE 2.1 – Résumé des variables d'effort et de flux

2.5 Éléments du bond graph

Les équations constitutives des éléments du bond graph sont introduites via des exemples issus des domaines électrique et mécanique. La nature des équations constitutives impose des exigences sur la causalité des liens liés. Les éléments du BG sont dessinés sous forme de combinaisons de lettres (codes mnémotechniques) indiquant le type d'élément. Les éléments sont les suivants :

C élément de stockage pour une variable de type q , par exemple condensateur (stocke la charge), ressort (stocke le déplacement).

I élément de stockage pour une variable de type p , par exemple inducteur (stocke la liaison de flux), masse (stocke la quantité de mouvement).

R résistance dissipant l'énergie libre, par exemple résistance électrique, friction mécanique.

Se / Sf sources, par exemple secteur électrique (source de tension), gravité (source de force), pompe (source d'écoulement).

TF transformateur, par exemple un transformateur électrique, roues dentées, levier.

GY gyrateur, par exemple électromoteur, pompe centrifuge.

0 / 1 0- et 1-jonctions, pour connecter idéalement deux ou plusieurs sous-modèles.

2.5.1 Éléments de stockage

Les éléments de stockage stockent toutes sortes d'énergie libre. Comme indiqué ci-dessus, il existe deux types d'éléments de stockage : les éléments C- et les éléments I-. Les variables de type q- et p- sont des quantités conservées et résultent d'un processus d'accumulation (ou d'intégration). Ce sont les variables d'état du système.

Dans les éléments C-, comme un condensateur ou un ressort, la quantité conservée, q , est stockée en accumulant le flux net, f , vers l'élément de stockage. Cela donne l'équation différentielle

$$\dot{q} = f$$

qui est appelé une équation d'équilibre, et fait partie des équations constitutives de l'élément de stockage. Dans l'autre partie des équations constitutives, la variable d'état, q , est liée à l'effort

$$e = e(q)$$

Cette relation dépend de la forme spécifique de l'élément de stockage particulier.

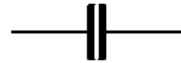
Dans la figure 2.11, des exemples d'éléments C- sont donnés avec le schéma-bloc équivalent. Les équations pour un condensateur linéaire et un ressort linéaire sont :

$$\dot{q} = i \quad u = \frac{1}{C} q$$

$$\dot{x} = v \quad F = kx = \frac{1}{C} x$$

Pour un condensateur, C [F] est la capacité et pour un ressort, K [N/m] est la rigidité et C [m/N] la compliance. Pour tous les autres domaines, un élément C- peut être défini.

La variable d'effort est égale lorsque deux éléments de stockage C- connectés en parallèle avec une résistance entre eux sont en équilibre. Par conséquent, la propriété indépendante du domaine d'un effort est la détermination de l'équilibre.



condensateur



Ressort translationnel



ressort rotatif

Élément de bond-graph

Équations

Expansion du schéma bloc

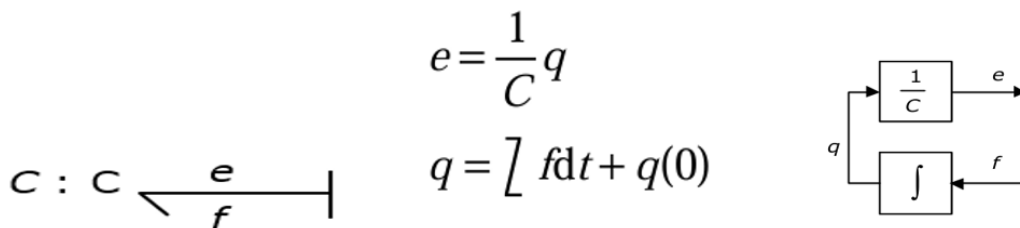


FIGURE 2.11 – Exemples d'éléments C

Dans les éléments I-, comme un inducteur ou une masse, la quantité conservée, p , est stockée en accumulant l'effort net, e , à l'élément de stockage. L'équation différentielle résultante est

$$\dot{p} = f$$

qui est l'équation d'équilibre. La partie spécifique à l'élément-des équations constitutives est

$$f = f(p)$$

Dans la figure 2.12, des exemples d'éléments I- sont donnés avec le schéma-bloc équivalent. Les équations pour un inducteur linéaire et une masse linéaire sont :

$$\dot{\lambda} = u, \quad i = \frac{1}{L} \lambda$$

$$\dot{p} = f, \quad v = \frac{1}{m} p$$

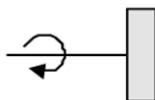
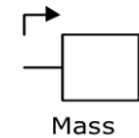
Pour un inducteur, L [H] est l'inductance et pour une masse, m [kg] est la masse. Pour tous les autres domaines, un élément I-peut être défini.

La variable de flux est égale lorsque deux éléments de stockage I–connectés en parallèle avec une résistance entre eux, sont à l'équilibre. Par conséquent, aux éléments I–, la propriété indépendante du domaine–de l'écoulement est la détermination de l'équilibre. Par exemple, lorsque deux corps, se déplaçant librement dans l'espace et ayant chacun un moment différent, sont couplés (entrent en collision et collent ensemble), le moment se divisera entre les masses de sorte que la vitesse des deux masses soit la même (c'est la loi de conservation du moment).



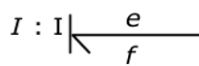
Inducteur

Symboles spécifiques au domaine schéma-bloc



inertance

Élément de bond-graph



Équations

$$f = \frac{1}{I} p$$

$$p = \int e dt + p(0)$$

Expansion du

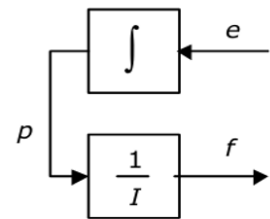


FIGURE 2.12 – Exemples d'éléments I

Notez qu'au niveau des deux types d'éléments de stockage, le rôle de l'effort et du flux est échangé : l'élément C– et l'élément I–sont chacun la forme duale de l'autre.

Les diagrammes en blocs dans la figure 2.11 et 2.12, ainsi que dans les figures 2.13 à 2.19 suivantes, montrent la direction computationnelle des signaux impliqués. Ils sont en effet l'expansion du BG causales correspondant. Les équations sont données sous forme computationnelle, en accord avec le BG causales et le schéma-bloc.

2.5.2 Résistances

Les résistances, R–éléments, dissipent l'énergie libre. Des exemples sont les amortisseurs, les frictions et les résistances électriques (Figure 2.13). Dans les composants mécaniques réels, la friction est toujours présente. L'énergie d'un domaine arbitraire s'écoule de manière irréversible vers le domaine thermique (et la chaleur est produite). Cela signifie que

le flux d'énergie vers la résistance est toujours positif. L'équation constitutive est une relation algébrique entre l'effort et le flux, et se situe principalement dans le premier ou le troisième quadrant.

$$e = r(f)$$

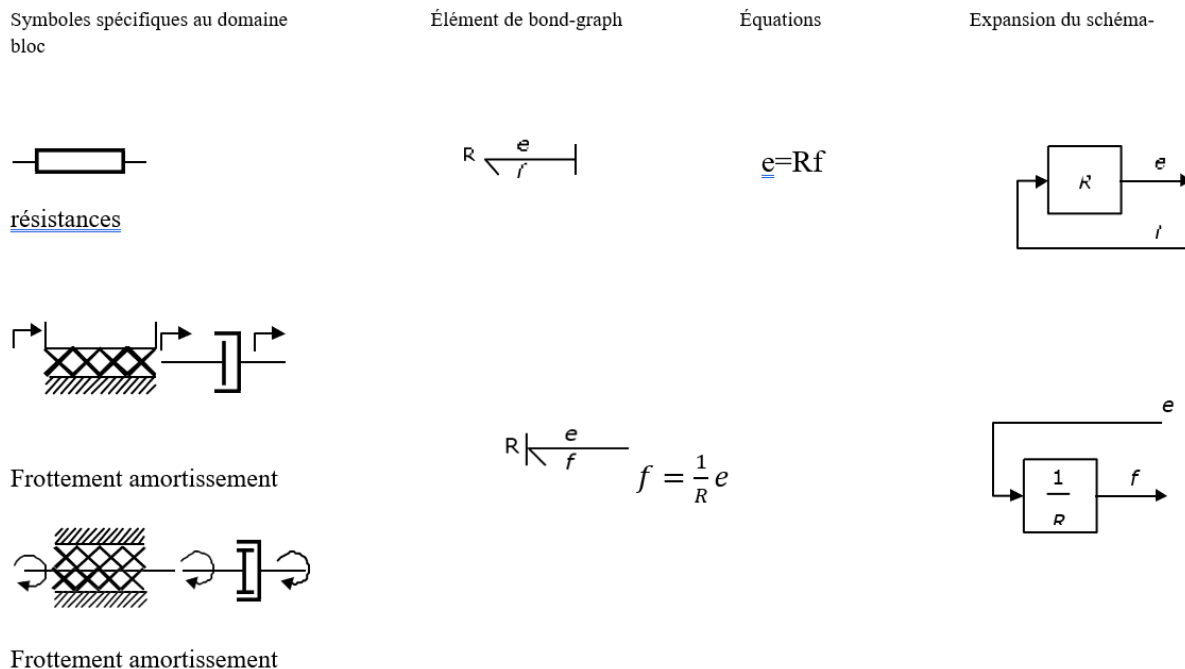


FIGURE 2.13 – Exemples de résistances

Une résistance électrique est principalement linéaire (à température constante), à savoir la loi d'Ohm. La valeur de la résistance électrique est en $[\Omega]$.

$$U = Ri$$

La friction mécanique est principalement non linéaire. La fonction de résistance est une combinaison de friction sèche et de friction visqueuse. La friction sèche est une force de frottement constante et la friction visqueuse est le terme linéaire.

Parfois, stiction est également impliquée, une force de traction relâchée applicable uniquement lors du démarrage d'un mouvement. Toutes ces formes de frottement peuvent être modélisées avec l'élément R-. La friction visqueuse a comme formule (R dans $[Ns/m]$) :

$$F = Rv$$

Si la valeur de résistance peut être contrôlée par un signal externe, la résistance est une résistance modulée, avec MR mnémonique. Un exemple est un robinet hydraulique : la position du robinet est contrôlée de l'extérieur, et il détermine la valeur du paramètre de résistance.

Si le domaine thermique est modélisé explicitement, la production d'énergie thermique doit être indiquée explicitement. Puisque le dissipateur produit de l'énergie thermique de manière irréversible, le port thermique est utilisé comme une sorte de source d'énergie thermique. Le R devient un RS.

2.5.3 Sources

Les sources représentent l'interaction d'un système avec son environnement. Les exemples sont les forces externes, les sources de tension et de courant, les moteurs idéaux, etc. (Figure 2.11). Selon le type de la variable imposée, ces éléments sont dessinés comme Se ou Sf.

En outre, en tant que source « réelle », les éléments sources sont utilisés pour donner à une variable une valeur fixe. Par exemple, dans le cas d'un point dans un système mécanique avec une position fixe, on utilise un Sf de valeur 0 (position fixe signifie vitesse zéro).

Lorsqu'une partie d'un système doit être excitée, il faut souvent une forme de signal connue, qui peut être modélisée par une source modulée commandée par une certaine forme de signal. Un exemple est présenté à la Figure 2.14.

Symboles spécifiques au domaine Éléments de bond-graph Équations Expansion du schéma-bloc

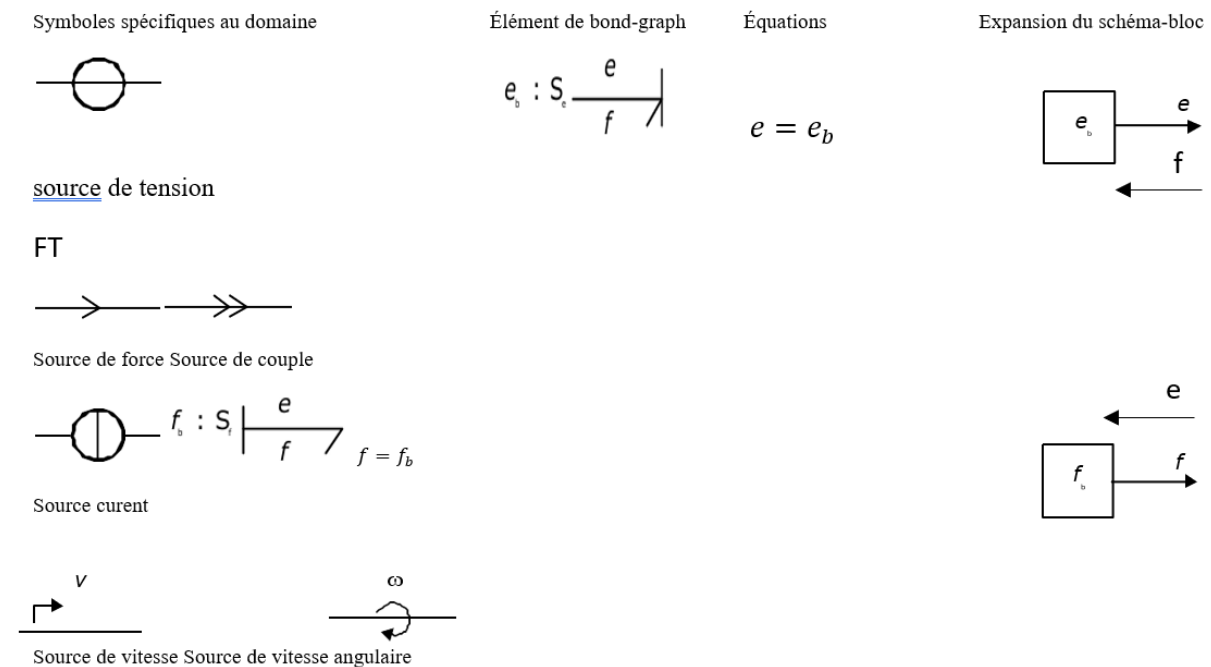


FIGURE 2.14 – Exemples de sources

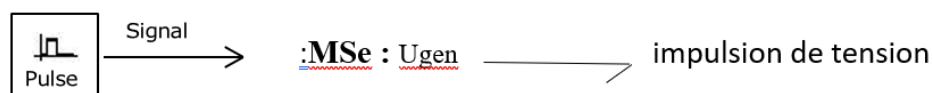


FIGURE 2.15 – Exemple d'une source de tension modulée

2.5.4 Transformateur

Un transformateur idéal est représenté par TF et sa puissance est continue (c'est-à-dire qu'aucune puissance n'est stockée ou dissipée). La transformation peut se faire au sein d'un

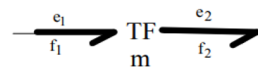
même domaine (roue dentée, levier) ou entre différents domaines (électromoteur, treuil).

Les équations sont :

$$e1 = ne2$$

$$f2 = nf1$$

Les efforts sont transduits en efforts et les flux en flux. Le paramètre n est le rapport de transformateur. En raison de la continuité de puissance, un seul paramètre sans dimension, n , est nécessaire pour décrire à la fois la transduction de l'effort et la transduction du flux. Le paramètre n est défini sans ambiguïté comme suit : $e1$ et $f1$ appartiennent à la liaison pointant vers le TF. Cette façon de définir le taux de transformation est la norme dans les principales publications (Karnopp et Rosenberg, 1990;Thoma, 1989;Breedveld, 1985; Cellier, 1991). Si n n'est pas constant, le transformateur est un transformateur modulé, une MTF. Le rapport du transformateur devient maintenant un signal d'entrée pour la MTF



- Transformateurs – établir un rapport entre l'effort d'un port et celui de l'autre et le flux d'un port à l'autre

Efforts et flux liés au module du transformateur, m

Loi constitutive :

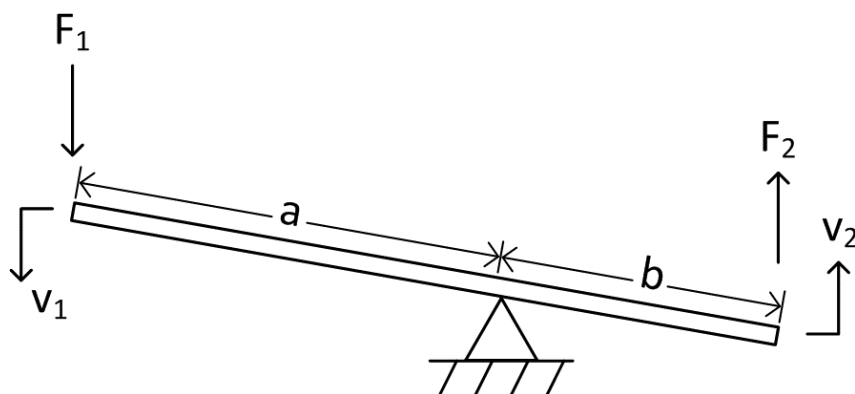
$$e2 = m \cdot e1$$

et

$$f2 = \frac{1}{m} \cdot f1$$

- La puissance est conservée, donc

$$e1 \cdot f1 = e2 \cdot f2 = m \cdot e1 \cdot \frac{1}{m} \cdot f1 = e1 \cdot f1$$



2.5.4.1 Transformateur – mécanique

- Relation des efforts, F_1 et F_2

Équilibrer les moments :

$$a \cdot F_1 = b \cdot F_2$$

donc

$$F_2 = \frac{a}{b} \cdot F_1$$

- Relation des flux, v_1 et v_2

Vitesse angulaire égale tout le long du bras de levier :

$$\omega = \frac{v_1}{a} = \frac{v_2}{b}$$

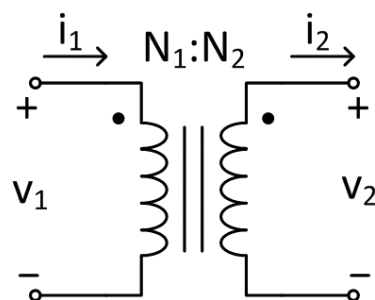
$$v_2 = \frac{b}{a} \cdot v_1$$

- Modèle de graphe d'obligations :

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{f_1} \text{TF} \xrightarrow{f_2} \\ e_1 \quad \quad e_2 \\ \quad \quad \quad \dot{a}/\dot{b} \\ e_2 = (a/b)e_1 \end{array}$$

Inclure la relation effort-effort ou flux-flux

2.5.4.2 Transformateur – électrique



- Relation des flux, i_1 et i_2

Échelles de courant avec le rapport de tours :

$$i_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot i_1$$

- Relation des efforts, v_1 et v_2

Echelle de tension avec l'inverse du rapport de tours :

$$v_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot v_1$$

- La puissance est conservée

$$P_{out} = i_2 \cdot v_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot i_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot v_1 = i_1 \cdot v_1 = P_{in}$$

- Modèle de BG

$$\begin{array}{c} \frac{f_1}{e_1} \rightarrow \text{TF} \leftarrow \frac{f_2}{e_2} \\ \vdots \\ N_1/N_2 \\ e_2 = (N_2/N_1)e_1 \end{array}$$

2.5.5 Gyrateur

Un gyrateur idéal est représenté par GY, et sa puissance est également continue (c'est-à-dire qu'aucune puissance n'est stockée ou dissipée. Les exemples sont un électromoteur, une pompe et une turbine. Les réalisations réelles des gyrateurs sont principalement des transducteurs représentant une transformation de domaine. Les équations sont :

$$e_1 = r f_2$$

$$e_2 = r f_1$$

Le paramètre r est le rapport de gyrateur, et en raison de la continuité de l'alimentation, un seul paramètre pour décrire les deux équations. Aucune définition supplémentaire n'est nécessaire puisque les équations sont symétriques (peu importe quel point de liaison vers l'intérieur, seulement qu'un point de liaison pointe vers et que les autres points forment le gyrateur). r a une dimension physique, puisque r est une relation entre effort et flux (il a la même dimension que le paramètre de l'élément R). Si r n'est pas constant, le gyrateur est un gyrateur modulé, un MGY.

$$\begin{array}{c} e_1 \rightarrow \text{GY} \leftarrow e_2 \\ \leftarrow f_1 \quad \leftarrow f_2 \\ r \end{array}$$

- Gyrateurs – effort à un port lié au débit à l'autre

Efforts et flux liés au module de gyrateur, r

Loi constitutive :

$$e_2 = r \cdot f_1$$

et

$$f_2 = \frac{1}{r} \cdot e_1$$

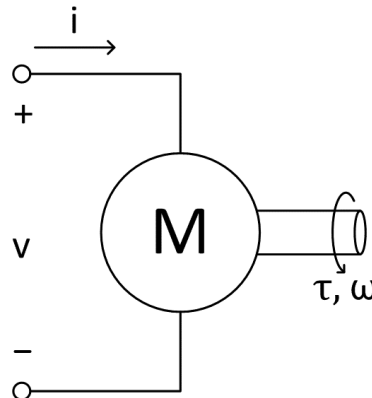
- La puissance est ainsi conservée

$$e1 \cdot f1 = e2 \cdot f2 = r \cdot f1 \cdot \frac{1}{r} \cdot e1 = e1 \cdot f1$$

- Le module de gyrator relie l'effort et le flux – une résistance vraiment, une transrésistance

Gyrator - Exemple

- Moteur électrique idéal



Courant électrique, un flux, converti en couple, un effort

- Courant et couple liés à la constante du moteur, k_m

$$\tau = k_m \cdot i$$

- La puissance est conservée

$$\begin{array}{c} \frac{f_1}{e_1} \rightarrow \text{GY} \xrightarrow{f_2} \frac{f_2}{e_2} \\ \cdot \\ k_m \\ e_2 = k_m f_1 \end{array}$$

relation entre la tension et la vitesse angulaire est inverse

$$\omega = \frac{1}{k_m} \cdot v$$

2.5.6 Les détecteurs

Ce sont des éléments qui placés dans le bond graph indiquent la présence d'un capteur ou d'un instrument de mesure supposé idéal.

Ainsi aucune puissance n'est consommée par le détecteur, nous distinguerons selon le type de mesure faite deux types de détecteur :

FIGURE 2.16 – Détecteur d'effort

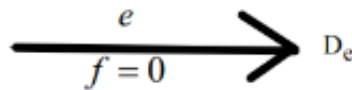
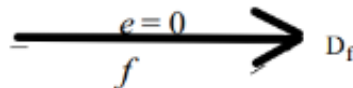


FIGURE 2.17 – Détecteur de flux



2.6 Jonctions

Les jonctions couplent deux ou plusieurs éléments de manière continue : il n'y a pas de stockage ni de dissipation d'énergie dans une jonction. Des exemples sont une connexion série ou une connexion parallèle dans un réseau électrique, un couplage fixe entre les parties d'un système mécanique. Les jonctions sont port-symétriques : les ports peuvent être échangés dans les équations constitutives. Suite à ces propriétés, il peut être prouvé qu'il n'existe que deux paires de jonctions : la jonction 1–et la jonction 0–.

La jonction 0–représente un nœud auquel tous les efforts des liaisons de connexion sont égaux (Figure 2.18). Un exemple est une connexion parallèle dans un circuit électrique. En raison de la continuité de l'énergie, la somme des flux des liaisons de connexion est nulle, compte tenu du signe. La direction de la puissance (c'est-à-dire la direction de la demi-flèche) détermine le signe des flux : toutes les liaisons pointant vers l'intérieur obtiennent un plus et toutes celles orientées vers l'extérieur obtiennent un moins. Cette sommation est la loi du courant de Kirchhoff dans les réseaux électriques : tous les courants se connectant à un nœud sont égaux à zéro, en considérant leurs signes : tous les courants entrants sont positifs et tous les courants sortants sont négatifs.

Nous pouvons représenter la jonction 0–comme la représentation d'une variable d'effort, et souvent la jonction 0–sera interprétée comme telle. La jonction 0–est plus que la loi de courant (généralisée) de Kirchhoff, à savoir aussi l'égalité des efforts (comme les tensions électriques étant égales à une connexion parallèle).

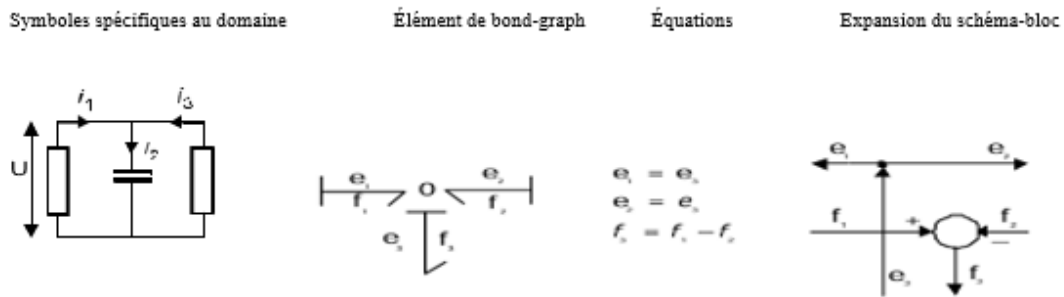


FIGURE 2.18 – Exemple d’une 0-jonction

La jonction 1- (Figure 2.19) est la forme duale de la jonction 0- (les rôles de l’effort et du flux sont échangés). La 1-jonction représente un nœud auquel tous les flux des liaisons de connexion sont égaux. Un exemple est une connexion en série dans un circuit électrique. Les efforts s’élèvent à zéro, en conséquence de la continuité du pouvoir. Encore une fois, la direction de puissance (c’est-à-dire la direction de la demi-flèche) détermine le signe des efforts : toutes les obligations pointant vers l’intérieur obtiennent un plus et toutes les obligations pointant vers l’extérieur obtiennent un moins.

Cette sommation est la loi de tension de Kirchhoff dans les réseaux électriques : la somme de toutes les différences de tension le long d’une boucle fermée (un maillage) est nulle. Dans le domaine mécanique, la 1-jonction représente un équilibre de force (également appelé le principe d’Alembert), et est une généralisation de la troisième loi de Newton, action = - réaction). Tout comme avec la jonction 0-, la jonction 1-est plus que ces sommations, à savoir l’égalité des flux. Par conséquent, nous pouvons décrire la jonction 1-comme la représentation d’une variable de flux, et souvent la jonction 1 sera interprétée comme telle.

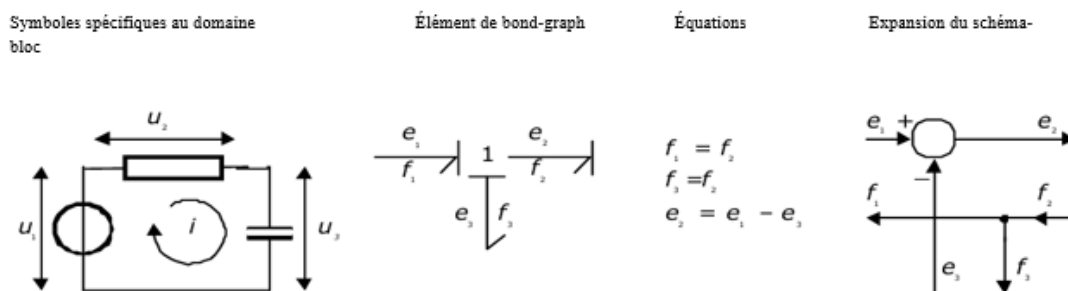


FIGURE 2.19 – Exemple d’une 1-jonction

2.6.1 Orientation positive

Par définition, la puissance est positive dans la direction de l’obligation de puissance (c’est-à-dire la direction de la demi-flèche). Un port auquel une liaison entrante est connec-

tée consomme de l'énergie si cette énergie est positive (c'est-à-dire que l'effort et le flux sont soit positifs, soit négatifs, car le produit de l'effort et du flux est la puissance). En d'autres termes : le pouvoir s'écoule dans la direction de la demi-flèche si elle est positive et dans l'autre sens si elle est négative.

Les éléments R-, C- et I- ont une liaison entrante (demi-flèche vers l'élément) en standard, ce qui entraîne des paramètres positifs lors de la modélisation des composants réels. Pour les éléments sources, la norme est sortante, car les sources fournissent principalement de l'énergie au reste du système. Une source réelle-vie a alors un paramètre positif. Pour les éléments TF- et GY- (transformateurs et gyrateurs), la norme est d'avoir une liaison entrante et une liaison sortante, pour montrer le flux d'énergie « naturel ». De plus, en utilisant la définition standard du paramètre au niveau du transformateur (la liaison entrante est connectée au port 1 et le rapport n est e_1/e_2), des paramètres positifs seront obtenus. Notez qu'un gyrateur n'a pas besoin d'une telle définition, car ses équations sont symétriques.

Il est possible, cependant, que des paramètres négatifs se produisent. À savoir, au niveau des transformateurs et des sources dans le domaine mécanique lorsqu'il y a un inversement de vitesse ou que la source agit dans la direction négative.

En utilisant les définitions discutées dans cette section, la définition du bond-graph est sans ambiguïté, ce qui implique qu'en principe il n'y a pas besoin de confusion. De plus, cette manière systématique aidera à résoudre d'éventuels problèmes de placement de panneaux souvent rencontrés en modélisation.

2.6.2 Dualité et double domaine

Les deux éléments de stockage sont chacun la forme duale de l'autre. Le rôle de l'effort et du flux dans un élément C- et un élément I- sont échangés. Laisser l'un des éléments de stockage (et aussi l'une des sources) hors de la liste des éléments du bond graph, pour rendre cette liste aussi petite que possible, peut être utile d'un point de vue mathématique, mais n'améliore pas la compréhension en physique.

Décomposer un élément I en un GY et un C, cependant, donne plus d'informations. Le seul élément de stockage maintenant est l'élément C-. Le flux n'est qu'une dérivée temporelle d'une quantité conservée, et l'effort détermine l'équilibre. Cela implique que les domaines physiques sont en fait des paires de deux domaines doubles : en mécanique, nous avons des domaines potentiels et cinétiques pour la rotation et la translation), dans les réseaux électriques, nous avons les domaines électrique et magnétique. Cependant, dans le domaine thermodynamique, une telle forme duelle n'existe pas (Breedveld, 1982). Cela est

cohérent avec le fait qu'il n'existe pas de stockage de type thermique I- (en conséquence de la deuxième loi de la thermodynamique : dans un système isolé thermiquement, l'entropie ne diminue jamais).

Aperçu

Nous avons discuté des éléments de base du bonds graphes et des liaisons, afin que nous puissions transformer un modèle physique idéal dépendant du domaine, écrit dans des symboles dépendants du domaine en un BG. Pour cette transformation, il existe une procédure systématique, qui sera présentée dans la prochaine section.

2.7 Procédures de construction de modèles

Nous allons ici présenter une méthodologie simple pour laquelle les phénomènes physiques ne sont pas couplés.

Dans les domaines électriques et mécaniques les associations série / parallèle sont duales vis à vis des jonctions 1 et 0. Les lignes directrices seront donc différentes dans les deux cas.

Pour les circuits électriques :

1. Identifier tous les éléments du système étudié.
2. Identifier et nommer le point du système dont les variables d'effort différent (tension).

Pour toutes ces valeurs d'effort placer une jonction 0. Fixer une référence pour l'effort (tension).

3. Placer des jonctions 1 entre les jonctions 0 afin de prendre en compte les relations existant entre les flux (courant).

4. Relier les jonctions par des liens en respectant le sens du transfert de la puissance.

5. Placer les éléments de base présents dans le circuit, soit sur l'extrémité du lien libre associé, soit sur la jonction concernée

6. Eliminer tous les liens dont le potentiel correspond au potentiel choisit comme référence, puis éliminer toutes les jonctions 0 et 1 relatives à deux liens n'introduisant pas de changement de signe.

Pour les systèmes mécaniques :

1. Identifier tous les éléments du système étudié.

2. Identifier et nommer le point du système dont les variables de flux différent (vitesse, courant). Pour toutes les valeurs du flux placer une jonction 1. Fixer un axe de référence pour le flux (vitesse).

3. Placer des jonctions 0 entre les jonctions 1 afin de prendre en compte les relations existant entre les efforts (tension, force).

4. Relier les jonctions par des liens en respectant le sens du transfert de la puissance.

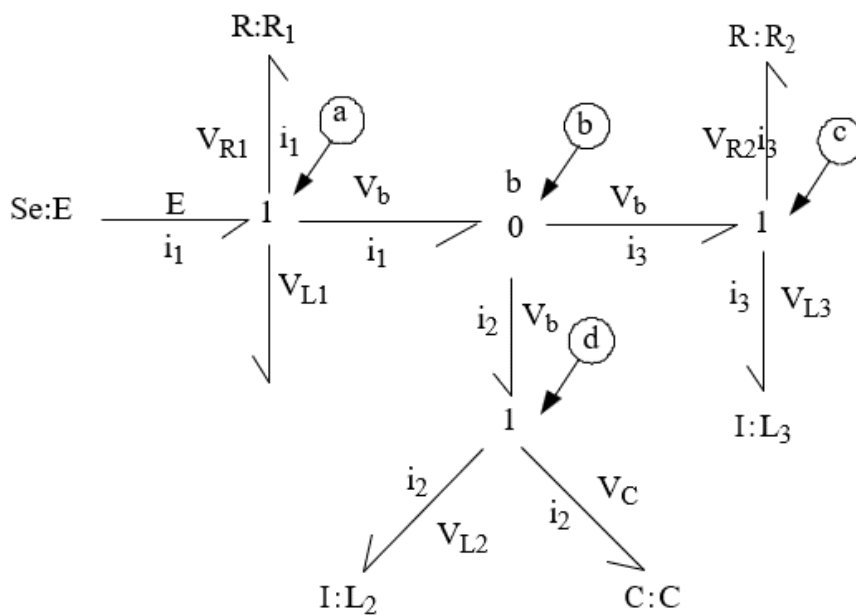
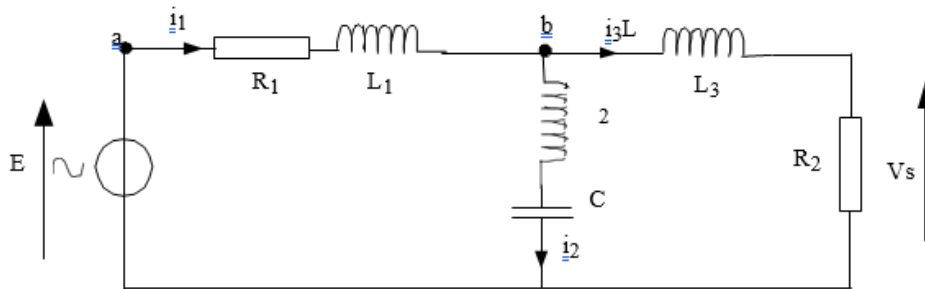
5. Placer les éléments de base présents dans le système, soit sur l'extrémité du lien libre associé, soit sur la jonction concernée

6. Eliminer tous les liens dont le potentiel correspond au potentiel choisit comme référence, puis éliminer toutes les jonctions 0 et 1 relatives à deux liens n'introduisant pas de changement de signe.

Nota :

Pour les systèmes électriques les jonctions 1 étant à flux constant (courant) les éléments de la jonction correspondent au ceux qui sont en série. A contrario, la jonction 0 est à force constante (tension) représentera les éléments en parallèles. [2]

Exemple : filtre elliptique



Les jonctions 1 sont à *flux* constant (courant), sur celles-ci sont réparti les *efforts* (tension) ici cela correspond aux deux mailles du filtre. Nous retrouvons ainsi sur les jonctions a, b, c :

a/ Jonction1 : $E = V_{R1} + V_{L1} + V_b$.

c/ Jonction 1 : $V_b = V_{R2} + V_{L3}$.

d/ Jonction1 : $V_b = V_{L2} + V_C$.

La jonction 0 est à *effort* constant (tension), c'est le potentiel du nœud b.

b/ Jonction0 : $i_1 = i_2 + i_3$.

2.8 Conclusion

Le formalisme Bond Graph a été introduit dans ce chapitre comme outil de modélisation multi-domaines, permettant de représenter les échanges d'énergie entre différents domaines constituant un système de façon unifiée. En rappelant les éléments mobilisés (les sources, les capacités, les inerties, les résistances, les jonctions 0 et 1, les transformateurs, les gyrateurs), nous avons construit les schémas Bond Graphs des systèmes étudiés capitalisant sur les interactions entre leurs sous-systèmes électriques, mécaniques et éventuellement thermiques. La richesse principale du Bond Graph se trouve dans sa capacité à être traduit directement en équations différentielles causalisées, ce qui facilite la simulation numérique ainsi que l'analyse des propriétés structurelles du système sous l'angle de sa commandabilité, de son observabilité et de sa réductibilité. En effet, le Bond Graph ne constitue pas qu'un outil de modélisation énergétique, mais également un support puissant pour l'étude de la commandabilité, de l'observabilité et de la réductibilité d'un modèle.

Ce couloir d'articulation entre modélisation et analyse prépare le chapitre suivant où à partir des modèles Bond Graph élaborés, nous allons procéder à une analyse structurelle plus fouillée. En considérant les graphes causaux, nous nous intéressons à la structure interne des systèmes (ascenseur électrique et véhicule électrique) pour dégager des informations sur la commande, la mesure et le degré d'observabilité.

Analyse structurelle à partir de la modélisation par bond-graphs

3.1 Introduction

La modélisation Bond Graph ressort comme une démarche initiale incontournable pour capter de manière différenciée les transferts d'énergie au sein d'un système complexe. Mais, en aval de sa mise en œuvre, il faut d'abord extraire des informations structurelles relevantes pour en fixer les propriétés essentielles. C'est à cette fin que se situe notre propos dans ce chapitre consacré à l'analyse structurelle par modélisation Bond Graph.

En premier lieu, nous nous concentrerons sur avancer la formulation matricielle que propose le Bond Graph causalisé en permettant à son système d'être associé une matrice d'état. L'analyse de celle-ci, et en particulier, le calcul de son rang-Hg, donnent précieux éclairages sur le niveau d'indépendance des équations, et par conséquent, par extension sur la dimension effective du modèle.

Nous nous intéresserons ensuite à la commandabilité et à l'observabilité structurelles, propriétés majeures conditionnant la capacité à piloter le système de manière efficace et à y reconstruire les variables internes à partir des mesures disponibles. Ce volet permet d'établir un lien direct entre la représentation énergétique et les problèmes de commande-contrôle.

La modélisation des bond graphs est une méthodologie forte pour l'analyse structurelle de systèmes physiques multidisciplinaires, fournissant une représentation unique des échanges énergétiques. Cette méthodologie graphique permet d'analyser les propriétés intrinsèques des systèmes en fonction de leur topologie et de leurs relations causales, indé-

pendamment des paramètres numériques sur lesquels ils sont définis. Ensuite, une analyse détaillée des systèmes énergétiques sera effectuée à l'aide d'exemples pratiques. Le modèle sera représenté, causalisé et simulé numériquement à l'aide de l'outil Symboles.

Pour illustrer cette approche, un exemple principal sera développé : la modélisation et la simulation d'un système mécatronique à travers le Bond Graph. Cette étude de cas comprendra les différentes étapes de la procédure (développement du modèle, analyse structurelle, simulation) et mettra en évidence la pertinence du formalisme Bond Graph pour l'étude et le contrôle des systèmes complexes.

Après avoir décrit la modélisation des systèmes étudiés sous forme de Bond Graphs, nous discutons également de la notion de causalité, essentielle pour utiliser correctement un modèle Bond Graph. Il est important de se souvenir des principes généraux, de la procédure systématique d'affectation (SCAP) et des concepts de causalité intégrale et dérivée utilisés pour les éléments de stockage d'énergie. Cette étape complète l'analyse structurelle et permet l'obtention d'un modèle cohérent et directement utilisable pour la commande et la simulation.

3.2 Rang-hg de la matrice d'état associée au bond-graph

L'ordre n d'un modèle, et donc la dimension de la matrice d'état, est égal au nombre d'éléments I et C qui admettent une causalité intégrale quand on met le bond-graph en causalité intégrale préférentielle. Le rang q de la matrice d'état correspond au nombre de modes non nuls du modèle, et on peut écrire :

$$q = n - k \quad [1]$$

où k est égal au nombre de modes nuls. Ceci s'exprime aussi en écrivant la fonction de transfert sous la forme :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{N(s)}{s^k D_1(s)}$$

avec degré de $D(s) = n$, degré de $D_1(s) = q$

Connaître le rang de A présente un intérêt immédiat pour la conception d'asservissement (comportement en régime permanent, commande par inversion, ...). [1]

Théorème

Le rang-hg de la matrice d'état associée à un modèle bond-graph initialement en causalité intégrale est égal au nombre d'éléments I et C en causalité intégrale admettant une causalité dérivée quand on affecte une causalité dérivée au bond-graph. Si (n_j) (respecti-

vement (nJd) représente le nombre de I et de C en causalité intégrale quand une causalité intégrale i (respectivement dérivée d) est appliquée au bond graph.

Remarque

Il est à noter que le rang-bg est en fait le vrai rang car il tient compte des relations de dépendance entre les termes de la matrice, contrairement aux méthodes structurelles classiques. [1]

A titre d'exemple, considérons le bond-graph suivant :

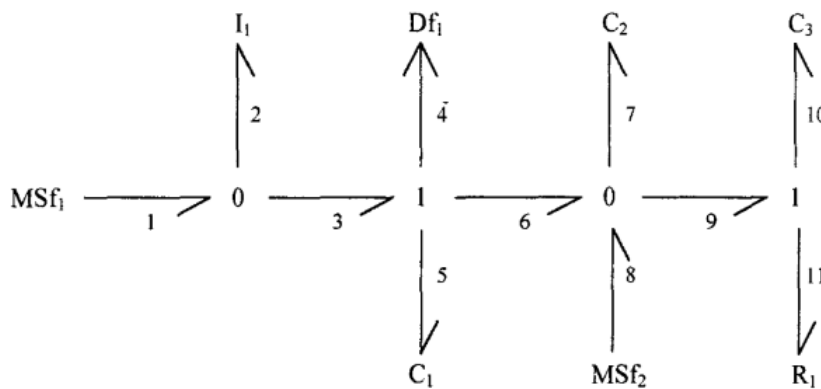


FIGURE 3.1 – bond-graph acausal associé a un systeme d'ordre 4

Lorsqu'on applique la causalité intégrale a ce modèle on obtient :

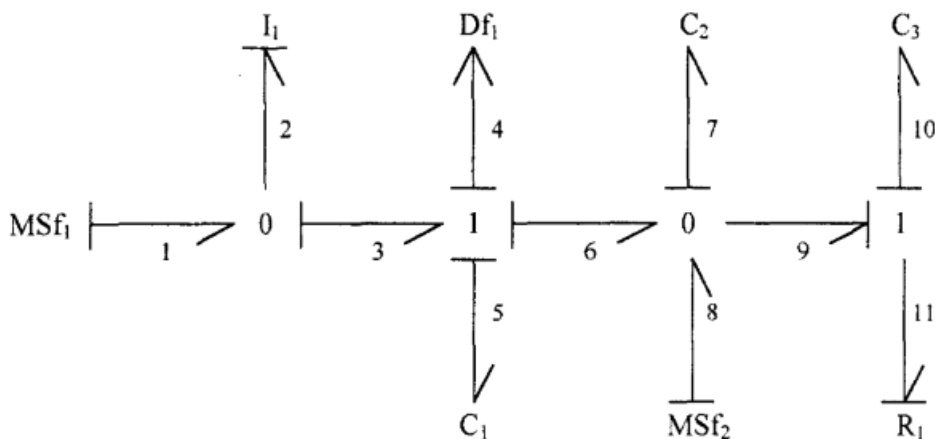


FIGURE 3.2 – bond graph en causalité intégrale associe a un système d'ordre 4

Les 4 éléments I et C admettent une causalité intégrale sans créer de conflit (figure 3.2) le modèle est donc d'ordre $n = (ni)_i = 4$. [1]

Affectons maintenant ce même modèle bond-graph mais avec une causalité dérivée :

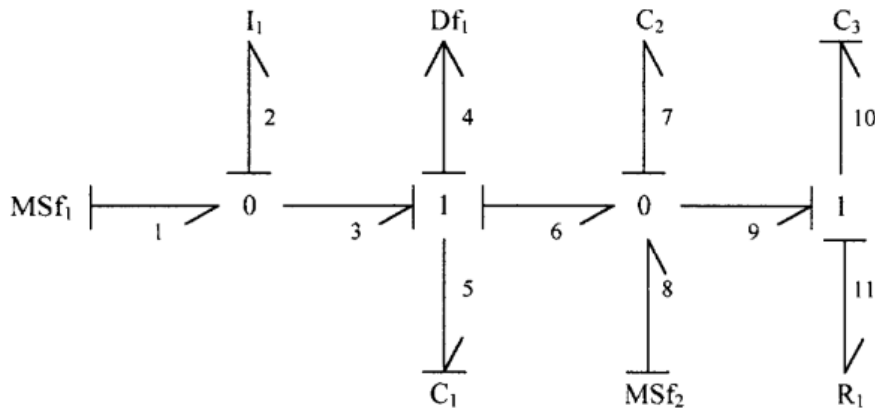


FIGURE 3.3 – bond-graph en causalité dérivée

Si on essaie d'affecter une causalité dérivée à tous les I et C, on constate qu'on ne parvient pas à basculer l'élément C en causalité dérivée (on aurait pu aussi choisir C1 ou C3). On en déduit que $(ni)d = 1$ et que le rang-bg de la matrice d'état est donc $q = 3$. [1]

3.3 Commandabilité/observabilité structurelles

Le théorème suivant permet de déduire graphiquement si le modèle bond-graph est structurellement commandable ou observable. Il utilise la notion de dualisation des sources et des détecteurs, qui consiste à transformer une source (ou un détecteur) d'effort (respectivement de flux) en une source (ou un détecteur) de flux (respectivement d'effort). [1]

Théorème

Un modèle bond-graph est structurellement commandable (respectivement observable) si et seulement si :

1. Il existe un chemin causal liant une source de commande (respectivement un capteur) à chaque élément dynamique I et C en causalité intégrale quand on met le bond-graph en causalité intégrale.

2. Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée quand on met le bond-graph en dérivée préférentielle. Si des I ou C restent en intégrale, la dualisation des sources (respectivement des capteurs) doit permettre de les faire passer en dérivée.

Remarques

- Lorsque tous les éléments I, C initialement en causalité intégrale peuvent admettre une causalité dérivée, alors il suffit d'une commande pour rendre le modèle commandable et son placement dans le modèle ne repose que sur des considérations technologiques. [1]

- Lorsque k éléments I, C restent en causalité intégrale, il faut alors k sources de commande bien placées pour rendre le modèle commandable. La dualisation de ces sources permet de tester si le placement choisi est correct. [1]

- Le raisonnement précédent s'applique de façon identique pour l'étude de l'observabilité. [1]

3.4 Analyse des systèmes énergétiques

L'analyse des systèmes énergétiques consiste à étudier la génération, la transformation, le stockage et l'utilisation de l'énergie dans un système technique. Elle nécessite généralement une modélisation multi-domaine telle que le Bond Graph, ou le modèle fera état des échanges d'énergie entre des sous-systèmes électriques, mécaniques, thermiques, hydrauliques...

3.4.1 Symbols

Symbols est un logiciel dédié à la modélisation et d'analyse qui repose sur la méthodologie Bond Graph, destiné à la représentation graphique des systèmes dynamiques multi-domaines. Conçu à l'Université de Hambourg (Allemagne), cet outil facilite la modélisation de systèmes électriques, mécaniques, thermiques, hydrauliques ou hybrides, en soulignant les transferts d'énergie entre 4 modules : BondPad, Simulator, Control et FDIPad.

3.4.1.1 BondPad

L'utilisateur est d'abord présenté à BondPad comme premier module. La majorité du travail de modélisation du système se réalise dans ce module. BondPad est une plateforme singulière pour réaliser les actions suivantes.

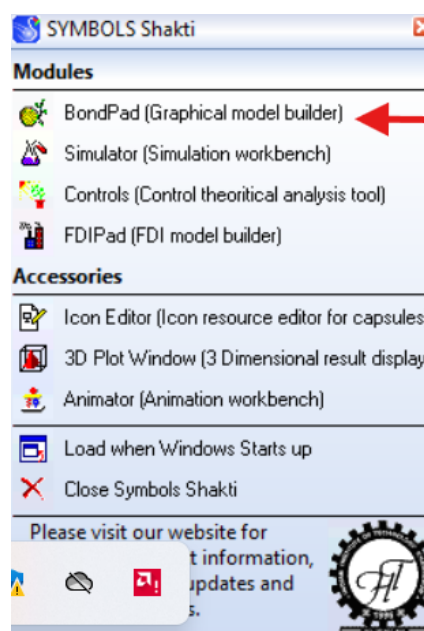


FIGURE 3.4

Quand l'utilisateur lance BONDPAD, la fenêtre principale s'ouvre, présentant trois panneaux de fenêtres comme montré ci-dessous.

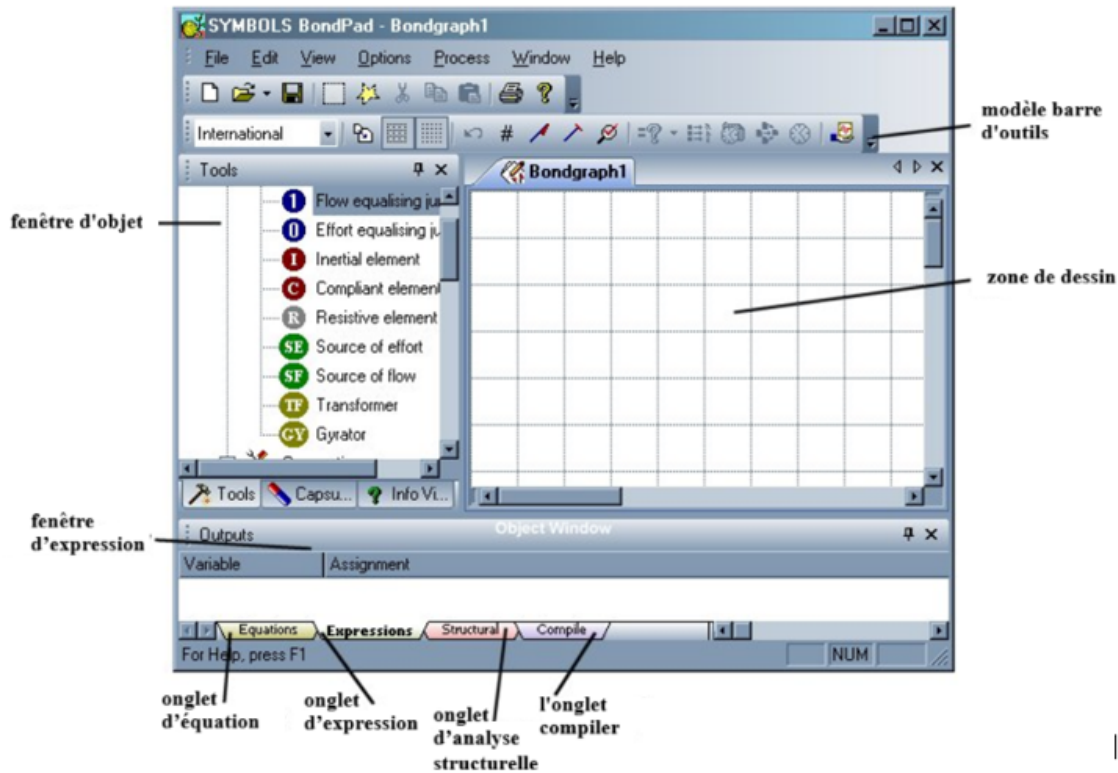


FIGURE 3.5

La Fenêtre de Gauche est le panneau d'Objet qui contient des outils pour dessiner et modifier le modèle de bondgraph. La fenêtre inférieure est la fenêtre d'Expression qui affiche les équations sous forme symbolique et permet la saisie d'expressions utilisateur. La fenêtre supérieure droite reste vide au début. L'utilisateur peut ouvrir un nouveau document pour dessiner un nouveau modèle en cliquant sur le bouton "Nouveau" dans la barre d'outils ou l'utilisateur peut ouvrir un bondgraph existant pour des modifications et des éditions supplémentaires en cliquant sur le bouton "Ouvrir" dans la barre d'outils.

Le volet gauche de la fenêtre contient trois onglets pour Outils, Capsules et Informations. L'onglet infoviewer dans la fenêtre Objet donne des informations détaillées sur Bondpad. Si l'on clique sur l'onglet Outils, divers outils de dessin et d'édition sont affichés sous forme de liste. En cliquant sur l'onglet Capsule, des capsules préfabriquées sont affichées sous forme de liste dans différents groupes. On peut sélectionner et incorporer des capsules de cette liste dans le modèle.

3.4.1.2 Simulator

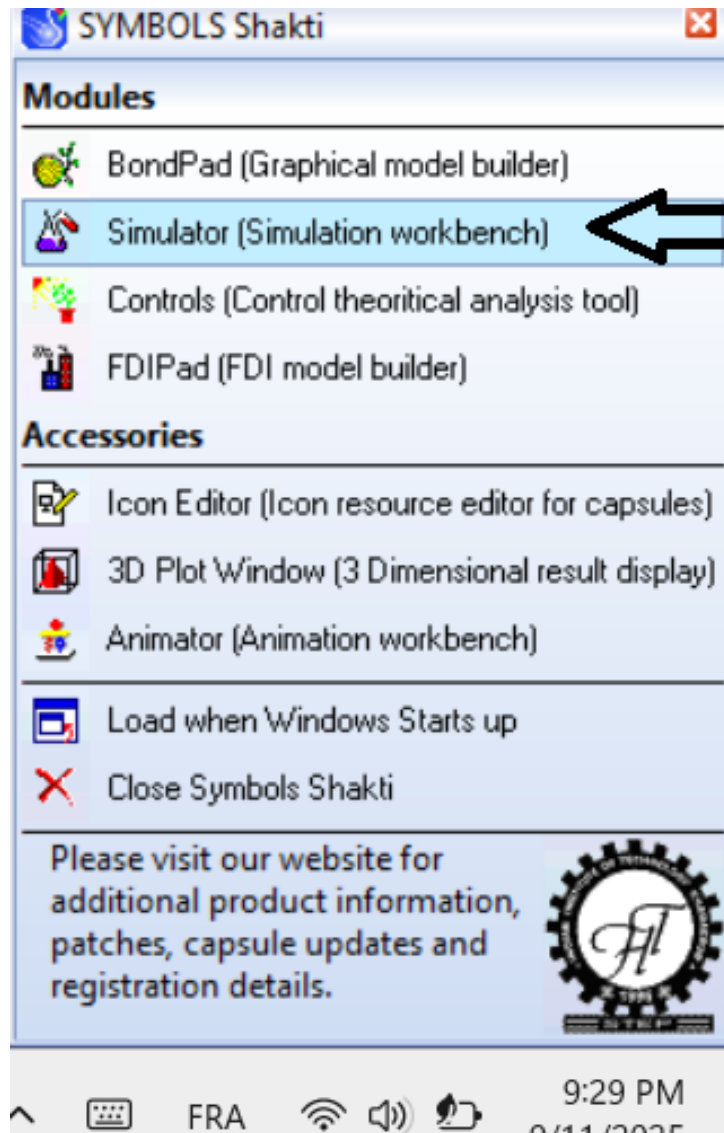


FIGURE 3.6

Symbols Simulator est le module de simulation numérique, il permet de contrôler le comportement dynamique du système modélisé. Après avoir défini le Bond Graph et renseigné les paramètres requis, Simulator intègre les équations du modèle et montre l'évolution temporelle des variables telles que les efforts, les flux et les états.

3.4.1.3 Controls

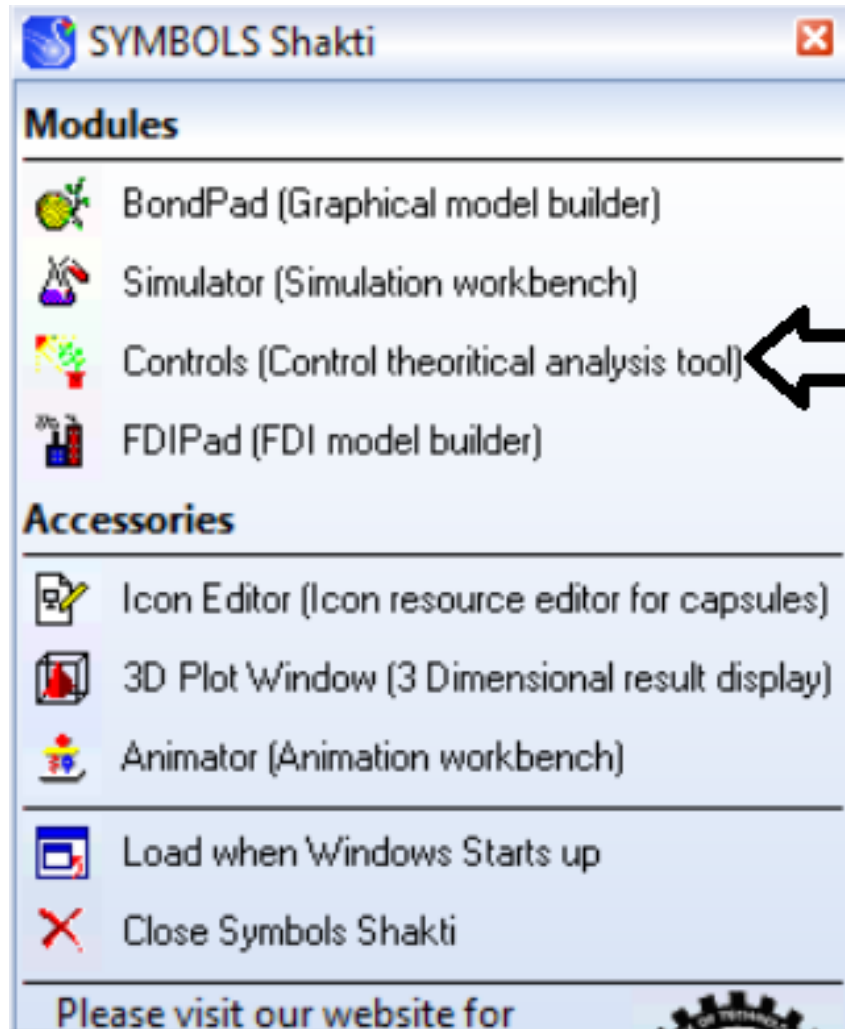


FIGURE 3.7

Control est l'environnement de Symbols qui se concentre sur l'étude et la mise en place des stratégies de commande et de régulation. Il autorise la création et le test de lois de commande (PID, PI, retour d'état...) directement sur le modèle Bond Graph, et l'analyse de leurs impacts sur la stabilité et les performances du système.

3.4.1.4 FDIPad

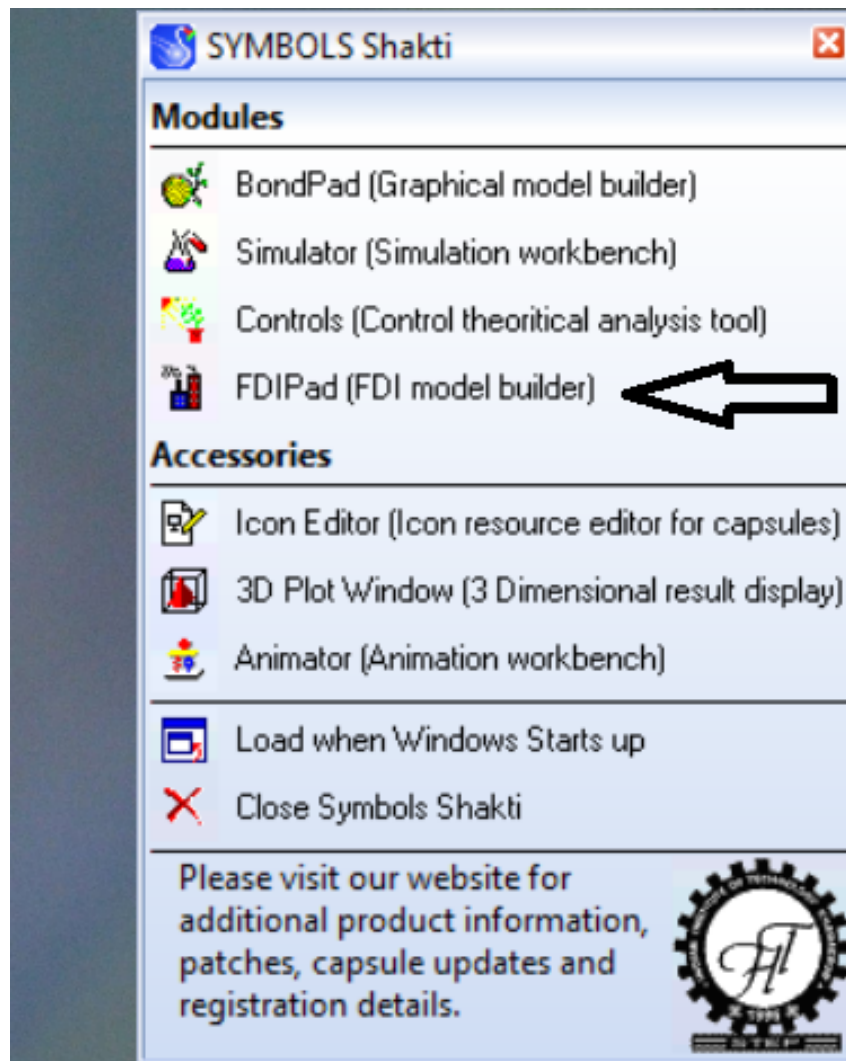


FIGURE 3.8

Le but majeur de cet instrument est de caractériser le comportement du processus et d'examiner ses propriétés. Une structure qui permet la dérivation symbolique des RRAs et la création de signatures de défauts.

3.4.2 Des exemples

Voici quel que exemples simples.

3.4.2.1 Volant d'inertie + frein à friction

- Type : Rotationnel
- Éléments :
- I : volant d'inertie (stocke l'énergie cinétique de rotation)

- R : frein (dissipe l'énergie)
- Excitation : Source de couple (SE)

Bond graph :

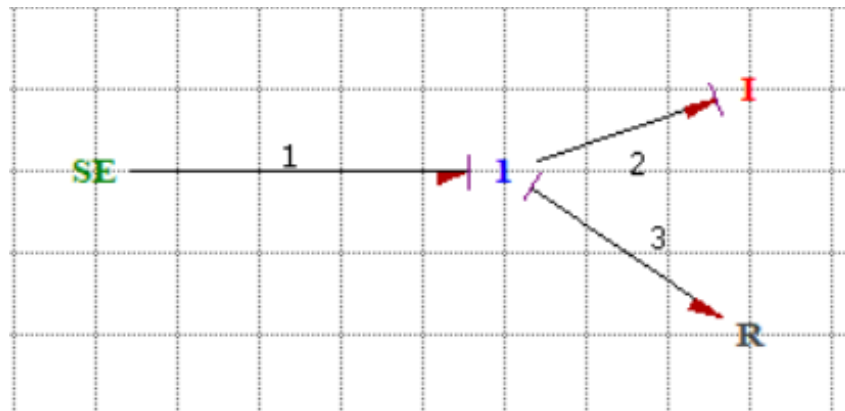


FIGURE 3.9

Résultat de l'analyse structurel

Mode Test :

- Order of the system is : 1.
- Bond Graph Rank of the system is : 1.
- There are no structurally null modes in the system.

Controllability Test :

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

Observability Test :

- There are no observers in this model.
- The system is structurally (thus always) unobservable without observers.

3.4.2.2 Circuit RLC

En série :

- Type : Électrique
- Éléments :
 - R : résistance
 - L : inductance $\rightarrow I$
 - C : capacité $\rightarrow C$
 - SE : source de tension
- Connexion : tous en série \rightarrow même courant (flux)

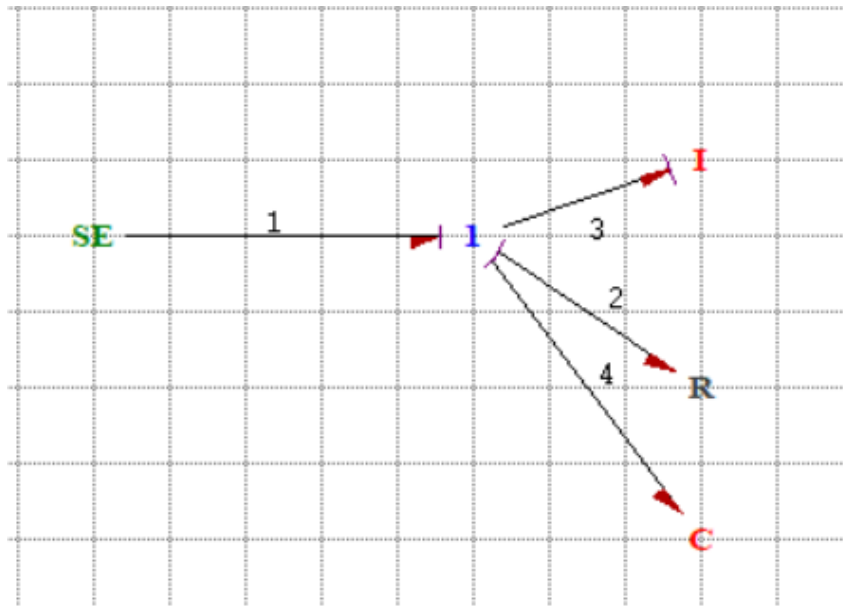


FIGURE 3.10

Résultat de l'analyse structurel

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.

Controllability Test :

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

Observability Test :

- There are no observers in this model.
- The system is structurally (thus always) unobservable without observers.

3.5 Modélisation et Simulation par Bond Graph d'un Système Mécatronique

La mécatronique représente l'intégration synergique et systématique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique en temps réel. L'importance de ce domaine multidisciplinaire réside dans sa capacité à concevoir des systèmes automatiques performants et à gérer des systèmes complexes [1]. Sur la base de cette définition, nous concluons que chaque

système mécatronique doit être modélisé et simulé pour parvenir à un modèle plus performant, plus rentable, plus fiable et plus simple.

Il est nécessaire d’avoir une méthode de modélisation unifiée pour l’analyse et le mode. L’outil graphique est tout à fait approprié pour cet usage. Cette approche facilite la représentation de l’échange de puissance d’un système, qui englobe le stockage, la dissipation et la conversion. De plus, cet instrument prend en considération non seulement la création d’un modèle comportemental, mais il peut aussi être utilisé pour l’analyse structurelle et causale, laquelle est indispensable pour la conception des systèmes de contrôle et de surveillance.

Cette approche est flexible, car il est possible d’incorporer ultérieurement des éléments additionnels tels que les pertes/effets thermiques, d’inertie et de stockage, sans avoir besoin de recommencer la modélisation. De plus, grâce aux propriétés causales et structuralles du langage graphique.

3.5.1 Étude de cas

Dans notre étude, nous visons à modéliser et simuler la section porte-pièce d’une machine à commande numérique en nous appuyant sur les bonds graphs, dans le but de parvenir à un modèle dédié à la conception de supervision intégrée. Cette machine est composée de deux (2) éléments : Section de commande pour la programmation de l’usinage et présentation du plan global d’instrumentation pour la supervision.

Section opérationnelle pour le fraisage des composants. Une table porte-pièce se déplace horizontalement grâce à un moteur électrique conduisant via un système réducteur, vis/écrou. Le moteur fonctionne grâce à une alimentation électrique, tandis que la position de la table est indiquée par $Pos(t)$.



FIGURE 3.11 – Présentation de la table porte pièce

Les paramètres de la table à surveiller sont représentés dans le Tableau.

Valeur	Définition	Unité
$K_v = 0,47$	Constante du moteur	(rad/s)/V
$L = 0,0019$	Inductance du moteur	H
$R = 0,61$	Résistance de l'induit du moteur	Ω
$J = 0,01$	Inertie de la partie tournante	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$n = 0,5$	Rapport du réducteur	
$h = 0,01$	Rapport vis/écrou	m/rad
$M = 8$	Masse de la table	kg
$f = 6000$	Frottements visqueux	$\text{N} \cdot \text{s/m}$
$k = 300000$	Raideur de la vis	$\text{N} \cdot \text{m/rad}$

3.5.2 Modélisation et simulation du modèle bond graph

La modélisation implique l'élaboration du modèle bond graph à l'aide d'un logiciel pour effectuer sa simulation. Dans notre situation, nous avons opté pour le logiciel SYMBOLS.

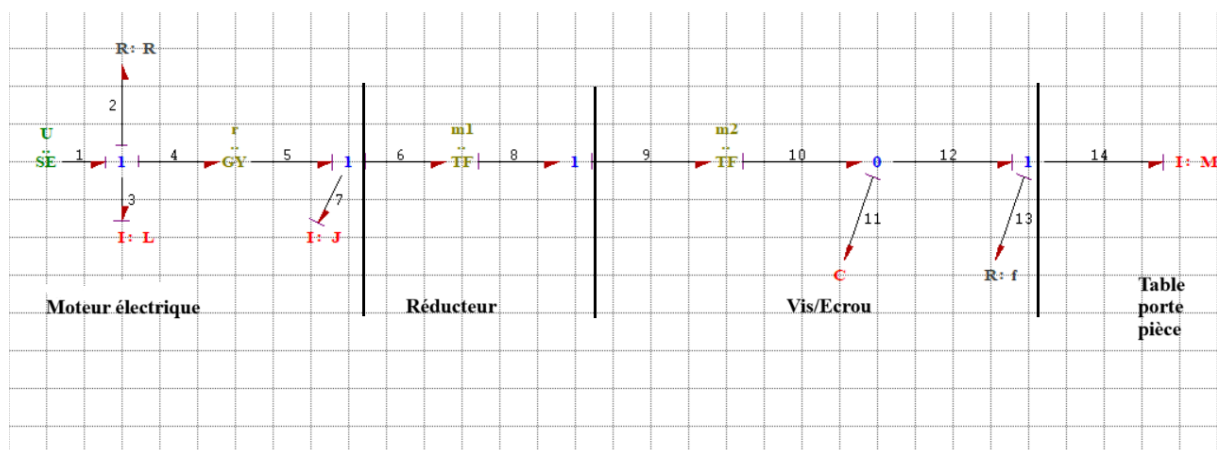


FIGURE 3.12 – Modèle bond graph proposé avec ses différents composants

3.5.3 Résultats et discussion

Le logiciel SYMBLOS a la capacité de produire directement les équations simplifiées. Il tient compte de la causalité et des trajectoires causales, ce qui conduit à l'exclusion directe des variables non identifiées. Le modèle bond graph proposé a un rang de quatre (I:L; I:J; C:1/k; I:M) et nous avons constaté qu'il possède le même nombre d'équations (voir Fig. 3), ce qui atteste de la structure adéquate de notre modèle bond graph (causalité, couplage, relations d'information). Après l'analyse structurelle de système on obtient que notre système est d'ordre 4 et n'est pas commandable ni observable.

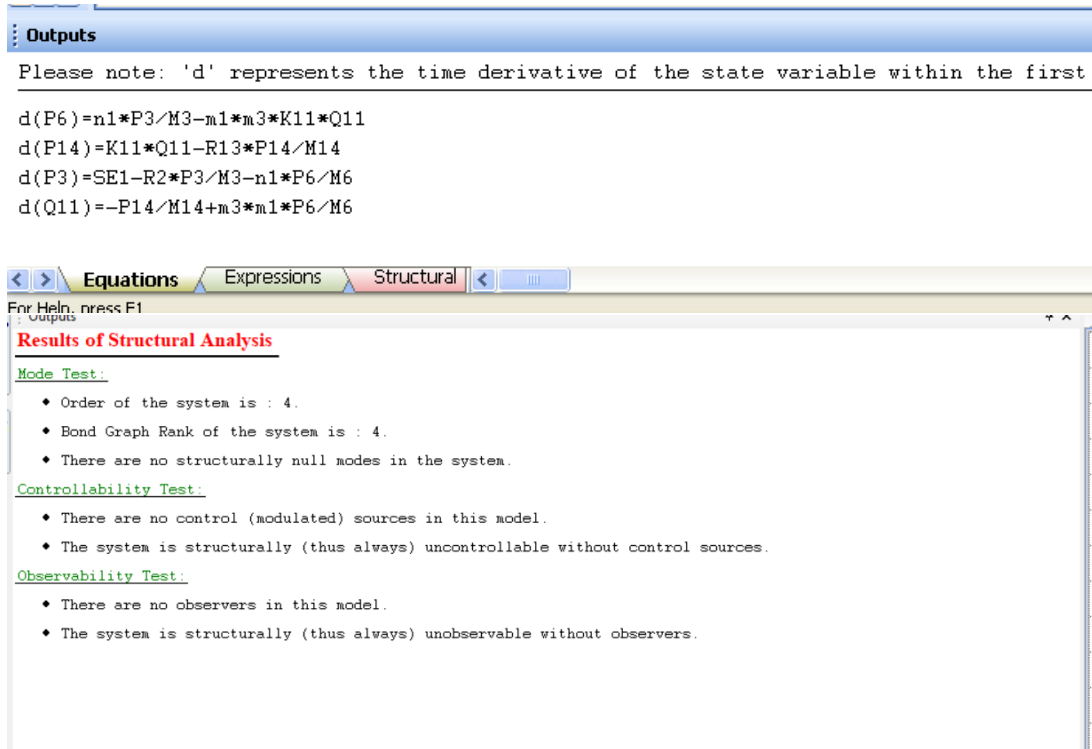


FIGURE 3.13 – Équations générées par le logiciel et resultat d'analyse

Pour que le système doit être commandable on va moduler la source et pour que le système observable on ajoute des capteurs

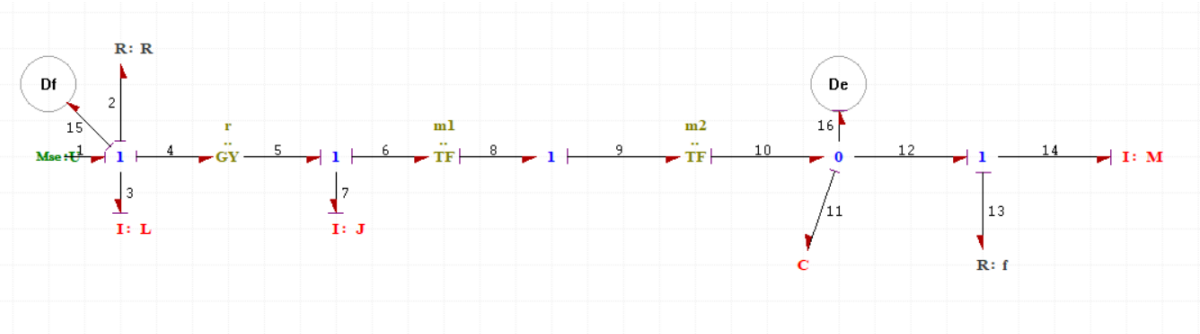


FIGURE 3.14 – Modèle bond graph

Et on obtient

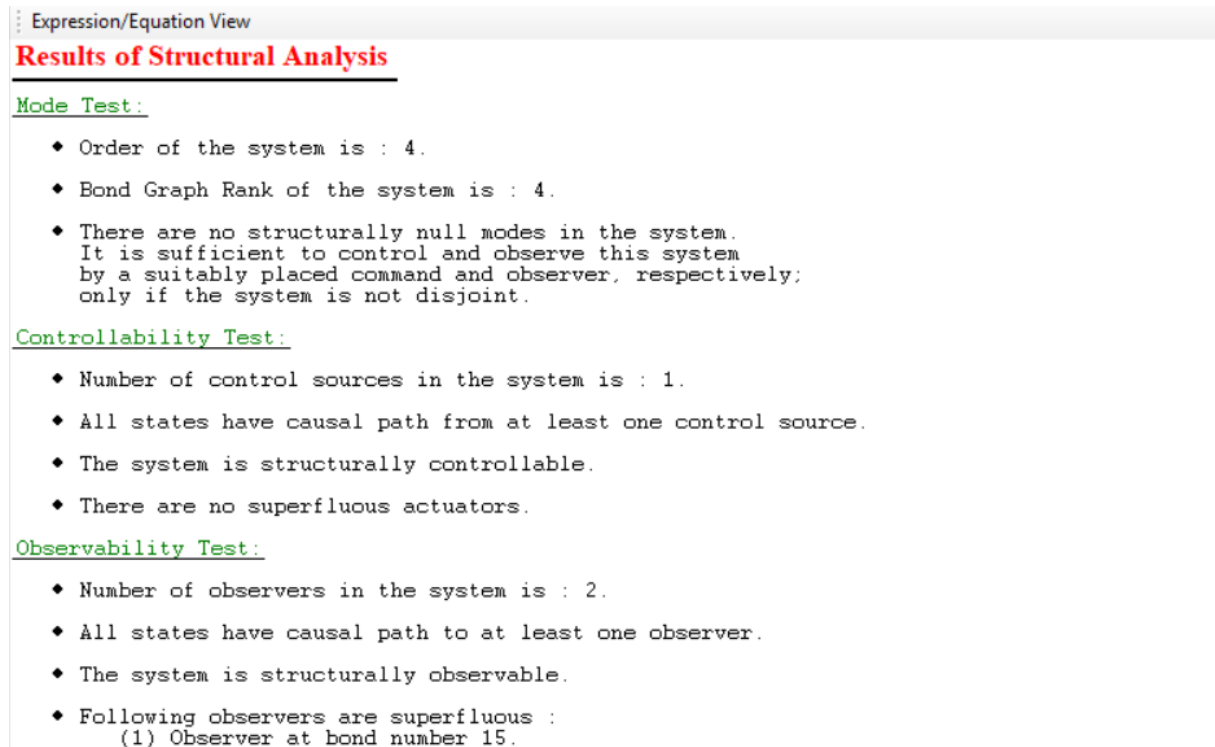


FIGURE 3.15 – Résultats d’analyse structurelle

3.5.4 Construction des capsules pour générer la matrice FDI

Ce programme offre également la possibilité d’extraire la matrice de signature des défauts immédiatement après la modélisation du système. Pour représenter un système de supervision dans ce logiciel, on doit élaborer des capsules intégrant les divers éléments du système. Ainsi, une capsule constitue le bond graph de chaque segment du système auquel on attribue une icône symbolique. Ces capsules sont connectées aux capteurs qui sont associés aux jonctions. Nous n’avons que des capsules de génie des procédés, ce qui rend nécessaire la construction de capsules adaptées à notre système à surveiller.

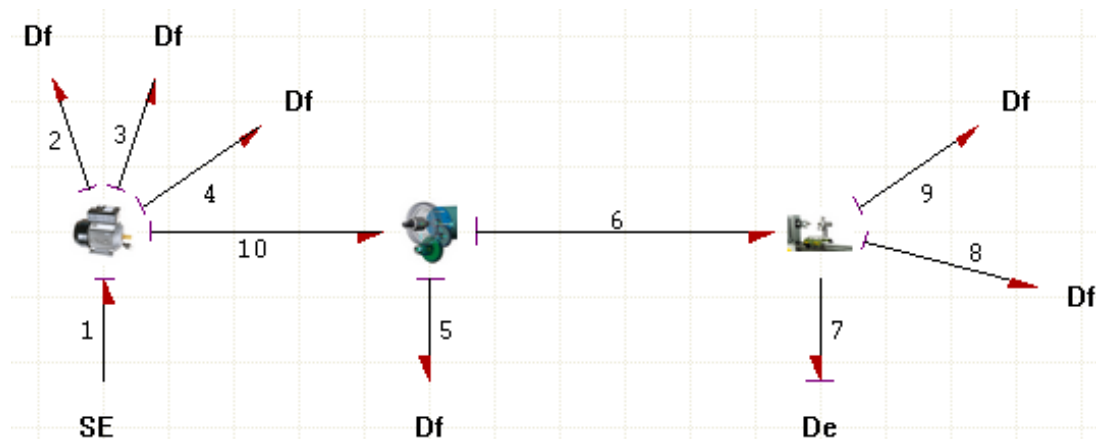


FIGURE 3.16 – Équations générées par le logiciel

Le modèle BG offre la possibilité de récupérer les valeurs numériques des résidus ainsi que la matrice de signature des défaillances. Effectivement, cette information est essentielle pour identifier les pannes qui pourraient se produire lors de l'exploitation du système. L'analyse des trajectoires causales facilite l'élimination des variables non identifiées pour produire des RRAs (Relations de Redondance Analytique). La

```

Expression/Equation View
Residuals
Arr1=Moteur_m1*Df2_Measurement-Réduct_m2*(VisEcro_m2*De1_Measurement
+Réduct_I4*ddt(Réduct_m2*Df3_Measurement))
Arr2=Df6_Measurement-(De1_Measurement-VisEcro_I6*ddt(Df6_Measurement))/f
Arr3=Df2_Measurement-(U_Input-Moteur_I3*ddt(Df2_Measurement)
-Moteur_m1*Df3_Measurement)/R
Arr4=VisEcro_m2*Réduct_m2*Df3_Measurement-VisEcro_C4*ddt(De1_Measurement)
-Df6_Measurement
Arr5=Réduct_m2*Df3_Measurement-Df4_Measurement
Arr6=Réduct_m2*Df3_Measurement-Df5_Measurement
Arr7=Df2_Measurement-Df1_Measurement
    
```

FIGURE 3.17 – RRAs générées par le logiciel

Notre dispositif comprend sept (7) détecteurs et nous avons enregistré autant de RRAs, ce qui indique la justesse de notre modèle. Nous avons un BG observable qui signifie : pour chaque jonction 0 ou 1 associée à un seul détecteur, il y a une RRA correspondante.

3.6 La causalité

3.6.1 Définition

La causalité dans l'analyse structurelle par bond graph est définie comme une propriété structurelle importante qui permet d'établir la relation de cause à effet entre les différentes variables d'un système modélisé. Concrètement, c'est le tracé d'un trait causal sur les liens du bond graph qui indique la direction dans laquelle les variables d'effort (e) et de flux (f) sont calculées ou imposées[11].

Plus précisément, la causalité affecte la structure de calcul du modèle, orientant l'ordre dans lequel sont déterminées les variables à chaque élément du système. Un trait causal placé près d'un élément signifie que cet élément impose une variable d'effort, tandis que le trait placé à l'opposé indique que l'élément impose une variable de flux. Cette convention permet de coder graphiquement les équations différentielles, algébriques ou algébro-différentielles qui décrivent le système.[11]

La causalité permet de faire apparaître graphiquement les relations de cause à effet et l'orientation de calcul des équations caractéristiques. Il existe deux conventions possibles pour faire apparaître la causalité [13] :

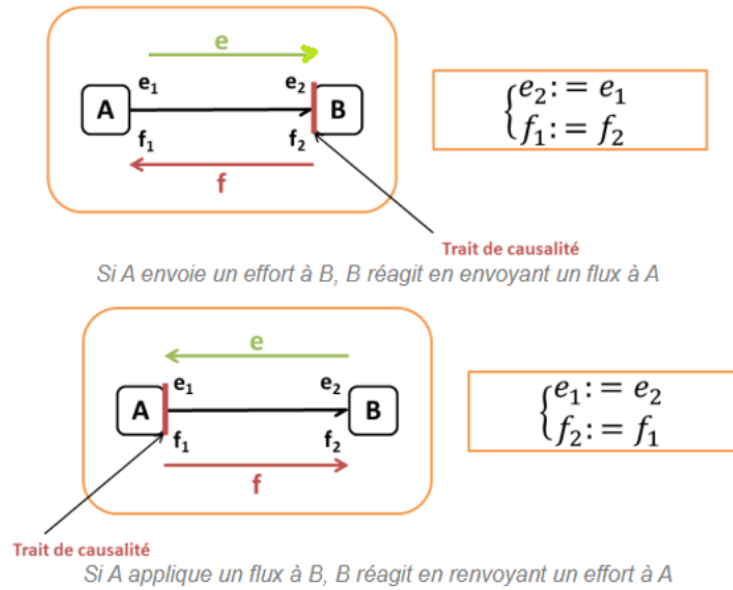


FIGURE 3.18

3.6.2 Procédure d'affectation de la causalité (SCAP)

Tout d'abord, on attribue les causalités contraintes, c'est-à-dire celles qui sont de manière obligatoire par les sources, les détecteurs.[13]

Ensuite, on propage ces causalités imposées sur les jonctions structurelles du système (types 0, 1, transformateurs TF, et gyrateurs GY).[13]

Puis, on sélectionne un élément de stockage (I ou C) auquel on assigne une causalité intégrale, ce qui fait que la variable d'énergie liée à cet élément devient une variable d'état.[13]

On propage à nouveau les causalités imposées sur la structure des jonctions résultant de ce choix.[13]

Cette opération est répétée pour tous les éléments de stockage, et en cas de conflit dans l'attribution, on cherche l'élément de stockage responsable du conflit pour lui affecter une causalité dérivée.[13]

Ensuite, on choisit un élément résistif R auquel on attribue une causalité quelconque, puis on propage cette causalité sur la structure de jonction.[13]

On répète cette étape pour tous les éléments R, en résolvant les conflits éventuels en réaffectant une causalité dérivée à un élément de stockage responsable.[13]

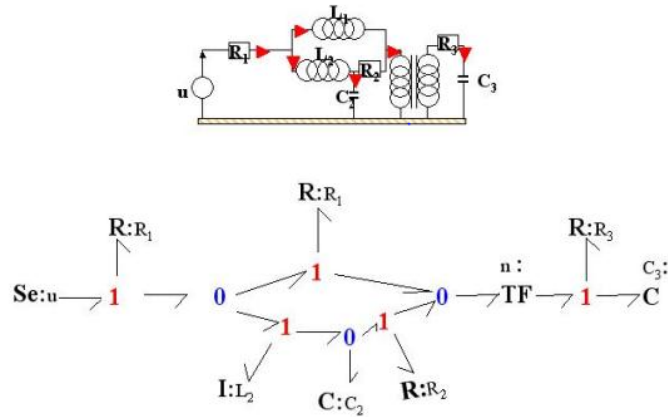
Enfin, pour les jonctions restantes (0, 1, TF, GY), on affecte des causalités quelconques en évitant les conflits.[13]

Il est important de noter que certains conflits de causalité ne peuvent pas être résolus—le choix des éléments affectés d'une causalité intégrale correspond en réalité au choix des variables d'état indépendantes du système.[13]

Cette procédure garantit une attribution cohérente des causalités qui oriente le calcul

des variables dans le modèle bond graph, tout en respectant les contraintes imposées par la nature des éléments et la structure du système.

Exemple : circuit électrique monophasé



En utilisant la procédure SCAP, on peut obtenir 2 Bond Graph différents :

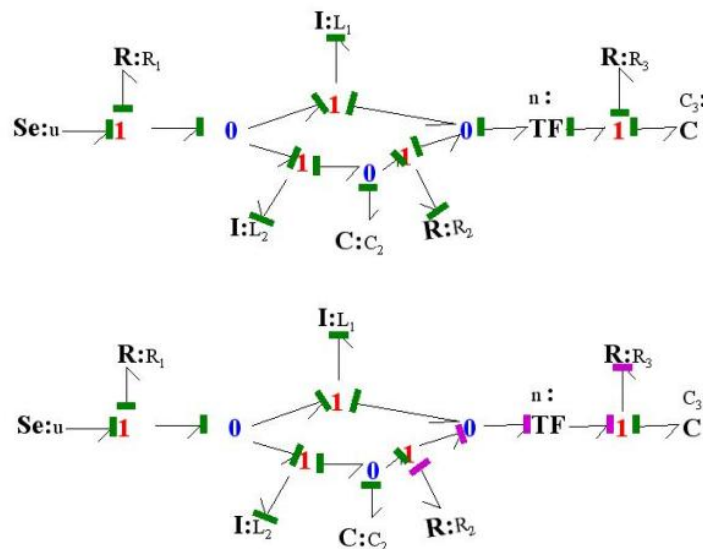


FIGURE 3.19

3.6.3 Causalité intégrale et causalité dérivée

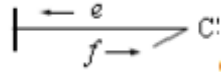
La causalité intégrale et la causalité dérivée sont des notions fondamentales dans la modélisation par bond graphs, particulièrement pour les éléments de stockage comme les inductances (I) et les capacités (C).[12]

Dans un bond graph, la causalité intégrale et la causalité dérivée des éléments I (inductance) et C (capacité) se définissent ainsi :

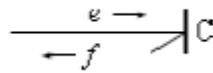
3.6.3.1 Élément (C)

Nous avons évoqué lors de la définition de cet élément que deux causalités sont possibles :

Causalité intégrale : $e = \frac{1}{C} \int f dt$, l'effort est imposé par l'intégrale d'un flux.[12]



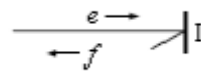
Causalité dérivée : $f = C \frac{d}{dt} e$, le flux est imposé avec la dérivée de l'effort. La dérivée étant à proscrire dans un schéma de simulation, seule la causalité intégrale sera à considérer [12].



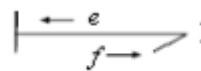
3.6.3.2 Élément (I)

Comme pour l'élément C, deux causalités sont possibles et seule la causalité intégrale sera à considérer.[12]

Causalité intégrale $f = \frac{1}{I} \int e dt$, le flux est l'intégrale de l'effort.[12]



Causalité dérivée $e = I \frac{d}{dt} f$, effort est la dérivée du flux [12].



3.7 Conclusion

Ce chapitre met en évidence la structure interne des systèmes examinés et leurs caractéristiques de commandabilité et d'observabilité au niveau structurel grâce à l'utilisation de modèles Bond Graph. Ces résultats sont cruciaux pour saisir les comportements dynamiques et pour préparer l'élaboration de lois de contrôle sur mesure.

Cependant, analyser l'observabilité d'un point de vue structurel ne suffit pas à décrire la capacité du système à déduire ses variables internes uniquement sur la base des résultats

mesurés. Une compréhension approfondie du comportement dynamique du système est rendue possible par cette structure d'analyse croisée-causalité qui nécessite une préparation stricte afin de développer des lois de commande appropriées. Pour approfondir ce sujet, le prochain chapitre se concentrera sur l'étude des niveaux d'observabilité, qui offre un moyen plus précis de mesurer la valeur informationnelle des sorties et d'examiner la faisabilité de la création d'observateurs dignes de confiance.

4.1 Introduction

Le degré d'observabilité dans l'analyse structurelle par l'approche Bond Graph mesure la capacité à observer les variables internes d'un système à partir de ses sorties, en s'appuyant sur la structure du modèle. Cette approche permet une analyse directe, graphique et systématique de l'observabilité, facilitant le diagnostic et la surveillance des systèmes complexes.

4.2 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.

On peut distinguer deux types essentiels de variables (éléments) : les variables mesurées et celles 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 [5]

Règle 1

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

Règle 2

Une variable mesurée est considérée non estimable si elle fait partie à un chemin causal unique aboutissant à un capteur [5].

Règle 3

Une variable est non mesurée et déductible, si elle fait partie à deux chemins causaux indirects au moins menant à détecteurs [5].

Règle 4

Une variable est considérée non mesurable et non déductible (non estimable) si il n'y a aucun chemin conduisant à un capteur [5].

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) [5].

4.3 Définition du degré d'observabilité (degré de redondance)

Le concept de degré d'observabilité est essentiel pour distinguer les variables observables de celles qui ne le sont pas. Pour une variable donnée, ce degré correspond au nombre de détecteurs connectés à cette variable, diminué de un. Ainsi, une variable reliée à un seul détecteur au maximum est considérée comme observable. Par ailleurs, le degré de redondance représente le nombre de détecteurs (ou capteurs) liés à la variable via des chemins causaux disjoints, ce qui permet d'évaluer la robustesse de l'observation.[4][5][10]

On distingue **deux niveaux de redondance**, à savoir :

4.3.1 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[5][6][7]

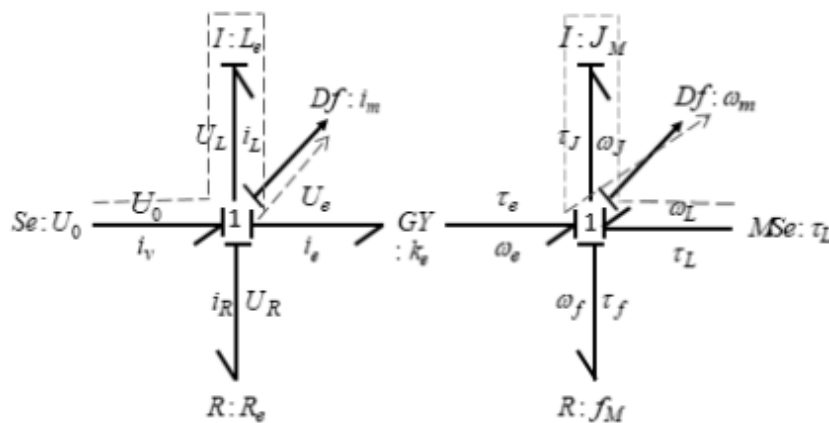


FIGURE 4.1 – Chemin causal des variables déductibles

4.3.2 Observabilité de degré quelconque

Par extension de la notion précédente, une variable est redondante de degré k (ou observable de degré k) est une variable observable dont la valeur reste déductible même lors de la défaillance simultanée de k capteurs quelconques du système .[5][6][7]

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 plus-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[4][8]

4.4 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[4][9]

Voici le résumé de toutes les définitions dans la figure 4.2 ci-dessous

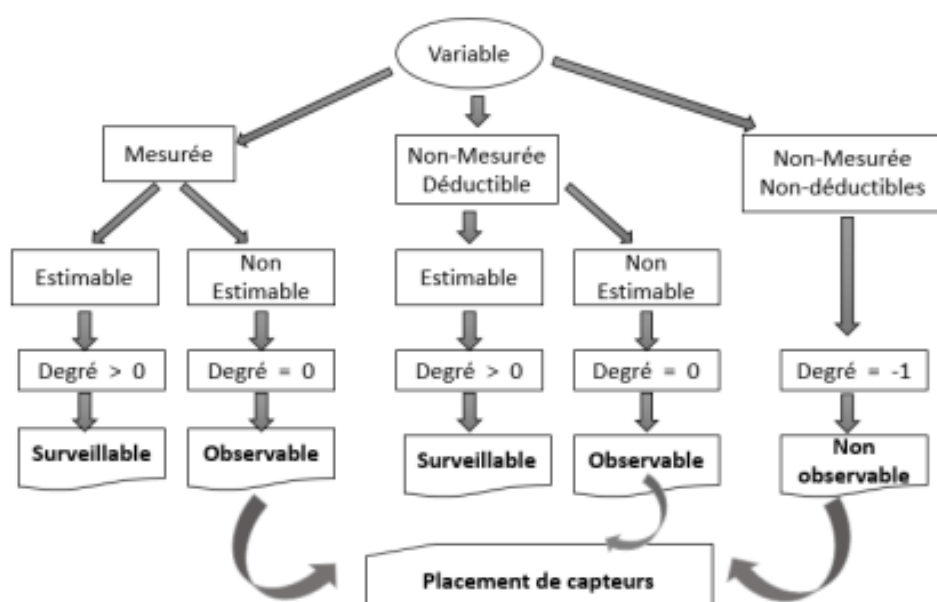


FIGURE 4.2 – Classification des variables

4.5 Étude d'un cas

Soit le système hydraulique constitué de 2 réservoirs de la figure 4.3. Le modèle bond graph associé à ce système est représenté par la figure 4.4.

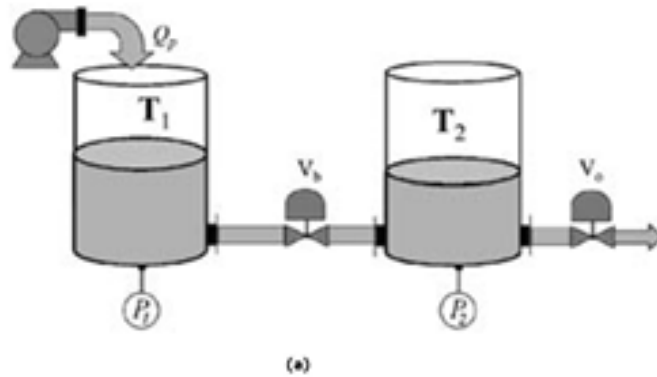


FIGURE 4.3 – Système hydraulique à deux réservoirs

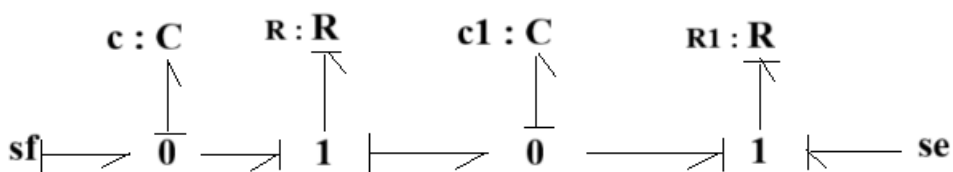


FIGURE 4.4 – Modèle bond graph du système

Dans cette partie, nous suggérerons l'implémentation de capteurs en vue d'améliorer les caractéristiques structurelles du système ainsi que sa capacité de surveillance, malgré un degré d'observabilité nul. Dans ce système à deux réservoirs, où chaque composant est surveillé par un unique détecteur, la procédure est représentée dans l'illustration.

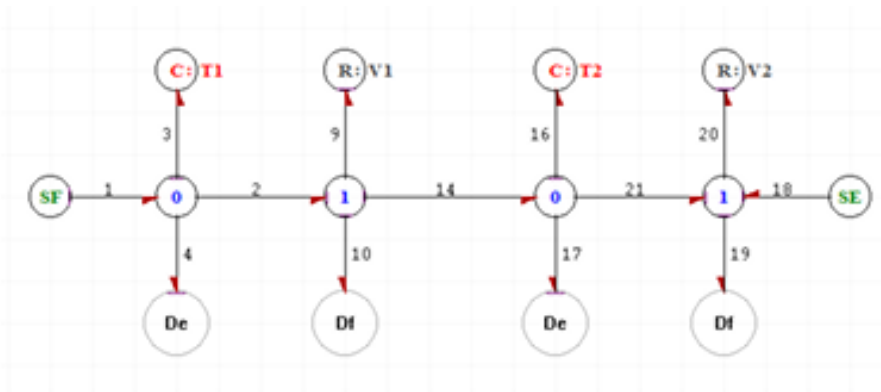


FIGURE 4.5 – Modèle bond graph avec détecteurs

On considère que les systèmes modélisés par bond graph sont structurellement commandables si les conditions ci-après sont respectées :

1. L'établissement d'une voie causale connectant une source (ou un capteur) à chaque unité. Élément dynamique I et C lorsque le bond graph est placé en causalité intégrale.
2. Les éléments I et C ont une causalité dérivée lorsqu'on dérive le bond graph, et lorsqu'on effectue la dualité sur les sources.

Pour ce qui est de l'observabilité structurelle, on substitue le terme source par capteur dans les conditions précédentes.

4.5.1 Degré d'observabilité

L'élément C : T1 (ou C : T2) est de degré zéro (0 degré de redondance) puisqu'il n'est associé qu'à un seul détecteur. Cette variable est mesurée, pas estimable, car elle suit un único chemin causal qui mène à un seul détecteur.

On peut observer la variable C : T1, car son niveau d'observabilité est de zéro.

L'élément R : V1 (ou R : V2) est de degré zéro (0 degré de redondance) puisqu'il est associé à un unique détecteur; cette variable est mesurée et non estimable parce qu'elle appartient à une seule voie causale menant à un seul détecteur.

La variable R : V1 est observable puisque son niveau d'observabilité est de zéro.

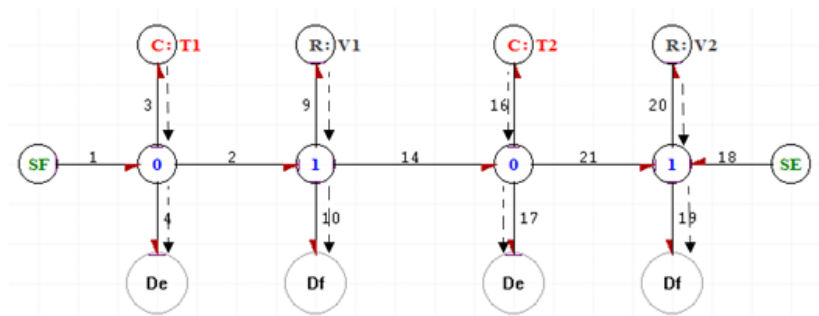


FIGURE 4.6 – Chemins causaux des capteurs

Il est donc possible d'affirmer que tous les composants de notre système sont observables, étant donné que leurs degrés d'observabilité se trouvent être nuls.

Pour assurer la surveillabilité, il est nécessaire d'améliorer l'observabilité des variables.

Rendre les variables observables - L'observabilité est une condition essentielle mais pas suffisante pour la surveillabilité.

4.5.2 Diagnostic par l'approche qualitative du bond graph

Après l'installation des capteurs, l'analyse structurelle du système hydraulique à deux réservoirs nous fournit les résultats ci-après :

- Elle indique que le système est de rang 2 et également d'ordre 2. - Elle indique qu'il n'y a pas de point de contrôle, et que le système n'est pas contrôlable, mais il peut être aisément rendu contrôlable en rendant nos sources configurables (c'est-à-dire au lieu de S_f ou S_e , nous les convertissons en MSe , et éventuellement en MSf). - Elle assure que le système est structurellement observable et que ses états possèdent un chemin causal vers un ou plusieurs détecteurs.

Résultats de l'Analyse Structurelle

Test de Mode

- Ordre du système : 2
- Rang Bond Graph du système : 2
- Il n'y a pas de nœuds structurellement nuls dans le système
- Il est suffisant d'observer ce système par un observateur convenablement placé seulement si le système n'est pas disjoint

Test de Commandabilité

- Il n'y a pas de sources de commande (modulées) dans ce modèle
- Le système est structurellement (donc toujours) non commandable sans sources de commande

Test d'Observabilité

- Nombre d'observateurs dans le système : 4
- Tous les états ont un chemin causal vers au moins un observateur
- Le système est structurellement observable
- Les observateurs suivants sont superflus :

1. Observateur au bond numéro 10
2. Observateur au bond numéro 19

4.6 Conclusion

Nous avons étudié la classification des différentes variables d'un système linéaire ainsi que le concept de degré d'observabilité, en détaillant ses diverses formes. Nous avons également abordé l'importance du placement des capteurs dans un système linéaire modélisé par un bond graph, soulignant leur rôle essentiel dans la définition d'une méthode efficace pour la surveillance des composants du système.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a tenu compte de la structuration de l'analyse des systèmes énergétiques par l'utilisation de la méthode du bond graphs, une méthode de modélisation de l'échange d'énergie d'un système structuré et d'un langage facile à comprendre. En utilisant une méthode spécifique, la recherche est centrée sur des concepts de base tels que la commandabilité, l'observabilité, la causalité et le niveau d'observabilité.

La commandabilité est la capacité à commander ou contrôler un système à partir de certaines entrées, et l'observabilité est la capacité à déduire l'état d'un système à partir de ses sorties. Les deux sont cruciaux pour le contrôle et la surveillance des systèmes énergétiques car ils déterminent comment un système énergétique peut être surveillé et contrôlé en temps réel avec efficacité.

La causalité, en bond graph niveau, est une notion transparente dont la disposition influence la dérivation et résolution arc d'équations du système; elle modélisait l'échange énergétique direction des éléments. Le correct attribution de la causalité permet, par exemple, de distinguer les différentes représentations les éléments stockeurs d'énergie (intégrale ou dérivée), ce qui est crucial pour une vraie analyse.

Enfin, le niveau d'observabilité, c'est-à-dire le degré auquel l'état global du système peut être décrit sur des mesures accessibles a été abordé dans le contexte de l'analyse structurelle. Dans ce sens, les éléments du système qui sont directement ou indirectement observables peuvent être calibrés et cela si ces derniers sont amplement ou non pour une mise en œuvre ample pour une conception sensorielle optimale et une conception diagnostique.

Dans l'ensemble, utiliser l'approche bond graph pour l'analyse structurelle a permis de combiner une modélisation énergétique détaillée avec une analyse systématique des pro-

priétés de contrôle et d'observation. Cela offre un cadre cohérent et robuste pour comprendre le fonctionnement des systèmes énergétiques complexes, facilitant ainsi leur surveillance, leur contrôle et leur amélioration. Cette étude ouvre ainsi la voie à des avancées dans les méthodes d'analyse et la conception de systèmes énergétiques plus performants et fiables.

Bibliographie

- [1] Fichou, Philippe. *Bond graphs : une méthode pluridisciplinaire*. Eduscol STI, 2004.
- [2] Gilbert, Elmer G. "Controllability and Observability in Multivariable Control Systems". *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series A Control*, vol. 2, no. 1, pp. 128–151, 1963.
- [3] Sueur, C. *Contribution à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques par une approche bond-graph. Application aux systèmes polyarticulés plans à segments flexibles*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France, 1990.
- [4] Mosiek, David. *Procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graphs*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 12 Octobre 1999.
- [5] Rouabah, Zineb. *Les Bond Graph*. Cours, Université Batna 2, (sans date).
- [6] Broenink, Jan F. *Introduction to Physical Systems Modelling with Bond Graphs*. University of Twente, Dept EE, Control Laboratory, Enschede, Netherlands, (sans date).
- [7] Mellal, Mohamed. *Modélisation et Simulation par Bond Graph d'un Système Mécatronique pour la Conception Intégrée de Supervision*. Article, Laboratoire Mécanique des Solides et des Systèmes, Université de Boumerdès, 07-08 Mars 2011.
- [8] Bishop, R.H. *Mechatronics : An Introduction*. Taylor and Francis Group, USA, 2006, pp. 1-10.
- [9] Samantaray, A. K. et Ould Bouamama, B. *Model-based Process Supervision : A Bond Graph Approach*. Springer Verlag, London, 2008, 489p.
- [10] Ould Bouamama, B. *Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés : Approche Bond Graph*. Mémoire de HDR, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), 2002.

- [11] Djeziri, M. A. *Diagnostic des Systèmes Incertains par l'Approche Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [12] Medjaher, K. *Contribution de l'Outil Bond Graph pour la Conception de Systèmes de Supervision des Processus Industriels*. Thèse de doctorat, UST Lille 1 - EC Lille, 2005.
- [13] Cocquempot, V. *Contribution à la Surveillance des Systèmes Industriels Complexes*. Mémoire de HDR, IUT de Lille, 2004.
- [14] Ould Bouamama, B. et Dauphin-Tanguy, G. "Modélisation par Bond Graph : Eléments de Base pour l'Energétique". *Techniques de l'Ingénieur*, 2006, pp. 1-5, BE 8 280.
- [15] Borutzky, W. "Bond Graph Modelling and Simulation of Multidisciplinary Systems : An introduction". *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no. 1, pp. 3-21, Janvier 2009.
- [16] Vergé, M. et Jaume, D. *Modélisation Structurée des Systèmes avec les Bond Graphs*. Edition Technip, France, 2004, pp. 273-287.
- [17] Busson, F. *Les Bond Graphs Multi-énergie pour la Modélisation et la Surveillance en Génie des Procédés*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2002, pp. 97-109.
- [18] Drici Tani, Aya Zahra Hadil et Bensedik, Meriem Ilham. *Degré d'observabilité pour la surveillance d'un système physique*. Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 26/09/2024.
- [19] Benkhaled, M. *Placement de capteurs pour la surveillance des systèmes modélisés par les bond graphs*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, (sans date).
- [20] Maquin, Didier, Luong, Marie et Ragot, Jose. *Sureté de fonctionnement et redondance analytique*. 1er congrès Pluridisciplinaire Qualité et sureté de fonctionnement, Compiègne, France, 1994.
- [21] Ragot, José, Maquin, Didier et Kratz, Frédéric. "Observability and redundancy decomposition application to diagnosis". In *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Springer, 2000, pp. 51-85.
- [22] Sueur, C. et Dauphin-Tanguy, G. "Bond-graph approach for structural analysis of MIMO linear systems". *Journal of the Franklin Institute*, vol. 328, no. 1, pp. 55-70, 1991.
- [23] El Osta, W. *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2005.
- [24] Messaoud, Y. et Messaoudi, M. *L'observabilité structurelle d'un moteur à courant continu par l'approche bond-graph*. (sans date).
- [25] Ould Bouamama, Belkacem et Dauphin-Tanguy, Geneviève. *Modélisation par bond graph - Éléments de base pour l'énergétique*. 07 oct. 2019.

- [26] Aichounyoucef, Younsikhellaf. *Création d'une boîte à outils à éléments bond graphs pour simulation des systèmes dynamiques*. Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 30/10/2012.
- [27] Bideaux, Éric. *Modélisation des systèmes dynamiques et commande avancée*. AMESIM, l'Université Numérique Ingénierie et Technologie (UNIT), 28/07/2010.
- [28] Marx, Benoit. *IS2_ENSGSI_POLY.pdf*. http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/benoit.marx/IS2_ENSGSI_POLY.pdf (consulté le [date]).

Résumé

L'analyse structurale par la méthode Bond-Graph d'un système énergétique consiste à modéliser et étudier les interactions énergétiques entre ses différents sous-systèmes quels que soient leurs domaines physiques (mécanique, électrique, hydraulique, thermique...). Le Bond-Graph en tant que langage graphique unifié permet de présenter les composants énergétiques ainsi que leurs interactions standardisées dans un premier temps puis d'attribuer une causalité afin de découvrir la structure dynamique interne du système. À partir de la modélisation ci-dessus, on pourrait ensuite proposer les équations d'état et calculer des propriétés clés comme la commandabilité, l'observabilité et le degré de couplage. Cette approche fournit ainsi un cadre unifié pour l'apprentissage de l'analyse et de la conception du fonctionnement ainsi que du contrôle d'un système énergétique complexe.

Mots-clés — Analyse structurale, Méthode Bond-Graph, Système énergétique.

Abstract

The structural analysis by the Bond-Graph method of an energy system consists in modeling and studying the energy interactions between its different subsystems regardless of their physical domains (mechanical, electrical, hydraulic, thermal...). The Bond-Graph as a unified graphic language allows to present the energy components and their standardized interactions in a first time then to assign a causality in order to discover the internal dynamic structure of the system. From the above modelling, one could then propose the equations of state and calculate key properties such as controllability, observability and degree of coupling. This approach thus provides a unified framework for learning the analysis and design of the operation as well as the control of a complex energy system.

Keywords - Structural analysis, Bond-Graph method, Energy system.

الملخص

يتمثل التحليل البنوي بطريقة بوند-غراف لنظام الطاقة في نمذجة ودراسة التفاعلات الطاقية بين أنظمتها الفرعية المختلفة بغض النظر عن مجالاتها الفيزيائية (ميكانيكية، كهربائية، هيدروليكية، حرارية...). يسمح Bond-Graph كلغة رسومية موحدة بعرض مكونات الطاقة وتفاعلاتها الموحدة لأول مرة ثم تعيين علاقة سببية من أجل اكتشاف البنية الديناميكية الداخلية للنظام. ومن خلال النمذجة المذكورة أعلاه، يمكننا بعد ذلك اقتراح معادلات الحالة وحساب الخصائص الرئيسية مثل القدرة على التحكم والقدرة على الملاحظة ودرجة الاقتران. وبالتالي يوفر هذا النهج إطاراً موحداً لتعلم تحليل وتصميم العملية بالإضافة إلى التحكم في نظام الطاقة المعقد.

الكلمات المفتاحية - التحليل البنوي، طريقة بوند-غراف، نظام طاقة.