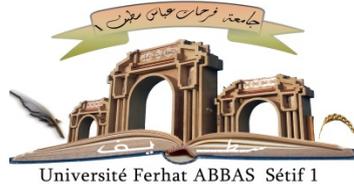


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option: Automatique

Par

Ismail DIF

THÈME

**Outils graphiques et théoriques pour la commande
des systèmes complexes. Approche bond graph**

Soutenue le --/--/2022 devant le Jury:

KHEMLICHE Mabrouk	Professeur	Université de Sétif 1	Président
BENMAHAMMED Khier	Professeur	Université de Sétif 1	Directeur de thèse
KESSAL Abdelhalim	Professeur	Université Bordj Bou Arreridj	Examineur
AGGOUNE Lakhdar	MCA	Université de Sétif 1	Examineur
IRATNI Abdelhamid	MCA	Université Bordj Bou Arreridj	Examineur
KHATTAB Khatir	MCA	Université de M'sila	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant pour la volonté et la patience qu'il m'a donné tout au long de mes études.

Je tiens à remercier, et à adresser ce travail, en premier lieu, à mon directeur de thèse Mr. le Professeur **BENMAHAMMED Khier**, leur patiente et conseils m'ont guidé durant la réalisation de ce projet.

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du Laboratoire d'Automatique Appliquée et de Diagnostics Industriels (LAADI) à l'université Ziane Achour de Djelfa, sous la direction du Professeur **HAFIFA Ahmed**, que je tien le remercier, en collaboration avec le Laboratoire de recherche des Systèmes Intelligents (LSI) de L'université Ferhat Abbas de Sétif1, sous la direction du Professeur **BENMAHAMMED Khier**, et le groupe de recherche Systèmes Avancés de Contrôle à L'université Polytechnique de Catalogne de Barcelone, L'Espagne, sous la direction du Professeur **Vicenç Puig Cayuela**, que je la passe un grand merci.

Je tiens à remercier particulièrement Mr. le Professeur **KHEMLICHE Mabrouk**, l'homme et l'encadreur de mon mémoire de magister en collaboration avec le Professeur Mr. **MOSTEFAI Mohammed**, qui m'ont apprenties et contribués à faire mes premiers pas dans la recherche scientifique à travers les domaines d'intérêt de l'outil Bond graph, dont je remercie encore le Professeur **KHEMLICHE Mabrouk**, d'avoir accepté la présidence du jury de ma soutenance, ainsi que Messieurs **AGGOUNE Lakhdar**, Maître de Conférence à l'université de Sétif-1, **KESSAL Abdelhalim**, Professeur à l'université de Bordj Bou Arréridj, et **IRATNI Abdelhamid**, Maître de conférences à l'université de Bordj Bou Arréridj, **KHETTAB Khatir** Maître de conférences à l'université de M'sila, qui ont acceptés d'examiner mon manuscrit de thèse.

Je remercie **BOUCHAMA Ziyad**, Maître de conférences à l'université de Bordj Bou Arréridj, **BEHIIH Khalissa**, Maître de conférences à l'université de Sétif-1, pour son soutien lors de la préparation de cette thèse, ainsi que mes amis et collègues, que ce soient à l'université de Sétif-1 et à l'université de Djelfa, **Djendaoui Dahmane**, Professeur **Kouzou abdallah**, **Hassak Sofiane**, **Rabehi Abdelhalim**, et les autres, et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant ces années de recherche et d'études.

Je tiens également à dire un grand merci à mes parents pour leur soutien permanent et pour l'infinie patience et encouragements durant mon cycle de graduation et post graduation, mes frères et sœurs, mes neveux **DIF Naas** et les autres.

Enfin, je tiens à remercier ma femme pour m'avoir toujours encouragé et pour le soutien moral qu'elle m'a apportée pendant toute la durée du cycle doctorat, sans oublier mes enfants.

Dédicaces

À :

Mes chers parents

La mémoire de ma mère Hadda et mon oncle Hadj Amar

Ma chère épouse et mes enfants

Mes frères et sœurs et ma grande famille

Mes enseignants dans toutes les étapes de mes études

Mes amis, collègues et voisins

Je dédie ce modeste travail

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SOMMAIRE	i
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les lois de commande issues du modèles bond graph.....	4
I.1. Introduction:	4
I.2. Rappel sur l’outil Bond graph.....	4
I.2.1. Définition.....	4
I.2.2. Variables et éléments bond graph.....	5
I.2.3 Causalité en bond graph.....	8
I.2.4. Etapes de modélisation par Bond graph	11
I.3. Lois de commande issues de modèles bond graph	12
I.3.1. Lois de commande à base de modèles analytiques issus de modèles bond graph.....	12
I.3.2. Lois de commande issues du modèle bond graph par des manipulations graphiques.....	13
I.3.3. Lois de commande mixtes : Conceptions graphiques et manipulations analytiques.....	15
I.4. Conclusion	17
Chapitre II : Outils d’analyse par bond graph.....	18
II.1. Introduction	18
II.2. Chemins causaux, boucles causales, et gains causaux	18
II.2.1. Chemins causaux.....	18
II.2.2. Boucles causales.....	19
II.2.3. Gains causaux.....	19
II.3. Analyse des propriétés structurelles par bond graph:.....	19
II.3.1. Rang Structurel de la matrice d'état.....	20
II.3.2. Commandabilité structurelle par bond graph	21
II.3.2. Observabilité structurelle par bond graph	21
II.4. La Bicausalité en bond graph	22
II.4.1. Définition.....	22
II.4.2. Propriétés et répercussion de la bicausalité.....	23
II.5. Inversion des modèles bond graph	25
II.6. Incertitude en bond graph.....	25

II.6.1. Définition.....	25
II.6.2. Bond graph incrémental	26
II.6.3. Bond graph incertain	27
II.7. Conclusion.....	29
Chapitre III : Commande de suivi de trajectoire par bond graph.....	30
III.1. Introduction.....	30
III.2. Suivi de trajectoire par l'approche bond graph.....	30
III.2.1. Procédure de conception d'un suiveur asymptotique de trajectoire :	31
III.2.2. Application.....	32
III.2.3. Simulation	34
III.3. Suivi de trajectoire par l'approche bond graph d'un modèle incertain.....	35
III.3.1 Modèle bond graph incertain	35
III.3.2. Conception de la loi de commande	36
III.3.3. Simulation	38
III.4. Conclusion	39
Chapitre IV : Commande de suivi de trajectoire d'une suspension magnétique	40
IV.1. Introduction.....	40
IV.2. Description du processus	40
IV.3. Modélisation par bond graph	41
IV.4. Conception de la loi de commande par bond graph.....	44
IV.4.1 Etat de l'art sur la commande du système MAGLEV	44
IV.4.2 Procédure de SAT de la lévitation électromagnétique.....	44
IV.4.3. Simulation.....	48
IV.5. Loi de commande avec modèle bond graph incertain	53
IV.5.1 Modèle bond graph incertain	53
IV.5.2. Conception de la loi de commande.....	53
IV.5.3. Simulation.....	57
IV.6. Conclusion	59
Conclusion générale.....	60
BIBLIOGRAPHIE.....	62

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1: TRANSFERT DE LA PUISSANCE ENTRE DEUX SYSTEMES A ET B..... 4

FIGURE 1.2: CAUSALITE EN BOND GRAPH..... 8

FIGURE 1.3: BOND GRAPH A MOTS..... 11

FIGURE 1.4: ETAPES DE MODELISATION PAR BOND GRAPH A MOTS..... 12

FIGURE 1.5: MULTIPORT BOND GRAPH CIBLE ET LEUR COMMANDE..... 14

FIGURE 1.6: MULTIPORT BOND GRAPH INTERMEDIAIRE..... 14

FIGURE 2.1: CHEMINS CAUSAUX SIMPLES..... 18

FIGURE 2.2: CHEMINS CAUSAUX MIXTES..... 18

FIGURE 2.3: CHAINE D’ACTION E/S..... 19

FIGURE 2.4: BOUCLE CAUSALE..... 19

FIGURE 2.5: RANG STRUCTUREL PAR BOND GRAPH 20

FIGURE 2.6: VERIFICATION DE LA COMMANDABILITE PAR BOND GRAPH 21

FIGURE 2.7: VERIFICATION DE L’OBSERVABILITE PAR BOND GRAPH 22

FIGURE 2.7: LA BICAUSALITE EN BOND GRAPH..... 22

FIGURE 2.8: LA BICAUSALITE EN BOND GRAPH : VERSION II 23

FIGURE 2.9: MODELE STANDARD D’INTERCONNEXION..... 26

FIGURE 2.10: BOND GRAPH INCREMENTAL DE L’ELEMENT “R”..... 27

FIGURE 2.11: BOND GRAPH INCERTAIN DE L’ELEMENT “R” EN FORME CANONIQUE..... 27

FIGURE 2.12: MODELE LFT D’UN ELEMENT BOND GRAPH INCERTAIN “R”..... 28

FIGURE 3.1: SCHEMA GLOBAL D’UN CONTROLEUR SUIVEUR DE TRAJECTOIRE..... 30

FIGURE 3.2: (A) SYSTEME PHYSIQUE (B) SON MODELE BOND GRAPH..... 32

FIGURE 3.3: MODELE BOND GRAPH INVERSE..... 33

FIGURE 3.4: SIGNAL DE REFERENCE..... 34

FIGURE 3.5: SIGNAL DE SORTIE..... 35

FIGURE 3.6: ELEMENT BOND GRAPH “I” 36

FIGURE 3.7: MODELE BOND GRAPH INCERTAIN EN MODELE STANDARD D’INTERCONNEXION..... 36

FIGURE 3.8: MODELE BOND GRAPH INVERSE..... 37

FIGURE 3.9: SIMULATION DE LA VITESSE COMMANDEE EN PRESENCE D’INCERTITUDE..... 39

FIGURE 4.1: SCHEMA FONCTIONNEL D’UNE LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE..... 41

FIGURE 4.2: BOND GRAPH A MOTS D'UNE LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE.....	42
FIGURE 4.3: ELEMENT MULTI-BOND GRAPH MODELE DU COUPLAGE ELECTRO-MAGNETO-MECANIQUE.....	42
FIGURE 4.4: MODELE BOND GRAPH DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE.....	42
FIGURE 4.5: MODELE BOND GRAPH SIMPLIFIE DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE.....	43
FIGURE 4.6: SIMULATION DE MODELE BOND GRAPH PAR 20-SIM.....	44
FIGURE 4.7: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME II.....	44
FIGURE 4.8: MODELE BOND GRAPH INVERSE.....	45
FIGURE 4.9: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME I.....	47
FIGURE 4.10: MODELE BOND GRAPH INVERSE.....	47
FIGURE 4.11 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE.....	49
FIGURE 4.12 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC $K_H=300$ ET $K_G=600$	49
FIGURE 4.13 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC $K_H=5000$ ET $K_G=10000$	50
FIGURE 4.14 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC L'ERREUR.....	50
FIGURE 4.15 : RESULTAT DE CONTROLE PID PAR MODELE BOND GRAPH [90].....	51
FIGURE 4.16 : RESULTAT DE CONTROLE PID D'UN AMORTISSEUR ELECTROMAGNETIQUE [104]...	51
FIGURE 4.17 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC REFERENCE SINUSOIDALE.....	52
FIGURE 4.18 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC REFERENCE SINUSOIDALE ET LEUR ERREUR DE SUIVI.....	52
FIGURE 4.19 : MODELE BOND GRAPH DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE AVEC INCERTITUDE.....	53
FIGURE 4.20 : MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME II	53
FIGURE 4.21: MODELE BOND GRAPH INVERSE.....	54
FIGURE 4.22: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME I.....	55
FIGURE 4.23: MODELE BOND GRAPH INVERSE.....	55
FIGURE 4.24 : SIMULATION DU DEPLACEMENT AVEC INCERTITUDE SANS COMMANDE	57
FIGURE 4.25 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE AVEC INCERTITUDE (STEP REFERENCE)	58
FIGURE 4.26 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE (SINUSOÏDE).....	58
FIGURE 4.27 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE AVEC ERREUR DE SUIVI (SINUSOÏDE).....	59

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 1.1: VARIABLES ENERGETIQUES EN BOND GRAPH POUR LES DIFFERENTS DOMAINES DE LA PHYSIQUE.....	5
TABLE 1.2: ELEMENTS BOND GRAPH LEURS CORRESPONDANCE DANS LES DOMAINES PHYSIQUES.....	7-8
TABLE 1.3: CAUSALITE DES ELEMENTS BOND GRAPH.....	9-10
TABLE 2.1: LA BICAUSALITE DES SOURCES ET DES DETECTEURS.....	23
TABLE 2.2: REPERCUSSION DE LA BICAUSALITE SUR LES ELEMENTS BOND GRAPH.....	24

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La commande des systèmes physiques est l'un des objectifs les plus importants aux automatismes, pour leurs supervisions, d'où la nécessité d'une technique de commande efficace et robuste face aux différents signaux de perturbation et/ou erreurs de modélisation.

La plupart des techniques de commande nécessitent un modèle de système étudié, pour leur conception, n'importe quel modèle qui permet la compréhension du système et l'évaluation de leur comportement. On distingue deux types de modèles :

- modèles de connaissance : issus de la connaissance approfondie de système (phénomènes, lois caractéristiques, ..., etc.)
- modèles de représentation : qui sont des abstractions des phénomènes, en équations mathématiques ou schémas graphiques, du système.

L'outil bond graph, par son caractère graphique, et ses propriétés structurelles sont classées dans cette dernière catégorie, est un outil puissant pour la modélisation des systèmes physiques, en mono domaine, mais notamment très puissant en multi domaine, car il permet aux chercheurs de différents domaines, de se communiquer en même langage.

Défini par son fondateur, le prof. Henry Paynter, en 1959 [1], et formalisé par d'autres chercheurs, comme Dean C. Karnopp et autres [2], Jean Thoma [3], le bond graph est basé sur le principe de conservation de l'énergie, modélise graphiquement par le lien (bond en anglais) le transfert de puissance entre les éléments du système interconnectés. Il est basé sur le principe que les mêmes phénomènes physiques se répètent, et se représentent par le même élément, en bond graph, dans différents domaines de la physique.

Les chercheurs intéressés par cet outil, ne cessent pas à développer des caractéristiques et concepts, graphiques ou algébriques, qui le permettent d'améliorer leur représentation des systèmes, et aussi le rendre un seul outil pour tout : modélisation, analyse, identification, diagnostic, conception des lois de commande, ..., etc., par leurs travaux de recherche présentés aux conférences, publications et livres, comme la conférence périodique internationale nommée ICBGMS (International Conference on Bond Graph Modeling & Simulation) de la société SCS, <https://scs.org/>, société internationale de modélisation et de simulation, le journal : Journal of The

Franklin Institute d'Elsevier : <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-the-franklin-institute>, et des livres publiés, avec des auteurs uniques ou collection d'auteur, [4-10].

Dans l'axe de commande à l'aide du modèle bond graph, les premiers travaux essayant d'utiliser l'outil par la déduction des modèles mathématiques traditionnels (fonction de transfert, espace d'état, schémas bloc, graphe de fluence, ...) soient [11], ou pour l'étude de la stabilité des fonctions de transfert associées au modèle bond graph [12], d'autres, et puis par l'invention du concept de la bicausalité par P. Gawthrop [13], qui a été très utilisée pour l'analyse, l'estimation des paramètres et des variables bond graph, et qui permettent la conception des observateurs et estimateurs bond graph, et l'inversion des modèles bond graph, ce qui ouvre le volet aux méthodes graphiques d'analyse des modèles (dynamique des zéros, degré relatif [14-21]) et de synthèse des lois de commande par S. Junco [22-28], et aussi de diagnostic [10], et lois de commande tolérante aux fautes [29-30], sans oublier la modélisation des incertitudes, qui est une action nécessaire pour la conception robuste des algorithmes et lois de commande [8].

Les travaux présentés dans cette thèse, concerne la synthèse graphique des lois de commande, à l'aide de l'outil bond graph et ses concepts de bicausalité et inversion du modèle normal ou incertain. L'incertitude ici est donnée par leur forme standard d'interconnexion, basée sur la transformation linéaire fractionnelle (LFT : Linear Fractional Transformation) [31]. Cette commande est le contrôle du suivi asymptotique de trajectoire, qui est une commande adaptée à certains types de problèmes et applications, comme la robotique industrielle, transport autonome des véhicules, ..., etc.

La procédure présentée, est initiée par les travaux de S. Junco [32], mais appliquée à un système mécanique classique de masse ressort amortisseur [33], puis augmentée sur un modèle avec incertitude, en vue de valider leur robustesse et performance de la technique [34]. Cette procédure repose sur l'inversion bicausale du chemin d'action E/S, et par proposition d'une dynamique adéquate de l'erreur de suivi (en relation avec le degré relatif du modèle). Ensuite, on applique cette technique sur un autre système non linéaire : la lévitation électromagnétique, qui présente un système multi domaine (électrique, magnétique et mécanique), permettant de tester l'efficacité de la méthode sur un tel système, et cela sur le modèle normal et incertain.

Cette thèse est organisée comme suit :

Le premier chapitre présente une brève description sur l'outil bond graph : leurs variables énergétiques, éléments, causalité et étapes de conception du modèle, puis un bref historique sur l'emploi du bond graph dans la synthèse des lois de commande, divisée en trois (03) catégories : à

base des modèles déduits du bond graph, à base des manipulations graphiques du modèle bond graph et mixtes entre les deux catégories.

Dans le deuxième chapitre, on rappelle quelques méthodes d'analyse structurelle des modèles bond graph, comme : la commandabilité, l'observabilité, le rang structurel, la bicausalité, l'inversion et l'incertitude des paramètres d'éléments bond graph.

Le troisième chapitre sera consacré à l'élaboration et la synthèse de la loi de commande de suivi asymptotique de trajectoire, à travers une procédure, à la fois graphique (par l'inversion bicausale du chemin d'action E/S) et analytique par la déduction des relations constitutives des jonctions, et la définition de la dynamique de l'erreur de suivi. Cette technique est illustrée sur le modèle bond graph d'un système mécanique en absence [33] et en présence d'incertitude de modélisation, du type additive, formée en LFT, sujet d'une publication internationale dans un journal indexé [34].

Le chapitre (04) présente l'application de cette procédure de suivi de trajectoire, sur le modèle bond graph d'une lévitation électromagnétique. Cette application, très utile dans différents domaines industriels, qui présente leur caractère non linéaire et sensible, lui permettant d'être un sujet convenable de modélisation avec l'outil bond graph, ainsi pour la synthèse robuste d'une loi de commande.

En conclusion, on trouve une synthèse sur nos travaux de cette thèse, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les contraintes rencontrées et les perspectives de ce sujet.

On trouve aussi dans l'annexe nos travaux publiés dans ce sujet de recherche.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART SUR LES LOIS DE

COMMANDE ISSUES DU MODELES

BOND GRAPH

Chapitre I : Etat de l'art sur les lois de commande issues du modèles bond graph

I.1. Introduction:

Les modèles des systèmes issus de la modélisation par bond graph, sont comme les autres types de modèles, utilisés comme support de conception des lois de commande, notamment les modèles d'espace d'état, de schémas blocs, de fonctions ou matrices de transfert, ... etc. Ce chapitre donne un petit historique sur l'utilisation des modèles bond graph comme outil de construction des lois de commande, mais avant de passer à cet historique, on rappelle les principaux concepts de l'outil bond graph.

I.2. Rappel sur l'outil Bond graph

I.2.1. Définition

L'outil bond graph, comme une méthode de modélisation et inventé par le professeur H. Paynter en 1959 [1] comme outil universel de modélisation pour les divers domaines de la physique, permettant aux chercheurs de ces domaines de se communiquer par un même langage de modélisation. Ensuite, il a été développé, augmenté par plusieurs chercheurs mondiaux, comme D.C. Karnopp, Rosenberg, Margolis [2], JF. Thoma. [3], F. E. Cellier [4], G. Dauphin-Tanguy [5], w. Borutzky [6-9] et d'autres [10].

L'idée principale de la modélisation par bond graph est que les différents phénomènes de la physique se reproduisent pour les divers domaines de la physique par un même élément comme les phénomènes de stockage, d'inertie, de dissipation, de transformation, de production de l'énergie, de connexions, mais ils changent leurs formes selon le domaine et l'interaction entre les éléments, qui nous donnent la puissance, résultat du produit de deux variables conjugués : l'effort « e » et le flux « f » (Figure 1.1).

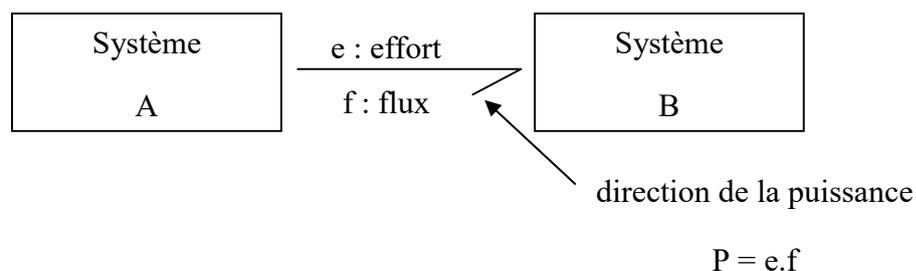


FIGURE 1.1: TRANSFERT DE LA PUISSANCE ENTRE DEUX SYSTEMES A ET B

L'effort « e » et le flux « f » sont deux variables énergétiques qui prennent la nature différente pour chaque domaine de la physique.

I.2.2. Variables et éléments bond graph

A. Variables en Bond graph

Les variables énergétiques en bond graph : l'effort "e" et le flux "f", ainsi que leur intégrale sont regroupés dans le tableau suivant, pour les différents domaines de la physique [5] :

Domaines	L'effort « e »	Le flux « f »	Le moment « p » $p = \int e dt + p(0)$	Le déplacement « q » $q = \int f dt + q(0)$
Mécanique de translation	Force (F)	Vitesse (v)	impulsion (p)	Déplacement (x)
Mécanique de rotation	Couple (τ)	Vitesse angulaire (w)	Impulsion angulaire (h)	Angle (θ)
Electrique	Tension (U)	Courant (i)	Flux magnétique (φ)	Charge (q)
Magnétique	Force magnéto Motrice (M)	Dérivée de flux magnétique ($\dot{\phi}$)		Flux magnétique (φ)
Hydraulique	Pression (P)	Débit volumique (dV/dt)	Impulsion pression	Volume (V)
Thermique	Température (T)	Flux d'entropie (\dot{S})		Entropie
Chimique	Potentiel Chimique (C)	Flux molaire (\dot{m})		Masse molaire

TABLE 1.1: VARIABLES ENERGETIQUES EN BOND GRAPH POUR LES DIFFERENTS DOMAINES DE LA PHYSIQUE

L'énergie se calcule par la relation suivante :

$$E(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau + E(0) = \int_0^t e(\tau).f(\tau) d\tau + E(0) \tag{1.1}$$

Avec les variables d'énergie généralisées :

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \int_0^t e(\tau) d\tau + p(0) \\
 q(t) &= \int_0^t f(\tau) d\tau + q(0)
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Remarques [5]:

- pour les domaines magnétique, thermique et chimique, il n'existe pas de variable de moment (p)
- pour les domaines Hydraulique, thermique et chimique il existe d'autres variables d'énergies simples et plus adaptées à la modélisation et au Simulation appelées les pseudos bond graph.

B. Eléments en bond graph

Les éléments bond graph se divisent en plusieurs catégories :

- **Eléments passifs** : qui dissipent (élément R) ou stockent l'énergie (élément I et C) ;
- **Eléments actifs** : qui fournissent l'énergie au système (source d'effort Se et source de flux Sf) ;
- **Eléments de jonction** permettant le couplage entre les éléments cités ci-dessus. On constate les jonctions « 0 », « 1 » et les éléments de transformation directe « TF » et transformation mixte « GY ». Ces éléments sont conservatifs de la puissance ;
- **Eléments de détection** qui servent à modéliser tous les phénomènes de mesure et de détection de l'effort « élément De » et de flux « élément Df », placés aux jonctions « 0 » et « 1 » respectivement. Ils sont supposés idéaux (ne consomment pas de l'énergie) ;

Le tableau suivant regroupe tous les éléments bond graph avec leurs phénomènes que les modélisent en différents domaines de la physique :

Domaines Elément	Mécanique de translation	Mécanique de rotation	Electrique	Hydraulique
Elément (R) : Phénomènes de dissipation	Amortisseur, Frottement —————> R : b	Amortisseur, Frottement —————> R : b	Résistance électrique —————> R : r	restriction hydraulique —————> R : r
Elément (C) : Phénomènes de stockage	Ressort —————> C : 1/k	Elasticité —————> C	Condensateur —————> C : 1/C	Réservoir —————> C
Elément (I) : Phénomènes de stockage	Masse —————> I : M	Inertie —————> I : J	Inductance électrique —————> I : L	Inertie hydraulique —————> I
Elément (Se) : Source d'effort	Source de Force Se : F —————>	Source de couple Se : τ —————>	Source de tension Se : U —————>	Source de pression Se : P —————>
Elément (Sf) : Source de flux	Vitesse initiale Sf : v —————>	vitesse de rotation initiale Sf : ω —————>	Source de courant Sf : i —————>	Source de débit volumique Se : \dot{V} —————>
Jonction « 0 » : effort commun $\begin{array}{c} f_{n-1} \downarrow e_{n-1} \\ \swarrow \searrow \\ e_1 \quad 0 \quad f_n \\ \swarrow \searrow \\ f_1 \quad e_2 \downarrow f_2 \\ \downarrow \end{array}$	Liaison des éléments de subies à une même force mécanique	Liaison des éléments de subies à un même couple	Liaison des éléments de subies à une même tension électrique	Liaison des éléments de subies à une même pression hydraulique
$\begin{cases} e_1 = e_2 = \dots = e_n \\ \sum_i a_i \cdot f_i = 0; \quad a_i = \pm 1 \end{cases}$				
Jonction « 1 » : effort commun $\begin{array}{c} f_{n-1} \downarrow e_{n-1} \\ \swarrow \searrow \\ e_1 \quad 1 \quad f_n \\ \swarrow \searrow \\ f_1 \quad e_2 \downarrow f_2 \\ \downarrow \end{array}$	Liaison des éléments de subies à une même vitesse mécanique	Liaison des éléments de subies à une même vitesse angulaire	Liaison des éléments de subies à un même courant électrique	Liaison des éléments de subies à un même débit volumique
$\begin{cases} f_1 = f_2 = \dots = f_n \\ \sum_i a_i \cdot e_i = 0; \quad a_i = \pm 1 \end{cases}$				
Elément (TF) : Transformation directe	Bras de levier	Réducteur mécanique	Transformateur électrique	Source de débit volumique
$\begin{array}{c} e_1 \quad \quad e_2 \\ \swarrow \quad \quad \searrow \\ f_1 \quad \quad f_2 \end{array} \quad \text{TF : m} \quad \begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$				

Elément (GY) : Transformation mixte	Gyroscope	Moteur à CC	Moteur à CC	
$\frac{e_1}{f_1} \nearrow \text{GY : r} \frac{e_2}{f_2} \searrow \begin{cases} e_1 = rf_2 \\ e_2 = rf_1 \end{cases}$				
Détecteur « De » : Mesure et détection d'effort	Tous éléments mesurent la force	Tous éléments mesurent le couple	Tous éléments mesurent la tension : voltmètre	Tous éléments mesurent la pression : Baromètre
Détecteur « Df » : Mesure et détection de flux	Tous éléments mesurent la vitesse	Tous éléments mesurent la vitesse angulaire	Tous éléments mesurent le courant : Ampèremètre	Tous éléments mesurent le débit volumique

TABLE 1.2: ELEMENTS BOND GRAPH LEURS CORRESPONDANCE DANS LES DOMAINES PHYSIQUES

1.2.3 Causalité en bond graph

A. Définition

La causalité en bond graph est définie comme la mise en œuvre de cause à effet des éléments connectés aux extrémités d'un même lien ou jonction c à d de définir les orientations ou les sens d'efforts et de flux des liens bond graph. La figure suivante (Fig. 1.2) montre la définition de la causalité entre deux systèmes A et B :

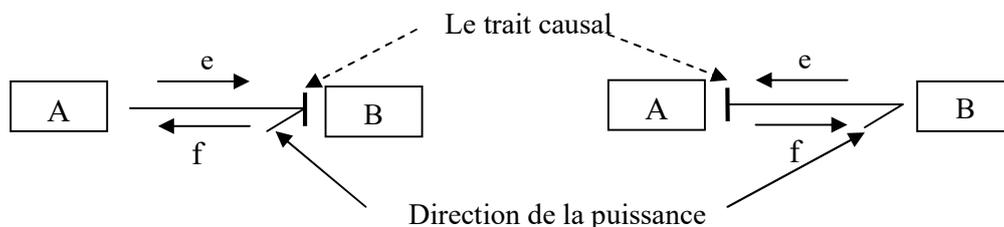


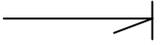
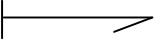
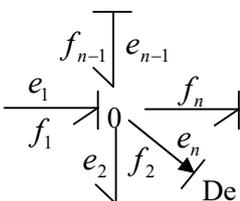
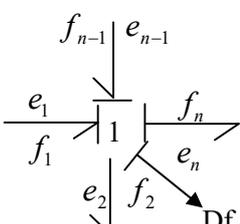
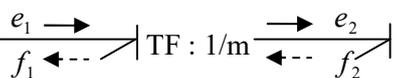
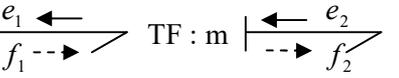
FIGURE 1.2: CAUSALITE EN BOND GRAPH

La causalité est représentée graphiquement par un trait causal qui définit le sens d'orientation de l'effort.

Remarque : la causalité en Bond graph est totalement indépendante au sens du transfert de la puissance représentée par le lien bond graph.

B. Règles d'affectation de la causalité :

La causalité en bond graph est soumise à des règles pour leur affectation ces règles sont regroupées dans le tableau suivant [5] :

Eléments bond graph		Causalité	Lois
Causalité obligatoire	Actifs	Se 	« e » imposé par la source Se
		Sf 	« f » imposé par la source Sf
	Jonctions		Un seul trait causal près de la jonction « 0 », que l'on peut placer un détecteur d'effort De :
		$\begin{cases} e_2 = e_1, \dots, e_{n-1} = e_1, e_n = e_1 \\ f_1 = \sum_{i=2}^n a_i \cdot f_i, \text{ avec } a_i = \pm 1 \end{cases}$	
	Jonctions		Un seul trait causal loin de la jonction « 1 », que l'on peut placer un détecteur de flux Df :
		$\begin{cases} f_1 = f_2, \dots, f_{n-1} = f_2, f_n = f_2 \\ e_2 = \sum_{i=1,3}^n a_i \cdot e_i, \text{ avec } a_i = \pm 1 \end{cases}$	
	Transformations		Un seul trait causal près du TF, l'autre loin :
		$\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$	
Transformations		Un seul trait causal près du TF, l'autre loin :	
	$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$		

			<p>Les deux traits causaux loin du GY :</p> $\begin{cases} e_1 = r.f_2 \\ e_2 = r.f_1 \end{cases}$
			<p>Les deux traits causaux près du GY :</p> $\begin{cases} f_1 = \frac{1}{r}e_2 \\ f_2 = \frac{1}{r}e_1 \end{cases}$
Selon les règles au modèle	Intégrale préférentielle		$f(t) = \frac{1}{I} \left(\int_{t_0}^{t_1} e(\tau) d\tau + p(t_0) \right)$
			$e(t) = \frac{1}{C} \left(\int_{t_0}^{t_1} f(\tau) d\tau + q(t_0) \right)$
	Dérivée		$e(t) = I \frac{d}{dt} f(t)$
			$f(t) = C \frac{d}{dt} e(t)$
	Arbitraire		$e(t) = R.f(t)$
			$f(t) = \frac{1}{R}.e(t)$

TABLE 1.3: CAUSALITE DES ELEMENTS BOND GRAPH

L'affectation de la causalité sur les modèles bond graph passe nécessairement sur les étapes suivantes :

1. affecter la causalité aux sources, qui est obligatoire ;

2. affecter la causalité intégrale préférentiellement aux éléments I et C ;
3. compléter la causalité aux éléments R en respectant les restrictions de causalité des jonctions et d'éléments de transformation ;
4. vérifier les conflits de causalité aux jonctions. S'il y en a, répéter l'étape 2 en modifiant la causalité d'éléments I et/ou C source de conflits en causalité dérivée.

La mise en causalité des modèles Bond graph permet de passer des modèles graphiques aux modèles mathématiques conventionnels (Espace, d'état, fonction de transfert) ou modèles schémas blocs, ainsi de vérifier quelques propriétés structurelles nécessaires à l'analyse des modèles (Rang, contrôlabilité, observabilité, inversion, stabilité,... etc.).

I.2.4. Etapes de modélisation par Bond graph

La modélisation pour bond graph d'un système physique comporte les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Partition du système physique en sous-systèmes physiques interconnectés, selon le domaine, les phénomènes et les hypothèses, en rassemblant un modèle graphique appelé "Bond graph à mots ou word bond graph" (Figure 1.3).

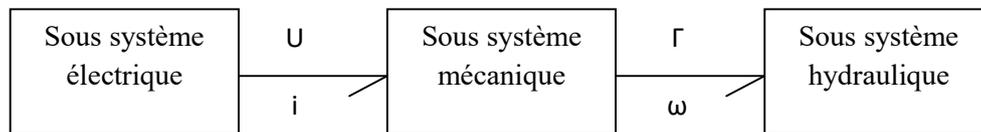


FIGURE 1.3: BOND GRAPH A MOTS

- **Étape 2.** Trouver le modèle bond graph de chaque sous-système, avec leurs liens d'E/S avec les autres sous-systèmes, mise en causalité, vérification des conflits, ..., etc.
- **Étape 3** Faisait déduire le modèle mathématique analytique (Espace d'état, Fonction de transfert) ou graphique (schémas blocs) pour une éventuelle simulation ou comparaison avec des modèles bancs de simulation pour la validation des modèles bond graph en cas de simulation avec des logiciels de simulation par bond graph (comme 20-sim, Symbols 2000, MS1, Dymola, Toolbox de bond graph Simulink / Matlab, ..., etc).

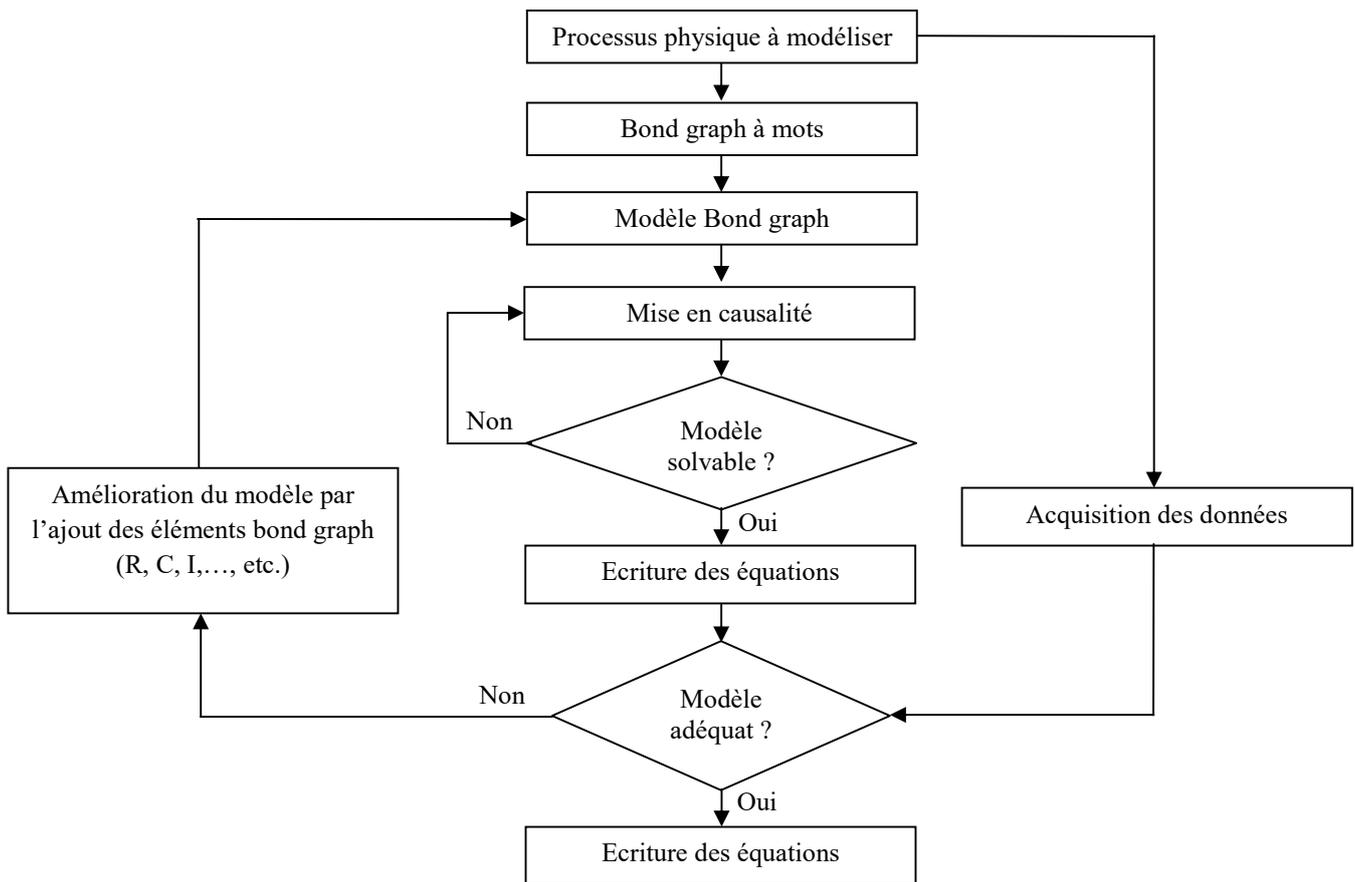


FIGURE 1.4: ETAPES DE MODELISATION PAR BOND GRAPH A MOTS

I.3. Lois de commande issues de modèles bond graph

L'outil bond graph, par ses caractéristiques pour l'analyse des systèmes, est aussi utilisé pour la conception des lois de commande, à travers des nombreuses recherches et travaux de la communauté bond graphiste mondiale. Ses recherches se différencient de natures graphiques, analytiques issues des graphiques ou mixtes, qu'utilisent le caractère graphique et les outils analytiques.

I.3.1. Lois de commande à base de modèles analytiques issus de modèles bond graph

Les premiers travaux des lois de commande issues de modèle bond graph, reposent sur l'utilisation du modèle bond graph pour améliorer les modèles analytiques (fonction de transfert, équation d'espace d'état, schémas blocs), utilisés au suivant pour la conception des lois de commande. On trouve dans l'annexe comment déduire un modèle analytique à partir d'un modèle bond graph.

Parmi ces travaux on trouve le contrôle distribué d'un bras manipulateur, en 1988 [35]. Ensuite on trouve la commande adaptative basée sur modèle issu du modèle bond graph, développée par le Professeur P. J Gawthrop [11].

Bien que les techniques d'intelligence artificielle sont présentes dans l'exploitation des modèles issus du bond graph, pour la commande [36-37] ou la simulation qualitative [38] qu'utilise la logique floue comme Technique de commande [39].

Les modèles bond graph sont utilisés pour la validation des modèles, en comparaison avec les données et les mesures expérimentales [40], avec un modèle d'espace d'état linéaire, comme LQR [41-42], LQG [43], H_∞ [44], prédictive [45] ou non linéaire [46], en commande par mode glissant, contrôle adaptatif pour la commande hybride de backstepping [47], commande de backstepping en mode glissant [48], commande glissante floue [49] et la commande tolérante aux fautes [50-51]. La méthode de synthèse des contrôleurs utilisant l'impédance des éléments à base de bond graph, les équations différentielles ainsi que la fonction de transfert sont présentes dans [52], appliquées sur un pipeline.

La conception des observateurs linéaires à temps variant (LTV) à base de l'outil bond graph est aussi présente dans le travail de [53], bien comme dans la conception d'un filtre de puissance orthogonale [54]. À base du modèle d'état issu du bond graph, et par l'utilisation du logiciel Matlab/Simulink, on trouve la commande de suivi de trajectoire d'un robot mobile avec modèle transformé en modèle plat [55].

Les travaux cités ci-dessus ne sont que des exemples sur mes mains, mais il y en a beaucoup d'autres. L'outil bond graph est utilisé seulement pour la déduction d'un autre modèle (espace d'état, fonction de transfert, équation dynamique, ..., et.) pour concevoir la loi de commande.

1.3.2. Lois de commande issues du modèle bond graph par des manipulations graphiques

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et leur flexibilité, donne aux chercheurs le profit de constipons d'une loi de commande pour les systèmes étudiés. On ne trouve pas beaucoup de méthodes dans cette catégorie, c'est juste quelques noms qui ont laissé leurs empreintes dans la conception d'une loi de commande comme P. Gawthrop, S. Junco, T. J. Yeh et d'autres.

(A) - Backstepping Control :

Cette technique de commande trouve leur conception par la méthode graphique à base de modèle bond graph dans les travaux de T.J Yeh [56-58], à travers l'utilisation des propriétés structurelles pour la conception d'une loi de commande en boucle fermée. Cette commande consiste à introduire des éléments bond graph (I, C, R, 0, 1, Se, Sf, TF et GY) pour construire une commande d'un élément multiport cible (target multiport).

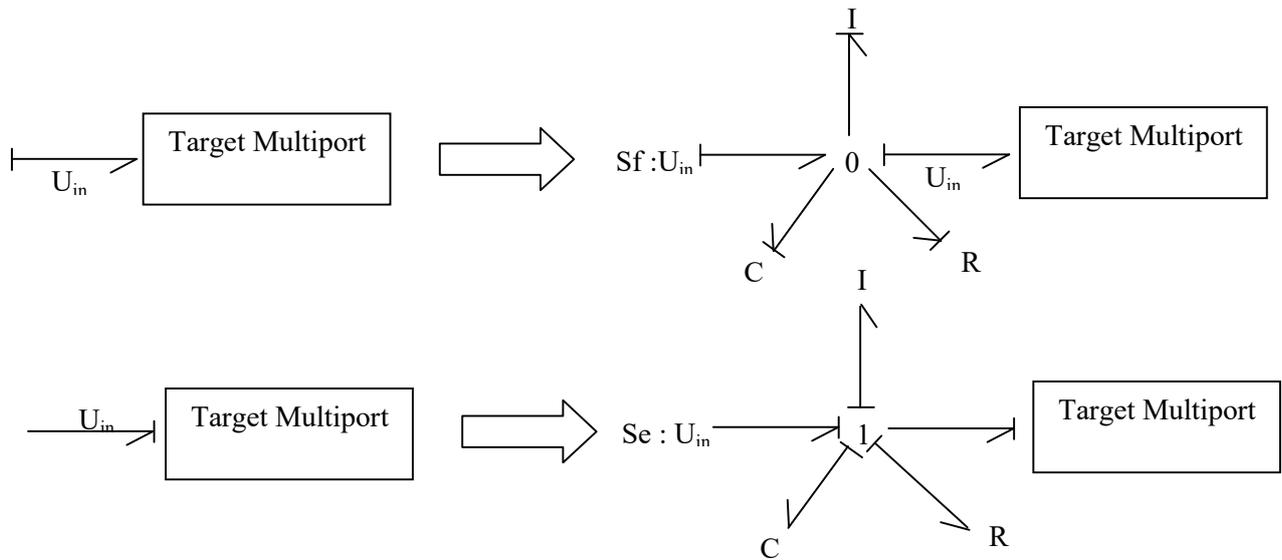


FIGURE 1.5: MULTIPOURT BOND GRAPH CIBLE ET LEUR COMMANDE

Les autres éléments constitutifs du modèle bond graph d'un tel système sont supposés ou regroupés en élément bond graph multiport intermédiaire [57].

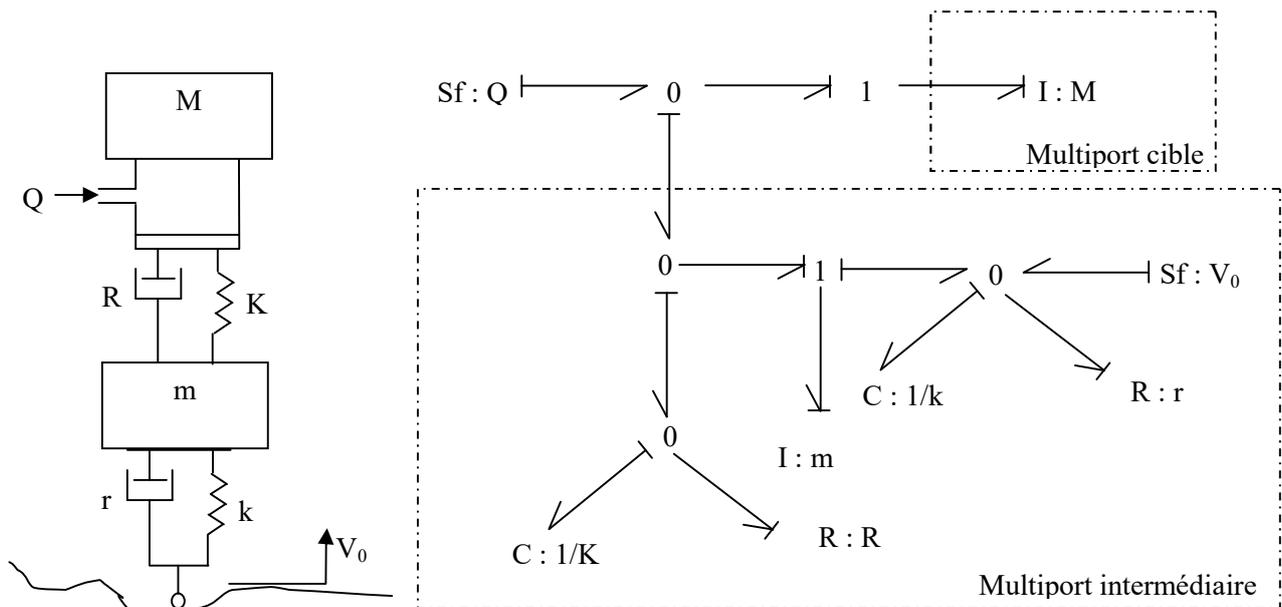


FIGURE 1.6: MULTIPOURT BOND GRAPH INTERMEDIAIRE

Le calcul des nouveaux éléments bond graph ajoutés passe à travers l'ensemble des relations qui définissent la loi de commande backstepping classique [59].

Cette technique de commande a été validée et modifiée par quelques exemples dans les travaux de Yeh [56-58], ainsi par l'application de contrôle d'un bras manipulateur dans la robotique [60].

(B)- Rejet de perturbations et Découplage Entrée/ sortie:

Le rejet des perturbations est l'un des problèmes les plus étudiés en automatique [61]. Les perturbations affectent le comportement dynamique du système, d'où on cherche une commande qui rend les sorties insensibles à ces perturbations. Dans [61] on trouve comment utiliser le bond graph pour la conception de cette loi de commande de rejet de perturbation. Dans ce même livre [61], une étude sur le découplage E/S avec l'outil bond graph. C'est un problème pour les systèmes multi variable auxquels on doit trouver une commande (U_1) pour la sortie (Y_1) qui n'affecte pas les autres sorties, cette méthode est appliquée aux modèles non linéaires, tel que le robot manipulateur à deux axes, comme un système LTV [62].

(C) - Energy shaping et model Matching problem control

La commande par la mise en forme de l'énergie et de la puissance (energy and power shapping) est une méthode utilise les modèles bond graph dans leur conception [26-27]. Elle est appelée aussi commande par balancement de la puissance (PBC : Power Balancing Control) [63]. Elle repose sur la distribution de l'énergie au sein du modèle du système pour leur contrôle en utilisant le principe de bond graph cible, commandé à travers l'ajout virtuel d'un ensemble d'éléments appelés bond graph virtuel. Cette méthode utilisée par [26], emploie aussi la stabilisation par la 2^{ème} méthode de Lyapunov, alors que celle développée par [63] utilise le principe de pacification (ou platitude) des ports hamiltoniens. Dans [29-30], l'Energy Shaping est utilisée pour la tolérante aux fautes passive et active.

On trouve aussi dans [63], une comparaison entre les méthodes graphiques de commande à base de modèle bond graph: Backstepping control, Energy Shapping Control et la commande par correspondance des modèles (Model Matching Control). Cette dernière utilise le concept d'inversion du modèle basé sur la bicausalité des modèles bond graph pour avoir une loi de contrôle du modèle correspondant.

I.3.3. Lois de commande mixtes : Conceptions graphiques et manipulations analytiques

Dans cette catégorie, la loi de commande d'un tel système modélisé par bond graph est calculée à l'aide des propriétés structurelles de bond graph et les méthodes analytiques classiques de conception de lois de commande. Cette loi de commande figure dans le modèle bond graph par des nouveaux éléments bond graph ou des blocs externes dédiés aux lois de commande.

(A) - Contrôle de stabilité et régulation

L'analyse, le contrôle de stabilité et la régulation sont les problèmes les plus étudiés lors de la conception des lois de commande. Les premiers travaux qui concernent ce sujet sont du chercheur Sergio Junco [12]. Leurs travaux traitent l'analyse de la stabilité des systèmes modélisés par bond graph en utilisant la deuxième méthode de Lyapunov, en un point d'équilibre. Cette méthode est utilisée ensuite pour l'injection des amortissements et le rejet des perturbations asymptotique pour le suivi de trajectoire [22], ainsi pour le contrôle de stabilité en boucle fermée [23], et avec le principe de la bicausalité et d'inversion du système, la commande backstepping est conçue [24] pour le suivi du trajectoire, ou pour le redimensionnement et l'actionnement des robot manipulateur à deux axes [64]. Le principe de la bicausalité et d'inversion des modèles bond graph, développé par [13] sont discutés ultérieurement.

(B) - Conception des observateurs et régulateur PID

La conception des observateurs en automatique, est une démarche importante pour l'estimation des variables non mesurables ou difficiles à mesurer, nécessaires pour le contrôle ou le diagnostic. L'outil bond graph offre ce démanche dans [65-66] pour la conception d'un observateur à action proportionnelle et intégrale. Dans [66] on trouve une méthode de calcul des gains de l'observateur, qui permet aussi, en plus de l'estimation, l'atténuation des perturbations, appliqués sur le modèle bond graph d'un réacteur chimique (CSTR).

La bicausalité et inversion du modèle and graph sont utilisées pour la conception d'un régulateur PID, dans [67], mais on peut utiliser les simulateurs des modèles bond graph, comme 20-sim [68] pour la conception de blocs graphiques de contrôle PID, comme dans [69], appliquée pour la régulation de la température dans une chambre.

(C) - Intelligences Artificielles et bond graphs

Comme nous avons vu précédemment dans l'emploi de la logique floue pour la commande des systèmes modélisés par bond graph, on a aussi l'exploitation des réseaux de neurones artificiels pour l'identification des modèles bond graph [70], en utilisant les algorithmes d'adaptation des poids de neurones pour l'estimation des paramètres d'élément bond graph du processus modélisé.

La programmation génétique est utilisée pour la conception des modèles bond graph dans [71]. Elle utilise une procédure ou algorithme pour l'ajout ou le remplacement d'éléments bond graph afin de trouver un modèle bond graph final qui représente le comportement du système étudié, en le comparons avec des expérimentations et des mesures réelles.

(D) - Platitude et contrôle par modèle bond graph

D'après [72], la platitude (Flatness ou Passivity) est de faire un système non linéaire équivalant à un système linéaire par une forme en boucle fermée. Cette théorie est analysée à travers l'outil bond graph moyennant la bicausalité et l'inversion du système [73] ou utilise le bond graph pour la platitude ou la passification d'un système, comme dans [74] pour les valves électrohydrauliques. Ce même principe est utilisé pour la commande en cascade d'un moteur à courant continue série dans [27] et pour le moteur à induction [75], ainsi avec le concept de bicausalité et l'inversion pour le suivi de trajectoire dans les convertisseurs de puissance DC/DC [76].

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en première partie les principaux concepts de modélisation des systèmes physiques par bond graph : ses variables, éléments, ainsi que les étapes de modélisation et l'application de la causalité pour identifier les causes à effets des éléments interconnectés. En deuxième partie, un bref historique sur l'ensemble des travaux dans la littérature qui s'intéressent à la conception des lois de commande à partir d'un modèle bond graph, classés en trois catégories.

Le chapitre suivant sera consacré aux concepts d'analyse des modèles bond graph (graphiques et structurels), notamment ceux utilisés dans cette thèse comme moyen de conception de la loi de commande.

CHAPITRE II :
OUTILS D'ANALYSE PAR BOND
GRAPH

Chapitre II : Outils d'analyse par bond graph

II.1. Introduction

Après un bref rappel sur l'outil bond graph pour la modélisation des systèmes physiques, ce chapitre est consacré aux propriétés structurelles des modèles bond graphs, nécessaires pour la conception des lois de commande, d'observateurs ou pour la conception d'algorithmes de surveillance et de diagnostic. Ces propriétés sont développées par la communauté internationale qui s'intéresse à l'outil bond graph, dès leur invention. On peut rappeler celles qui sont utilisées dans le sujet de cette thèse.

II.2. Chemins causaux, boucles causales, et gains causaux

II.2.1. Chemins causaux

Un chemin causal est une alternance de liens et d'éléments bond graph de base [5], appelés « nœuds », en causalité complète et correcte. On distingue plusieurs types de chemin causal :

- Chemin causal simple: en suivant toujours une même variable : soit l'effort soit flux

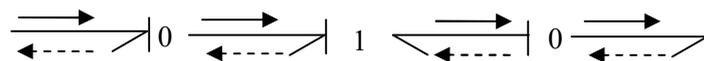


FIGURE 2.1: CHEMINS CAUSAUX SIMPLES

- Chemin causale mixte : la variable parcourue est changée lors du passage à l'un des éléments R, C ou I, ou par le passage à un Gyrateur "GY" [5]

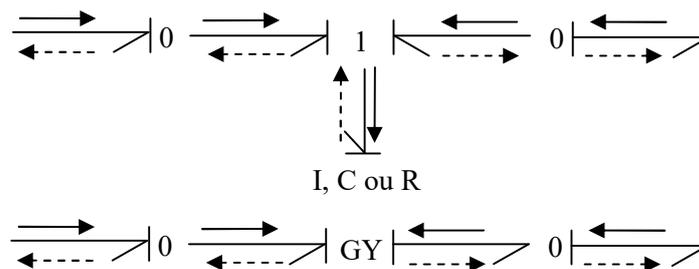


FIGURE 2.2: CHEMINS CAUSAUX MIXTES

- Chaîne d'action : qui est un chemin causal entre une source (Se ou Sf) comme entrée et une sortie sur une jonction (0 ou 1) représentée par un détecteur (De ou Df). Elle est appelée aussi chemin entrée/sortie [5].

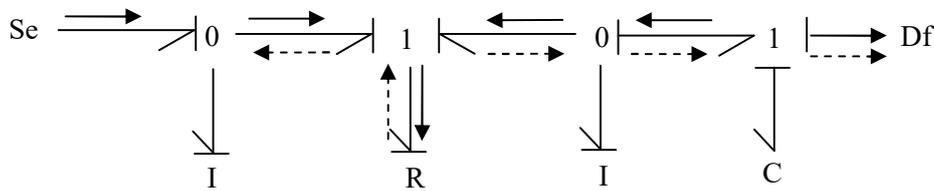


FIGURE 2.3: CHAÎNE D’ACTION E/S

II.2.2. Boucles causales

Une boucle causale est un chemin causal fermé entre deux éléments du type R, C ou I, sans lien parcouru en suivant la même variable plus d'une fois [5].

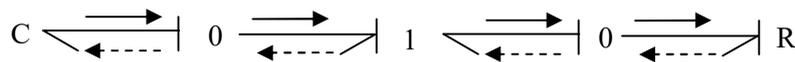


FIGURE 2.4: BOUCLE CAUSALE

II.2.3. Gains causaux

Le gain causal d'un chemin causal ou de boude causale se définit comme la fonction liant la variable d'entrée à la variable de sortie des extrémités du chemin [5].

Les notions du chemin causal, gain causal et boucle causale sont utiles pour le passage du modèle bond graph aux modèles fonctions et matrices de transfert dans le cas où le modèle est linéaire [5], par contre on peut passer d'une façon plus facile au modèle d'espace d'état ou schéma bloc en suivant quelques procédures et conditions, dans le cas linéaire ou non linéaire [5].

II.3. Analyse des propriétés structurelles par bond graph:

L'analyse du modèle d'un processus est une étape nécessaire pour la conception d'une loi de commande, et/ou l'estimation de leurs variables (état et/ou sortie) ou aussi pour la conception des algorithmes de supervision. Parmi les caractéristiques à étudier, on distingue, la commandabilité l'observabilité, le rang structurel, la stabilité, la sensibilité, ... etc. Le caractère graphique l'outil bond graph assure l'étude de ces caractéristiques, moyennant certaines procédures [5][61].

II.3.1. Rang Structurel de la matrice d'état

Le rang de la matrice d'état associée au modèle bond graph permet de déterminer leur nombre de valeurs propres structurellement nulles. Il est calculé par la différence entre le nombre d'éléments I et C en causalité intégrale préférentielle et le nombre de ces éléments (I et C) restants en causalité intégrale lorsqu'on admet une causalité dérivée au modèle bond graph [5][61].

Exemple : Soit le modèle bond graph du circuit électrique (RLC) suivant :

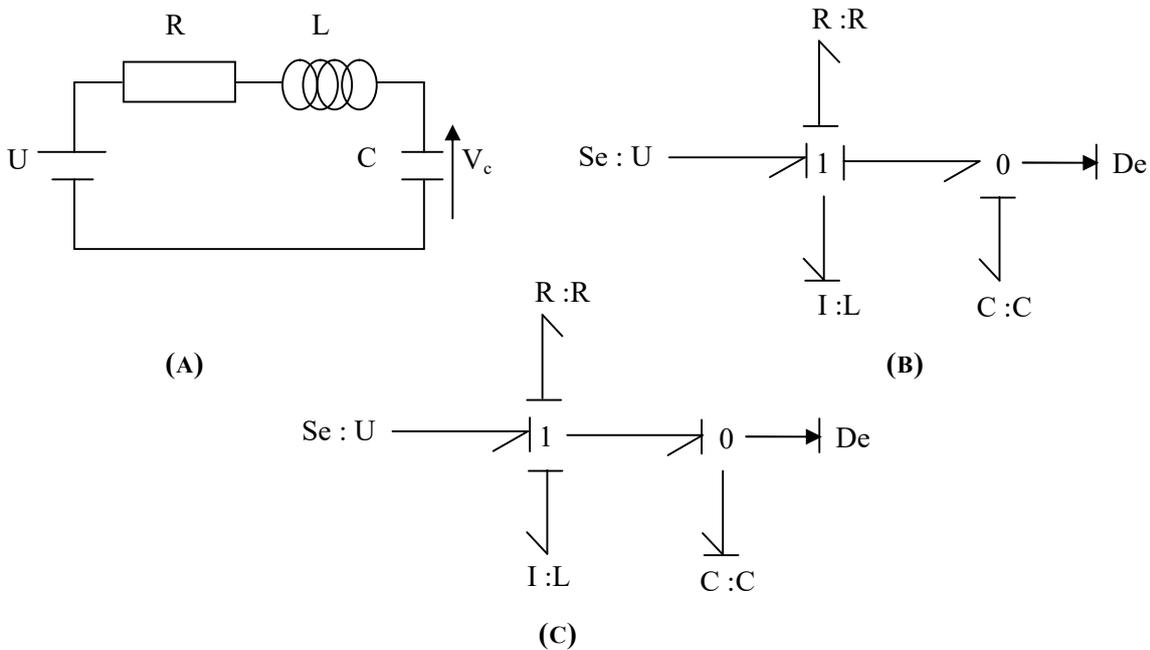


FIGURE 2.5: (A) CIRCUIT ELECTRIQUE (B) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE INTEGRALE (C) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE DERIVEE

Le rang structurel de ce modèle est :

$$\begin{aligned}
 q &= n_I - k_d \\
 q &= 2 - 0 = 2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Avec

- n_I : nombre des éléments I et C, en causalité intégrale lorsqu'on admet une causalité intégrale préférentielle ;
- k_d : nombre des éléments I et C, restant en causalité intégrale lorsqu'on admet une causalité dérivée préférentielle.

I.3.2. Commandabilité structurelle par bond graph

L'étude de la commandabilité est nécessaire pour le calcul d'une loi de commande. Cette propriété est peut-être testée sur les modèles bond graph à travers les conditions suivantes [61] :

Théorème : un système modélisé par bond graph est structurellement commandable si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Il existe un chemin causal liant chaque source à chaque élément dynamique I et C en causalité intégrale préférentielle ;
- Tous les éléments I et C, admettent une causalité dérivée quand la causalité dérivée est appliquée. Si des éléments I et C, restent en causalité intégrale, la dualisation des sources les remet en causalité dérivée. La dualisation des sources est l'opération d'inversion de la causalité de ses sources ($Se \Rightarrow \tilde{Sf}$; $Sf \Rightarrow \tilde{S\tilde{e}}$).

Exemple [61]: Soit le modèle bond graph suivant :

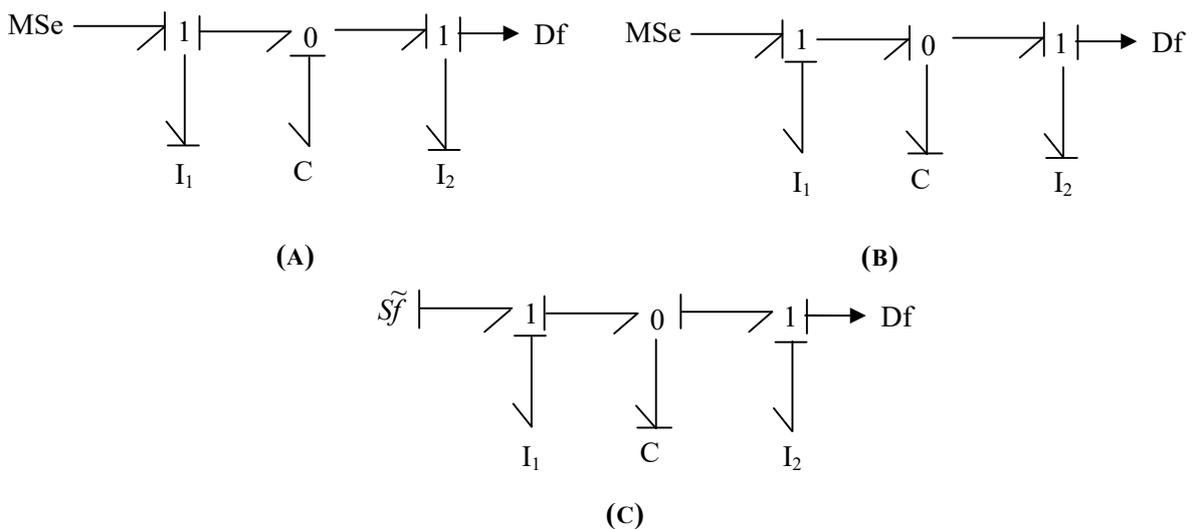


FIGURE 2.6: VERIFICATION DE LA COMMANDABILITE PAR BOND GRAPH (A) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE INTEGRALE (B) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE DERIVEE (C) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE DERIVEE AVEC SOURCE DUALISEE

II.3.2. Observabilité structurelle par bond graph

Dans la conception des observateurs des systèmes, on y a besoin de vérifier si ce que notre modèle est observable ou non. L'outil bond graph offre la possibilité de vérifier cette propriété, à l'aide du théorème suivant [61]:

Théorème: un système modélisé par bond graph est structurellement observable si les conditions suivantes sont satisfaisantes :

- Il existe un chemin causal entre tous éléments I et C en causalité intégrale et les détecteurs D_e ou D_f ;
- Tous les éléments I et C en causalité intégrale admettent une causalité dérivée lorsqu'on met le modèle bond graph à la causalité dérivée préférentielle. S'il y a des éléments restant en causalité intégrale, la dualisation des sources les remet en causalité dérivée. La dualisation des détecteurs est l'opération d'inversion de la causalité de ses détecteurs ($D_e \Rightarrow D\tilde{f}$; $D_f \Rightarrow D\tilde{e}$).

Exemple [61]: Soit le modèle bond graph suivant :

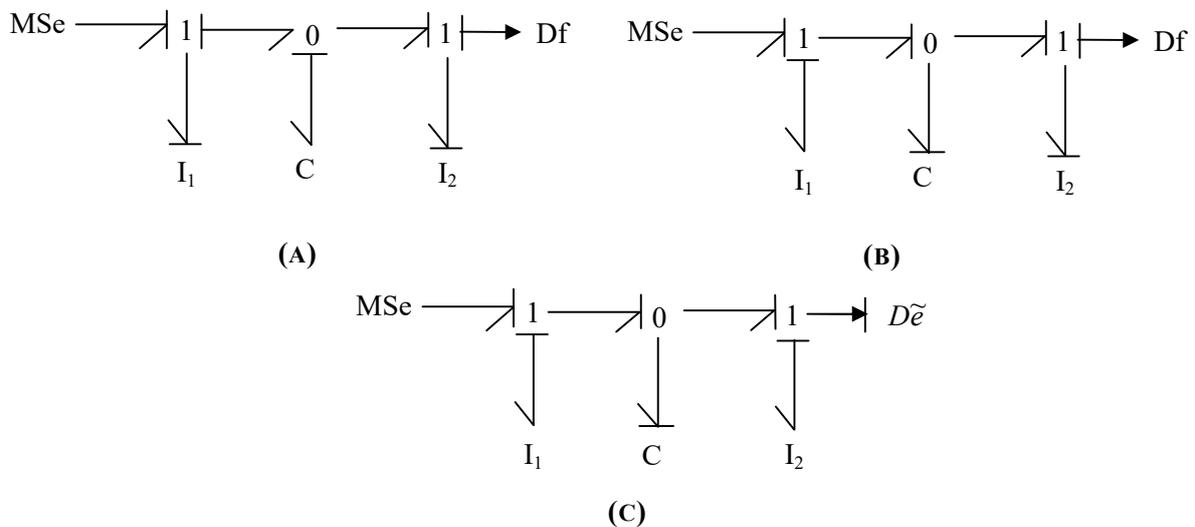


FIGURE 2.7: VERIFICATION DE L'OBSERVABILITE PAR BOND GRAPH (A) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE INTEGRALE (B) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE DERIVEE (C) MODELE BOND GRAPH EN CAUSALITE DERIVEE AVEC DETECTEUR DUALISE

II.4. La Bicausalité en bond graph

II.4.1. Définition

La bicausalité en bond graph, introduite par P. Gawthrop en 1995 [13] permet de donner d'autres outils d'analyse des modèles bond graph, comme l'estimation des paramètres, d'état, et l'inversion des modèles ou d'autres. Elle consiste à diviser le trait causal de la causalité pour connaître le sens ou la source des variables de puissance (l'effort et le flux) est connue:

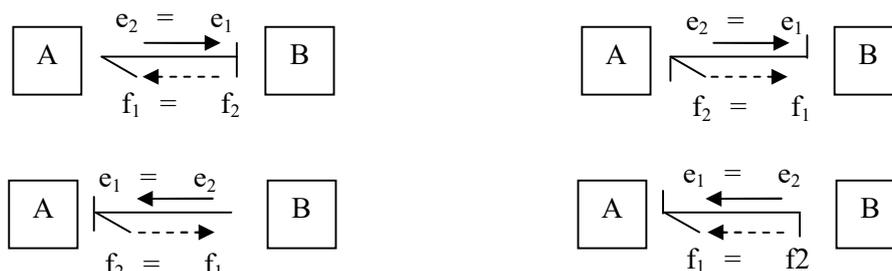


FIGURE 2.7: LA BICAUSALITE EN BOND GRAPH

Remarque : comme dans la causalité, la bicausalité en Bond graph est totalement indépendante au sens du transfert de la puissance représentée par le lien bond graph.

Une autre représentation de la bicausalité est proposée par S. Junco [24], consiste à utiliser deux traits causaux adjacents sur le côté du lien bond graph qui indique la source des variables de puissance (l'effort et le flux).

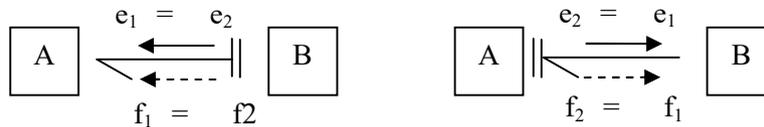


FIGURE 2.8: LA BICAUSALITE EN BOND GRAPH : VERSION II

II.4.2. Propriétés et répercussion de la bicausalité

Le concept de la bicausalité en modèle bond graph a offert plusieurs propriétés, développées par Gawthrop [13], et exploitées par d'autres chercheurs pour l'estimation d'état, l'estimation des paramètres [6], la conception des lois de commande à travers l'inversion des modèles [22-24][33-34], ou pour l'analyse des défaillances [77-78], la sensibilité [79], et au dimensionnement des systèmes [80-82].

Le concept de la bicausalité modifie la nature de quelques éléments bond graph comme les sources et les détecteurs par l'ajout des nouveaux éléments appelés en anglais source-sensor (SS elements) [6][10].

Affectation causale	Nature de l'élément SS
SS	Source d'effort/ Détecteur de flux (élément Se)
SS	Source de flux / Détecteur d'effort (élément Sf)
f = 0 SS	Détecteur d'effort (De)
e = 0 SS	Détecteur de flux (Df)
SS	Source d'effort/ Source de flux
SS	Détecteur d'effort/ Détecteur de flux

TABLE 2.1: LA BICAUSALITE DES SOURCES ET DES DETECTEURS

La répercussion de la bicausalité sur les éléments bond graph, les jonctions et les éléments de transformation est donnée comme suit [10][13][81][83] :

Eléments bond graph	Représentation bicausale	Relation	Emploi ou utilisation
Elément R		$R = \frac{e}{f}$	Estimation paramétrique, identification
Elément C		$C = \frac{\int f \cdot dt}{e} = \frac{q}{e}$	
Elément I		$I = \frac{\int e \cdot dt}{f} = \frac{p}{f}$	
Jonction "0"		$e_2 = e_1$ $e_3 = e_1$ $f_3 = f_1 - f_2$	Propagation de la bicausalité (bicausalité traversant)
Jonction "1"		$f_2 = f_1$ $f_3 = f_1$ $e_3 = e_1 - e_2$	
Transformateur "TF"		$\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_2 = m \cdot f_1 \end{cases}$	
		$\begin{cases} e_1 = m \cdot e_2 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$	
Gyrateur "GY"		$\begin{cases} e_2 = r \cdot f_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} e_1 \end{cases}$	
		$\begin{cases} e_1 = r \cdot f_2 \\ f_1 = \frac{1}{r} e_2 \end{cases}$	

TABLE 2.2: REPERCUSSION DE LA BICAUSALITE SUR LES ELEMENTS BOND GRAPH

II.5. Inversion des modèles bond graph

L'inversion des systèmes, décrit par leurs modèles d'état linéaires, est une méthode intéressante pour la conception des lois de commande : on cherche l'entrée du système qui produise sa sortie connue ou désirée [13].

L'outil bond graph, par l'apport de la notion de bicausalité [13], permet l'étude de l'inversion de ses modèles, en répercutant la bicausalité le long du chemin causal d'entrée / sortie du modèle. Cette notion a permis la conception des lois de commande comme le contrôle par backstepping dans [22][24][33-34] et aussi pour l'étude de la sensibilité et leur analyse [79], et aussi pour le dimensionnement des systèmes [80-81], l'analyse structurelle des modèles [6][10] et la tolérance aux fautes [84].

Un modèle bond graph, sujet d'une inversion, doit vérifier certains critères, hypothèses et conditions pour l'inverser [80-81][84], notamment que soit un modèle carré et invariant dans le temps (LTI).

Parmi les applications de l'inversion des modèles bond graph, on trouve le calcul du degré relatif relié au chemin E/S inverse d'un modèle bond graph. Cette propriété est utilisée pour définir le degré de dérivation de l'équation de la dynamique d'erreur [23-24][32], lors de la conception de la loi de commande (chapitre III).

Le degré relatif d'une fonction de transfert est défini comme la différence entre le nombre de ses pôles et le nombre ses zéros. En bond graph inverse, le degré relatif d'un chemin causal inverse S/E est trouvé par le nombre des éléments dynamiques bond graph (I et C) en causalité intégrale moins le nombre de ces éléments dynamiques restants en causalité intégrale, lors d'une inversion bicausale du chemin E/S [10].

II.6. Incertitude en bond graph

II.6.1. Définition

L'étude de l'incertitude dans la modélisation et le mesure des processus est une étape primordiale pour la conception des algorithmes robustes de la commande, de la surveillance et aussi de l'identification et la simulation. D'où la nécessité de l'intégration de cette étude dans la modélisation par bond graph.

Parmi les premiers travaux qui traitent l'incertitude dans les éléments bond graph, on trouve les travaux de C. S. Kam [85], qui sert à déterminer le modèle standard d'interconnexion, qui est une décomposition du modèle d'état nominal et incertain (Fig. 2.9) :

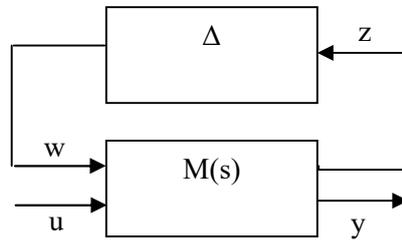


FIGURE 2.9: MODELE STANDARD D'INTERCONNEXION

On trouve aussi les travaux de W. Borutzky [86] qui traitent le bond graph incrémental pour l'étude de la sensibilité des modèles en éléments mono ports et multiports.

II.6.2. Bond graph incrémental

Le bond graph incrémental est un outil utile pour déterminer les variations absolues au premier ordre des éléments bond graph [84]. Il est introduit par le chercheur W. Borutzky [86] pour modéliser les petites perturbations dans les valeurs de l'effort et le flux (Δe et Δf), afin d'avoir calculé la fonction de sensibilité, et cela dans les modèles bond graph mono-énergie, puis développée en multi-énergie [6][87].

Un modèle bond graph incrémental est construit par le remplacement des éléments originaux par leurs modèles incrémentaux, qui modélisent les variations Δe et Δf des variables de puissances, e et f .

Exemple : Considérons un élément bond graph "R", mono-port et linéaire sujet à une variation de leur paramètre ΔR , qui cause des perturbations aux valeurs de puissance ($e_R + \Delta e_R$) et ($f_R + \Delta f_R$), de la façon suivante :

$$e_R(t) = R \cdot f_R(t) \Rightarrow (e_R + \Delta e_R)(t) = (R + \Delta R) \cdot (f_R + \Delta f_R)(t) \tag{2.1}$$

Si on néglige l'ordre supérieur de variation $\Delta R \cdot \Delta f_R$, on trouve la relation suivante :

$$\Delta e_R(t) = R \cdot \Delta f_R + \Delta R \cdot f_R(t) \tag{2.2}$$

On peut modéliser en bond graph cette dernière relation comme suit :

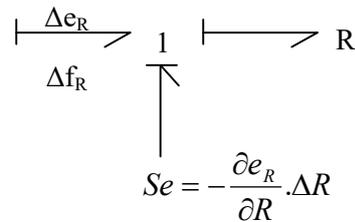


FIGURE 2.10: BOND GRAPH INCREMENTAL DE L'ELEMENT "R"

La même procédure peut être appliquée pour les autres éléments passifs 'C' et 'I', et les éléments de transformation 'TF' et 'GY', pour avoir leurs modèles incrémentaux. Le bond graph incrémental est utile pour l'obtention du modèle d'état de la forme canonique en présence de petites variations du premier ordre et d'incertitudes additives.

II.6.3. Bond graph incertain

L'objectif de l'étude d'incertitude sur les paramètres d'un tel système est de mesurer leur impact dans le comportement du modèle, afin de valider ce modèle dans leur représentation du système étudié. L'outil bond graph, à travers les recherches de leur communauté internationale, permet de modéliser les incertitudes aux éléments passifs et de transformation en mono-énergie [10] [85] [87-88], et multi-énergie [89]. Leur présentation en modèle bond graph dépend du modèle de fin à déterminer. On distingue :

→ **Modèle canonique** : qui permet de représenter les incertitudes des types additifs (absolus), en modèle d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_n + \Delta A).x(t) + (B_n + \Delta B).u(t) \\ y(t) = (C_n + \Delta C).x(t) + (D_n + \Delta D).u(t) \end{cases}$$

Avec $(.)_n$, est la valeur nominal, $\Delta(.)$, est la valeur incertaine des matrices d'état.

La représentation en bond graph des éléments incertains est donnée via l'ajout d'un élément passif ou de transformation de même type à l'élément qui représente la valeur nominale, mais avec une causalité convenable [85] [87] (**Fig. 2.11**):

$$e_R(t) = (R_n + \Delta R).f_R(t) \tag{2.3}$$

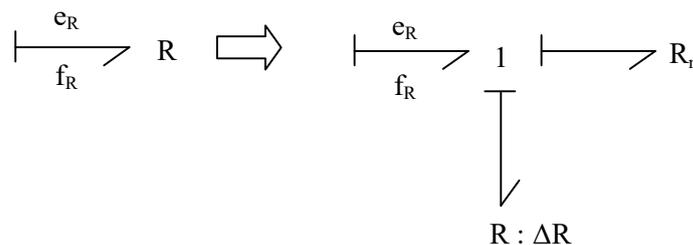


FIGURE 2.11: BOND GRAPH INCERTAIN DE L'ELEMENT "R" EN FORME CANONIQUE

→ **Modèle standard d'interconnexion** : qui est une transformation linéaire fractionnaire (LFT : Linear Fractional Transformation), permettant l'extraction des incertitudes du processus étudié, afin de leur optimiser, ou limiter leur impact par la synthèse d'une loi de commande dite robuste. Ce modèle est adapté aux deux types d'incertitude, structurée et non structurée, ainsi que pour les systèmes en boucle fermée [84].

Dans [85], on trouve la méthodologie pour la détermination du modèle standard d'interconnexion en vue d'une transformation LFT (**Fig. 2.9**), qui consiste à l'obtention de la matrice d'incertitude (Δ), à partir du modèle bond graph, pour les éléments subissent à des incertitudes. Cette méthode est donnée comme suit :

Soit un élément bond graph "R", en causalité type résistance, sujet d'une incertitude additive ΔR , avec $R = R_n + \Delta R$. Pour l'obtention du modèle standard, on reformule la relation de l'effort pour l'erreur soit du type multiplicative comme suit :

$$\begin{aligned}
 e_R(t) &= (R_n + \Delta R)f_R(t) \\
 &= R_n \cdot f(t) + \Delta R \cdot f(t) \\
 &= R_n \cdot f(t) + \delta_R \cdot R_n \cdot f(t), \text{ avec } \delta_R = \frac{\Delta R}{R_n} \\
 &= (1 + \delta_R) \cdot R_n \cdot f(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Cette dernière formule est représentée en bond graph, par la figure suivante :

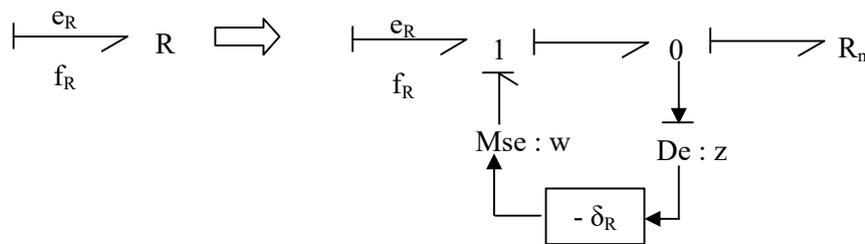


FIGURE 2.12: MODELE LFT D'UN ELEMENT BOND GRAPH INCERTAIN "R"

Par l'application de cette méthode sur les autres éléments incertains, on peut obtenir le modèle d'état suivant, qui représente le modèle standard d'interconnexion type :

$$\begin{cases}
 \dot{x}(t) = A_n \cdot x(t) + B_1 \cdot w(t) + B_2 \cdot u(t) \\
 z(t) = C_1 \cdot x(t) + D_{11} \cdot w(t) + D_{12} \cdot u(t) \\
 y(t) = C_2 \cdot x(t) + D_{21} \cdot w(t) + D_{22} \cdot u(t)
 \end{cases}
 \tag{2.5}$$

Avec : $x(t)$ est le vecteur d'état ;

$u(t)$ est le vecteur d'entrée ;

$w(t)$ est le vecteur d'entrée auxiliaire ;

$y(t)$ est le vecteur de sortie ;

$z(t)$ est le vecteur de sortie auxiliaire, sachant que $w = \Delta.z$;

$\Delta = \text{diag} (\delta_i)$ et δ_i est le $i^{\text{ème}}$ paramètre d'incertitude.

II.7. Conclusion

L'outil bond graph, par son caractère graphique et algébrique a permis d'être une méthodologie puissante pour l'analyse des modèles de système. Nous avons vu dans ce chapitre l'essentiel des propriétés et méthodes d'analyse des modèles bond graph, comme la commandabilité, l'observabilité, le rang structurel, la bicausalité qui permet l'inversion des modèles, ainsi la modélisation des incertitudes des paramètres de modèles avec ses différents types et aspects (incrémentale et incertaine, avec forme canonique ou LFT).

Les concepts de ce chapitre sont les fondements pour la synthèse d'une loi de commande à base du modèle bond graph, notamment les propriétés des chemins causaux E/S et l'inversion du modèle pour une commande de suivi de trajectoire en absence ou en présence d'incertitude, sujet du chapitre prochain.

CHAPITRE III :
COMMANDE DE SUIVI DE
TRAJECTOIRE PAR BOND GRAPH

Chapitre III : Commande de suivi de trajectoire par bond graph

III.1. Introduction

La modélisation des systèmes physiques est une étape importante pour leur simulation, dimensionnement, diagnostic, régulation et contrôle, ... etc. L'asservissement d'un tel système consiste à maîtriser leurs sorties face aux différents signaux de perturbations et les contraintes de surcharges ou autres, alors on y a besoin de résoudre certains problèmes liés à plusieurs caractéristiques physiques des systèmes, tels que : les non-linéarités des systèmes (modèles), les systèmes à grand échelle, ... etc., pour leurs régulations à des consignes fixes ou suivre des consignes variables pour le cas de suivi de trajectoire.

Ce chapitre est consacré à étudier et élaborer une loi de commande de suivi de trajectoire en utilisant l'outil bond graph et ses concepts d'analyse structurelle. Le modèle bond graph en premier lieu sera un modèle linéaire simple, en suivant une procédure de suivi asymptotique de trajectoire (SAT), développée à l'aide des travaux de S. Junco [24][38], puis on prend en considération une incertitude sur un élément bond graph, du type LFT et refait notre procédure SAT pour valider cette technique en présence d'incertitude.

III.2. Suivi de trajectoire par l'approche bond graph

Le suivi de trajectoire est l'un des objectifs étudiés pour l'asservissement des systèmes. Il consiste à concevoir un contrôleur suiveur qui permet aux signaux de sortie, de se suivre les signaux consignes de l'exploitant du système.

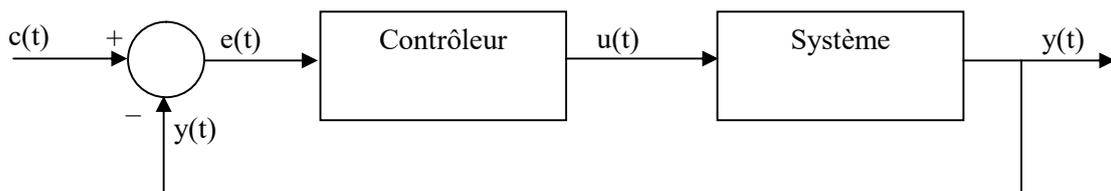


FIGURE 3.1: SCHEMA GLOBAL D'UN CONTROLEUR SUIVEUR DE TRAJECTOIRE

L'objectif d'un contrôleur suiveur de trajectoire est de ramener l'erreur entre la sortie $y(t)$ et la consigne ou la sortie désirée $c(t)$, à zéro (ou tend asymptotiquement vers zéro) lorsque le temps tend vers l'infini.

Dans cette section, on développe la stratégie de commande, proposée par S. Junco [24] [32], pour la synthèse d'une loi de commande backstepping, appliquée dans les références sus considérées, sur une machine à courant continu.

III.2.1. Procédure de conception d'un suiveur asymptotique de trajectoire :

La conception d'un contrôleur suiveur asymptotique de trajectoire passe généralement par (05) étapes essentielles [32] :

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

Cette étape consiste à appliquer la bicausalité le long du chemin causal E/S pour trouver le modèle bond graph inverse du système ;

→ **Etape 2 : Dédution de l'équation inverse :**

L'inversion bicausale conduite à déduire l'équation dynamique inverse, du chemin E/S, calculée à partir de la relation constitutive des jonctions et ses éléments en connexion ;

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit dans cette étape, une erreur $e(t)$, entre la sortie réelle $y(t)$ et une sortie désirée $y^*(t)$:

$$e(t) = y^*(t) - y(t) \tag{3.1}$$

On doit substituer la sortie de l'équation de l'erreur (3.1), comme suit :

$$y(t) = y^*(t) - e(t) \tag{3.2}$$

dans l'équation dynamique inverse du système ;

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

On propose dans cette étape, la dynamique de l'erreur, qui est une relation entre l'erreur et ses dérivées, en proportion avec le degré relatif du système « r » :

$$e^r(t) = -k_1 e^{r-1}(t) - k_2 e^{r-2}(t) - \dots - k_r e(t) \tag{3.3}$$

Cette relation (3.3) est remplacée de nouveau dans l'équation dynamique inverse du système ;

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

La dernière étape dans cette procédure, concerne la substitution de l'erreur de l'équation dynamique inverse, donc remplacer l'erreur par sa relation de définition (3.1), qui nous permet de trouver la commande ou l'entrée de commande qui force la sortie $y(t)$, à suivre la sortie désirée $y^*(t)$.

III.2.2. Application

La procédure précédente est appliquée sur un système mécanique simple d'une masse liée par un amortisseur et un ressort, qui était le sujet de publications internationales, dans une conférence internationale [33], puis dans une revue internationale [34], montre l'efficacité de cette procédure dans la conception d'une loi de commande de suivi de trajectoire.

Notre système mécanique est décrit dans la figure suivante, avec leur modèle bond graph (Fig. 3.2) :

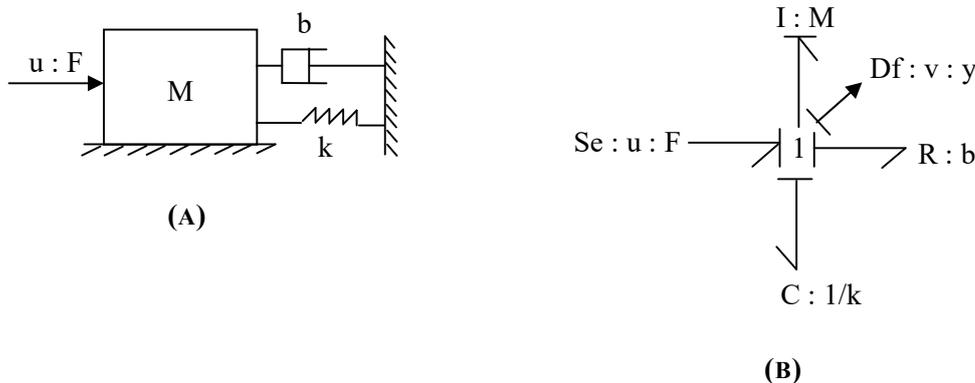


FIGURE 3.2: (A) SYSTEME PHYSIQUE (B) SON MODELE BOND GRAPH

Dans la conception de la loi de commande, on désire à trouver l'entrée, $u^*(t)$ pour que la sortie, $y(t)$ qui serait la vitesse de déplacement du système, suit la vitesse désirée $y^*(t)$. Cependant, on applique la procédure décrite précédemment sur le modèle bond graph, décrit par la figure précédente (Fig. 3.2), qui nous donne les résultats suivants :

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

L'inversion bicausale E/S de notre modèle, conduise au modèle bond graph inverse suivant (Fig. 3.3) :

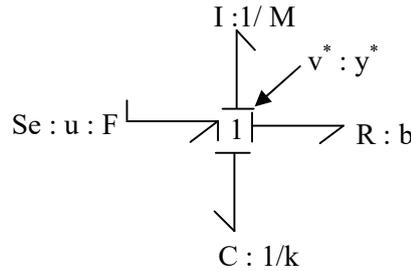


FIGURE 3.3: MODELE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Déduction de l'équation inverse :**

On déduit l'équation inverse à partir de la relation constitutive de jonction « 1 » du modèle bond graph inverse (Fig. 3.3) :

$$u = b.v + M.\frac{dv}{dt} + \frac{1}{C} \int v.dt \tag{3.4}$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur entre la sortie réelle $v(t)$ et la sortie désirée $v^*(t)$ comme suit :

$$e(t) = v^*(t) - v(t) \tag{3.5}$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$v(t) = v^*(t) - e(t) \tag{3.6}$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (3.4), on trouve la relation suivante :

$$u = b.(v^*(t) - e(t)) + M.(\dot{v}^*(t) - \dot{e}(t)) + \frac{1}{C} \int (v^*(t) - e(t)).dt \tag{3.7}$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

On choisit la dynamique de l'erreur de sortie selon la relation (3.3), avec un degré relatif ($r = 1$), qui nous donne la relation suivante :

$$\dot{e}(t) = -k_v e(t), \text{ avec } k_v > 0 \tag{3.8}$$

Puis on le remplace dans la relation (3.7) :

$$u = b.(v^*(t) - e(t)) + M.(v^*(t) + k_v e(t)) + \frac{1}{C} \int (v^*(t) - e(t)) dt \tag{3.9}$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On remplace dans la relation (3.9), la relation de l'erreur initiale (3.5), qui nous donne la loi finale de la commande, $u^*(t)$:

$$u^*(t) = (b - M.k_v).v(t) + \frac{1}{C} \int v(t).dt + M.v^*(t) + M.k_v v^*(t) \tag{3.10}$$

Avec un choix convenable du paramètre de gain de la commande k_v .

III.2.3. Simulation

La simulation de la loi de commande obtenue est faite par le logiciel dédié à la simulation des modèles bond graph : le 20-Sim [68], développé et commercialisé par l'université de Twente aux Pays-Bas (Netherlands). À travers ses boîtes à outils "bond graph", on peut simuler notre modèle bond graph (**Fig. 3.2.B**), et avec les autres boîtes à outils disponibles, on peut construire notre loi de commande, en changeant la source d'effort (Se) qui modélise la force d'entrée par une source d'effort modulée (MSe), contrôlée par la loi de commande de la relation (3.10).

Les paramètres des éléments bond graph (R, C et I) du modèle sont choisis normalisés (= 1), ainsi qu'on choisit un signal de référence ou consigne du type rectangulaire (**Fig. 3.4**).

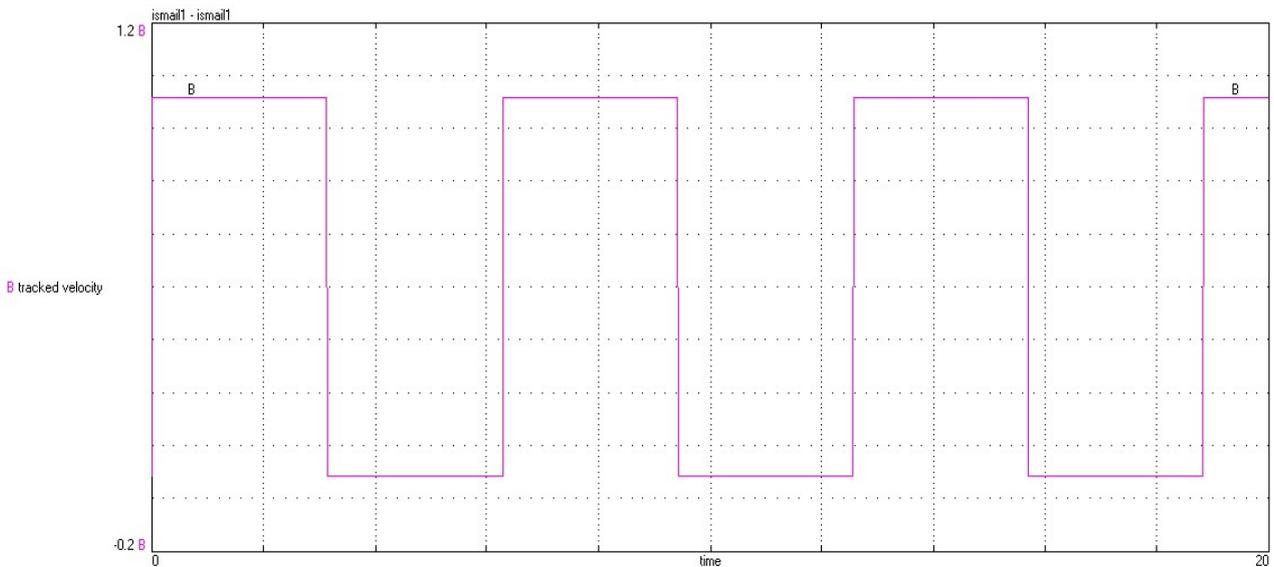


FIGURE 3.4: SIGNAL DE REFERENCE

Il nous reste le choix des paramètres de la commande (k_v), choisi arbitrairement de façon à adapter le signal de sortie pour que suivre le signal de référence. Pour cela, on trouve la valeur ($k_v = 200$), ce qui permet de tracer le résultat suivant (Fig. 3.5) :

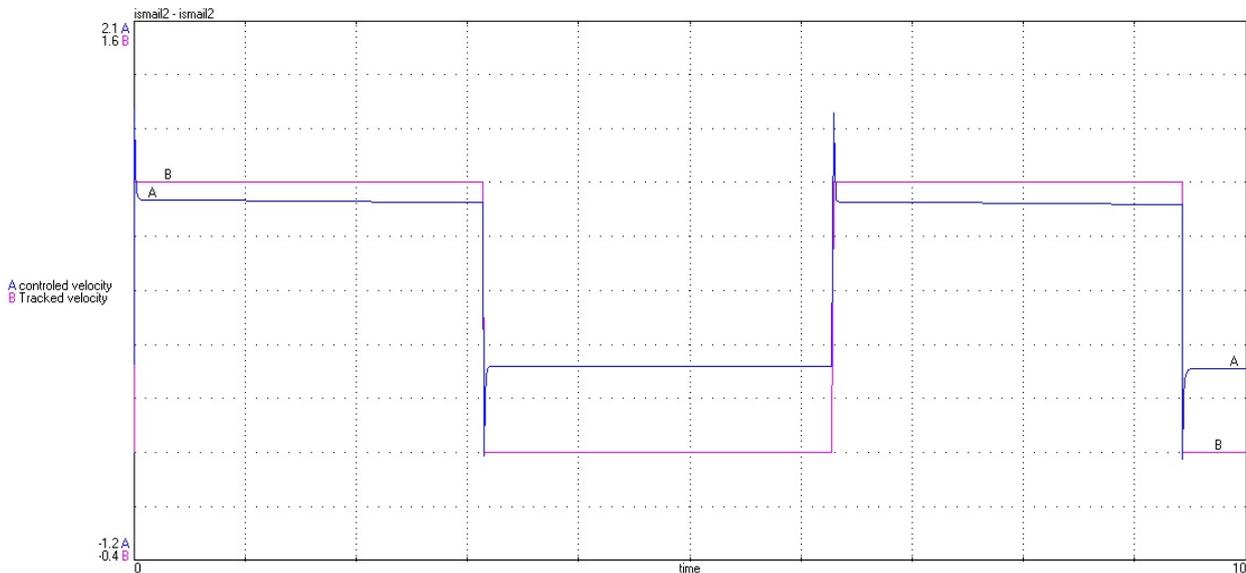


FIGURE 3.5: SIGNAL DE SORTIE

De la figure précédente (FIGURE 3.5), on constate que la sortie du système suit régulièrement la référence, d'où l'efficacité de cette technique dans la résolution de tels problèmes, quoique ce système soit simple, mais on a vu dans l'application sur un moteur DC dans [24][32], que c'est une méthode robuste aussi au problème du rejet de perturbations, et montre leur aspect de linéarisation.

III.3. Suivi de trajectoire par l'approche bond graph d'un modèle incertain

Dans cette partie, on applique la procédure de conception d'une loi de commande de suivi de trajectoire asymptotique sur un modèle bond graph incertain, du type LFT, qui a été sujet d'une publication internationale [34]. Notre objectif est de valider l'efficacité de cette méthode en présence d'erreur d'incertitude de modélisation dans les éléments bond graph.

III.3.1 Modèle bond graph incertain

Notre modèle bond graph incertain est construit en utilisant le modèle standard d'interconnexion ou LFT, pour une erreur d'incertitude du type multiplicatif à l'entrée [31], sur l'élément de masse (I : M) à notre modèle bond graph (Fig. 3.2). L'élément 'I : M', est en causalité intégrale, s'il subit une erreur de modélisation ' ΔI ', la loi caractéristique de cet élément est donnée comme suit :

$$f = \frac{1}{I} \int e.dt, \text{ avec } I = I_n + \Delta I \tag{3.11}$$

Cette loi peut être écrite par la forme suivante :

$$f = \frac{1}{I_n} (1 + \delta_I) \int e.dt, \text{ avec } \delta_I = -\frac{\Delta I}{I_n + \Delta I} \tag{3.12}$$

“ I_n ” est la valeur nominale de l’élément “I”

On peut représenter cet élément bond graph par leur modèle standard, comme suit :

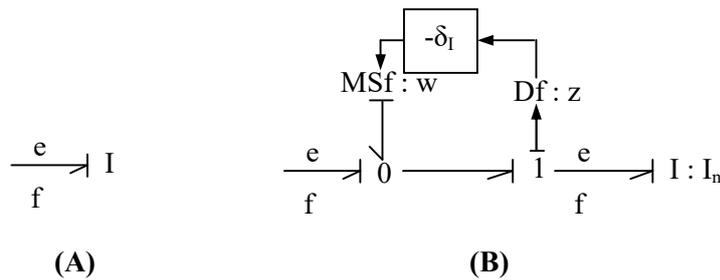


FIGURE 3.6: ELEMENT BOND GRAPH “I” (A) REPRESENTATION NOMINALE (B) REPRESENTATION EN MODELE STANDARD DE L’INCERTITUDE

L’application de ce modèle LFT sur notre modèle bond graph (Fig. 3.2), nous a conduit à notre nouveau modèle bond graph avec incertitude suivante (Fig. 3.7) :

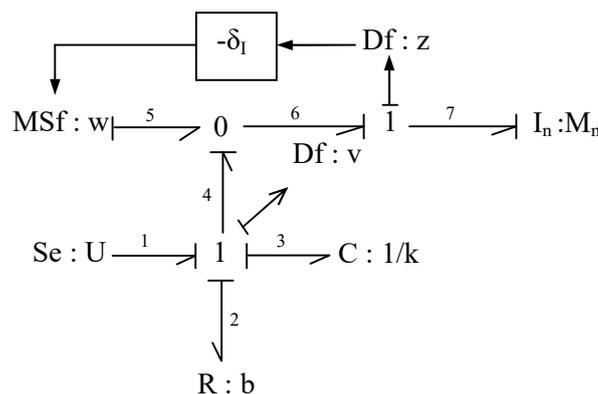


FIGURE 3.7: MODELE BOND GRAPH INCERTAIN EN MODELE STANDARD D’INTERCONNEXION

III.3.2. Conception de la loi de commande

Après avoir introduit l’incertitude au modèle bond graph, on veut concevoir la loi de commande de suivi de trajectoire, en utilisant la procédure précédente (section III.2.1), qui nous donne les étapes suivantes :

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

En suivant le chemin d'action causale (E/S), et les procédures d'inversion, on obtient le modèle bond graph suivant (Fig. 3.8) :

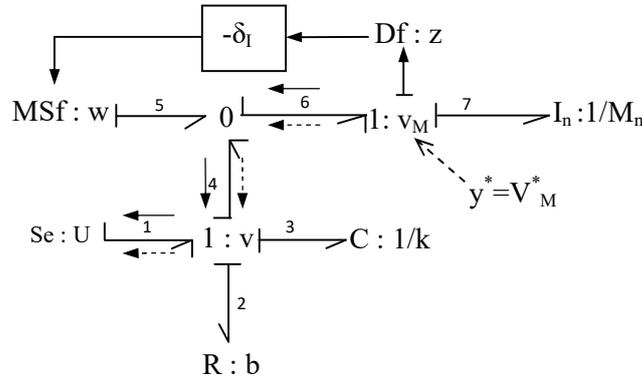


FIGURE 3.8: MODELE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Déduction de l'équation inverse :**

Pour la déduction de l'équation inverse, on exploite les relations constitutives des jonctions du modèle, comme suit :

- Jonction "1 : v_M" :

$$e_6 = e_7, \quad \text{avec} \quad e_7 = M_n \cdot \dot{v}_M \tag{3.13}$$

- Jonction "0" :

$$f_4 = f_6 - f_5, \quad \text{avec} \quad f_4 = v, \quad f_6 = f_7 = v_M, \quad f_5 = -v_M \cdot \delta_M \quad d'où \tag{3.14}$$

$$v = (1 + \delta_M) v_M$$

- Jonction "1 : v" :

$$e_1 = e_2 + e_3 + e_4, \quad \text{avec} :$$

$$\begin{cases} e_1 = u \\ e_2 = b \cdot v \\ e_3 = \frac{1}{C} \int v \cdot dt = k \int v \cdot dt \\ e_4 = e_6 = e_7 = M_n \cdot \dot{v}_M \end{cases} \tag{3.15}$$

$$D'où la relation : u = b \cdot v + M_n \cdot \dot{v}_M + k \int v \cdot dt \tag{3.16}$$

Mais si on remplace "v" par leur valeur de (3.14) dans la relation (3.16), on déduit la relation inverse finale suivante :

$$u = b(1 + \delta_M)v_M + M_n \cdot \dot{v}_M + k(1 + \delta_M) \int v_M \cdot dt \quad (3.17)$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur de suivi comme suit :

$$e_{v_M} = v_M^* - v_M, \quad \text{avec } v_M^* \text{ est la vitesse désirée} \quad (3.18)$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$v_M = v_M^* - e_{v_M} \quad (3.19)$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (3.17), on trouve la relation suivante :

$$u = b(1 + \delta_M)(v_M^* - e_{v_M}) + M_n \cdot (\dot{v}_M^* - \dot{e}_{v_M}) + k(1 + \delta_M) \int (v_M^* - e_{v_M}) dt \quad (3.20)$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

La dynamique de l'erreur est définie comme suit :

$$\dot{e}_{v_M} + k_{v_M} \cdot e_{v_M} = 0 \Rightarrow \dot{e}_{v_M} = -k_{v_M} e_{v_M} \text{ avec } k_{v_M} > 0 \quad (3.21)$$

Puis on le remplace dans la relation (3.20), on obtient :

$$u = b(1 + \delta_M)(v_M^* - e_{v_M}) + M_n \cdot (\dot{v}_M^* + k_{v_M} e_{v_M}) + k(1 + \delta_M) \int (v_M^* - e_{v_M}) dt \quad (3.22)$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On retient la valeur de l'erreur par sa valeur décrite par (3.18) dans la relation (3.22), on obtient la relation de la commande suivante :

$$u^* = [b(1 + \delta_M) - k_{v_M} \cdot M_n] v_M + k(1 + \delta_M) \int v_M \cdot dt + M_n \cdot \dot{v}_M^* + M_n k_{v_M} \cdot v_M^* \quad (3.23)$$

III.3.3. Simulation

À l'aide du même simulateur 20-sim, on introduit notre modèle bond graph incertain (**Fig. 3.7**), ainsi de la loi de commande obtenue par la relation (3.23), pour la même référence rectangulaire (**Fig. 3.4**), avec un choix d'incertitude ($\pm 0.5\%$) de la masse "M", on obtient le résultat suivant:

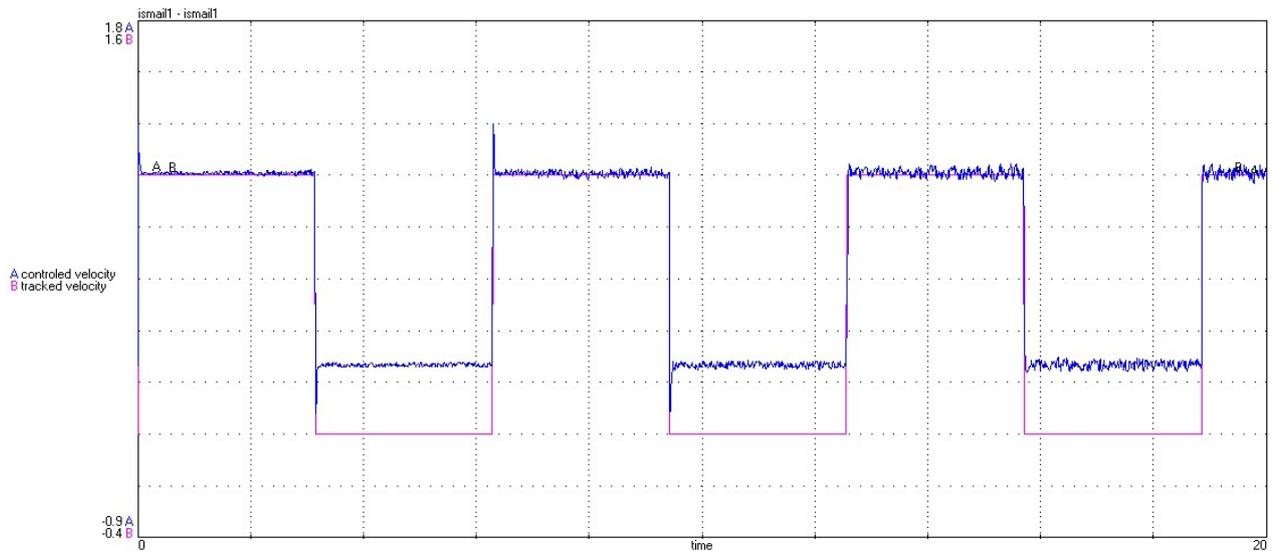


FIGURE 3.9: SIMULATION DE LA VITESSE COMMANDEE EN PRESENCE D'INCERTITUDE

On voit dans la figure précédente, que le signal de la vitesse suit le signal de référence, même en présence d'incertitude, ce qui permet de dire la loi de commande déduite est convenable pour ce type de système, et elle est robuste aux erreurs de modélisation.

III.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été fixé pour la synthèse d'une loi de commande de suivi de trajectoire à l'aide des propriétés graphiques et algébriques qui fournissent l'outil bond graph. Cet objectif est divisé en deux parties : un modèle de représentation normale et modèle en présence d'incertitude, choisie du type additive en forme multiplicative sur un modèle standard d'interconnexion (ou LFT). L'exemple d'application est choisi simple pour ne pas compliquer l'illustration de la méthode de conception de la loi de commande de suivi de trajectoire, mais elle peut être appliquée sur n'importe quel modèle bond graph du type SISO, linéaire ou non linéaire linéarisé.

CHAPITRE IV :

COMMANDE DE SUIVI DE

TRAJECTOIRE D'UNE SUSPENSION

MAGNETIQUE

Chapitre IV : Commande de suivi de trajectoire d'une suspension magnétique

IV.1. Introduction

Après avoir illustré la technique de commande de suivi de trajectoire sur un système mécanique simple, le présent chapitre est consacré à l'application de cette technique sur un processus plus complexe.

Notre application sera la suspension magnétique ou Magnetic Levitation (Maglev), un système électro magnéto mécanique de différents domaines de la physique interconnectés, utilisé beaucoup dans différents secteurs industriels, comme : le transport ferroviaire, manutention sans contact physique, robotique, isolation contre les vibrations, ..., et d'autres.

Notre chapitre sera organisé comme suit : une brève description sur la suspension magnétique, leurs modèles bond graph non linéaire et linéarisé, en mode normal et incertain, puis l'implantation de la loi de commande sur leurs modèles bond graph, ensuite la simulation des modèles et des lois de commande à l'aide du logiciel 20-Sim, avec interprétations des résultats.

IV.2. Description du processus

Le système de lévitation magnétique est le sujet de plusieurs recherches à l'échelle internationale, en tant pour leur modélisation, identification, commande, dimensionnement et/ou diagnostic [90-93], à cause de leur large application dans le secteur industriel et aussi dans la vie moderne (transport, manutention, ..., etc.).

Le principe de fonctionnement d'une lévitation magnétique est qu'on utilise la force d'attraction ou de propulsion entre une partie fixe de nature électromagnétique et une partie mobile composée d'une matière ferromagnétique, avec une distance entre les deux parties, fixe ou variable (selon besoin). On distingue, donc deux catégories de Maglev [94] :

- Passive : qu'utilise un supra conducteur ;

- Active : qu'utilise une force de contrôle, dont les systèmes AMB (Active Magnetic Bearing) en employant un capteur de position optique ou inductif de position, pour les besoins des contrôleurs.

Le schéma simplifié d'un système de lévitation électromagnétique est donné comme suit :

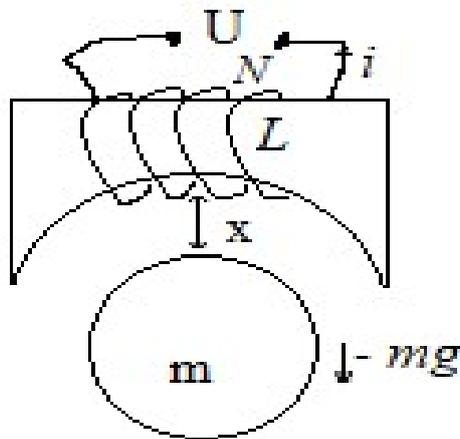


FIGURE 4.1: SCHEMA FONCTIONNEL D'UNE LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE

La lévitation électromagnétique consiste à un circuit électrique formé par une source de tension, U , fournie de la puissance électrique à une bobine L , avec N , nombre de tours sur un matériel ferromagnétique, de forme inférieure d'une demi-sphère. Au-dessous, il y a une balle en fer de masse m , subit aux forces de gravité. Lorsqu'on alimente circuit électrique, il sera créé un champ magnétique permettant l'attraction de la balle en minimisant l'effet de la force de gravité, jusqu'aux les valeurs de la distance entre la balle et le système électromagnétique soit nulle, ou égale à une valeur désirée de contrôle.

IV.3. Modélisation par bond graph

La lévitation électromagnétique, comme plusieurs applications, été le sujet de plusieurs publications et recherches pour leur modélisation par bond graph. On distingue [10][95-96] dans la modélisation des circuits et éléments magnétiques, [90][92][97] pour la modélisation d'une suspension électromagnétique ou lévitation magnétique, [98] comme solénoïde, [6] en modèle d'élément multiport, [10] comme élément AMB inspiré de la modélisation des éléments électromagnétiques actifs, proposée par [94]. On trouve aussi leurs modélisations dans des applications spéciales, comme en robotique [99], en mécatronique [100] ou comme élément de transduction [93].

Dans la modélisation d'un tel système multi domaines, on suit les étapes de modélisation par bond graph, décrites précédemment dans le chapitre I. Ce système est composé de trois domaines de la physique : électrique, électromagnétique et mécanique (Fig. 4.2):

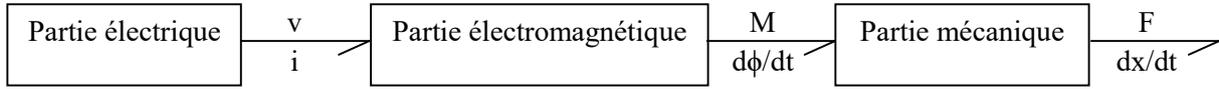


FIGURE 4.2: BOND GRAPH A MOTS D'UNE LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE

On a trouvé dans la littérature, plusieurs points de vue dans la modélisation du couplage électro magnéto mécanique dans leur modélisation par bond graph, modélisé généralement par un élément multiport "C" [6] [10] [93] [95-96] [98-99] [101] ou multiport "IC" [92] (Fig. 4.3):

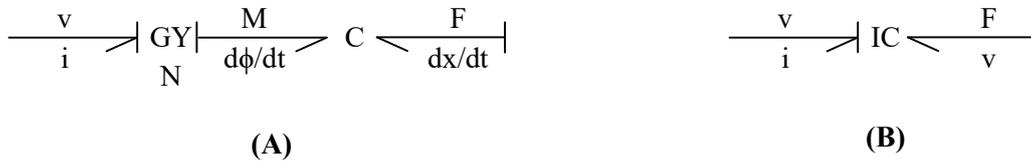


FIGURE 4.3: ELEMENT MULTI-BOND GRAPH MODELE DU COUPLAGE ELECTRO-MAGNETO-MECANIQUE

Par contre, il existe aussi d'autres travaux qui modélisent ce phénomène par d'autres modèles bond graph, inspirés par les formules physiques de l'électromagnétisme, ensuite traduit en éléments bond graph [90][97][100].

Le modèle bond graph du système électro magnéto mécanique de la figure (Fig. 4.1) est donné comme suit, en adoptant la modélisation par élément "C" multiport de la figure (Fig. 4.3.A) :

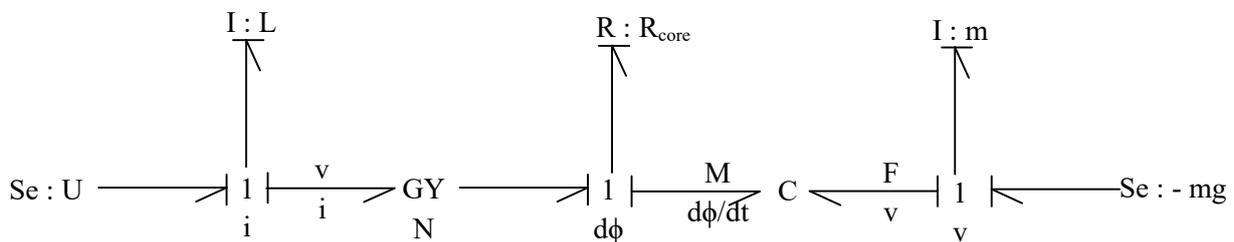


FIGURE 4.4: MODELE BOND GRAPH DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE

L'élément multiport "C" est régi par les relations suivantes :

$$M = \frac{x}{\mu_0 \cdot A} \phi, \text{ qui est la force magnétomotrice} \tag{4.1}$$

$$F = \frac{\phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot A}, \text{ qui est la force mécanique} \tag{4.2}$$

x : est le déplacement

A : est la surface

Avec : ϕ : est le flux magnétique

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: est la perméabilité de l'air

Dans [10], on trouve une simplification du modèle précédent (**Fig. 4.4**), due à la linéarisation autour d'un point d'équilibre en basant sur [94]. Un nouveau modèle bond graph, plus simple et ne contient pas d'élément multiport (**Fig. 4.5**) :

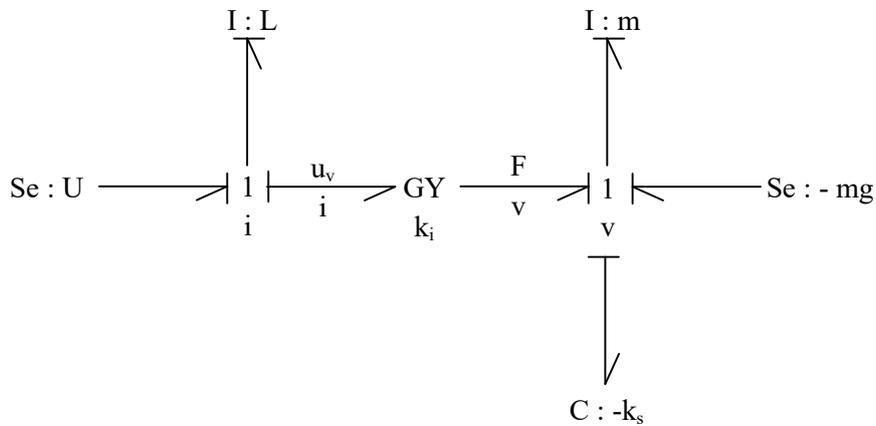


FIGURE 4.5: MODELE BOND GRAPH SIMPLIFIE DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE

Ce nouveau modèle est régi par le système d'équations linéarisé suivant :

$$\begin{cases} F = k_i \cdot i + k_s \cdot x \\ U = L \frac{di}{dt} + k_i \cdot \dot{x} \end{cases} \tag{4.3}$$

Sachant que : $L = N^2 \frac{A\mu_0}{2 \cdot x_0}$, est l'inductance, $k_i = L \cdot \frac{i_0}{x_0}$, est le facteur de la force de courant

$k_s = k_i \cdot \frac{i_0}{x_0}$, est le facteur de la force de déplacement, i_0 et x_0 sont le courant et la distance au point d'équilibre, et 'N' est le nombre de tours de l'inductance.

La simulation du modèle bond graph de la figure précédente (**Fig. 4.5**), sans la loi de commande nous donne la figure suivante, du déplacement de la masse suspendue, à l'aide du logiciel 20sim4.8 viewer :

20-sim 4.8 Viewer (c) CLP 2020

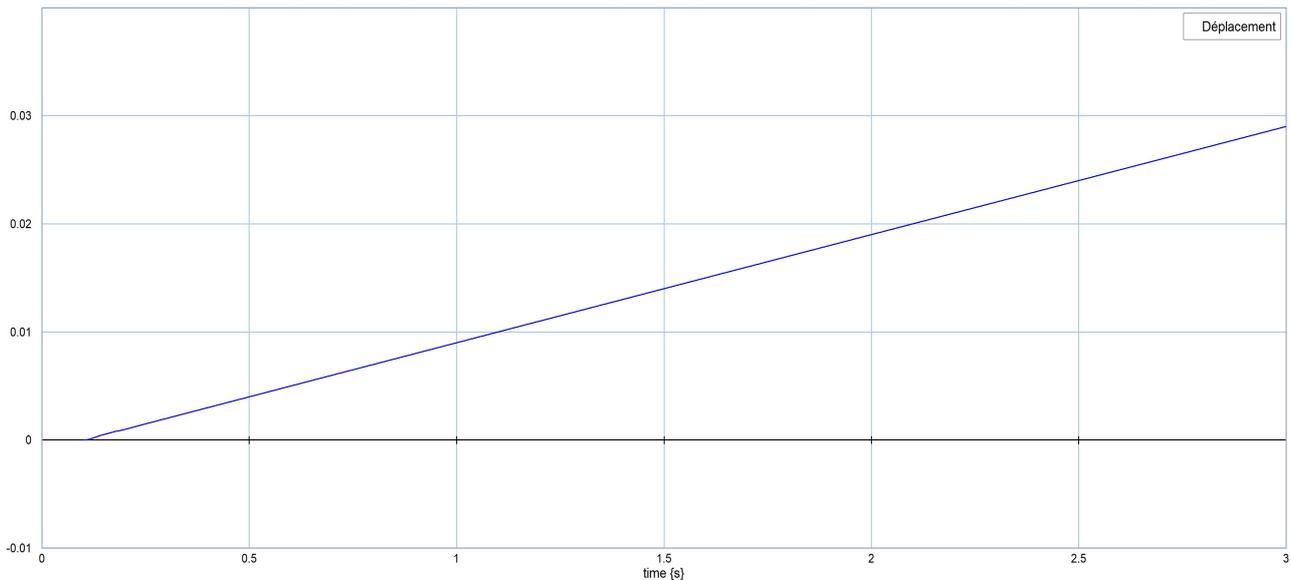


FIGURE 4.6: SIMULATION DU MODELE BOND GRAPH PAR 20-SIM

Cette figure montre que la masse suspendue se déplace loin du notre circuit, à cause de l'effet de la gravité, ce qui nécessite une loi de commande pour la régler en une distance bien définie.

IV.4. Conception de la loi de commande par bond graph

IV.4.1 Etat de l'art sur la commande du système MAGLEV

Le contrôle de la lévitation magnétique est sujet de recherche très riche en termes de techniques de commande déjà élaborées. On cite quelques techniques, comme le contrôle par observateur de Luenberger [94], par le contrôle classique PID [102], par logique floue [91], par backstepping control [103]. Ces techniques utilisent des modèles mathématiques (fonction de transfert, espace d'état), mais aussi il existe quelques travaux qu'utilise le modèle bond graph, comme support pour la conception des lois de commande. On distingue [90][104] pour le contrôle par PID en utilisant un modèle bond graph sur le logiciel 20-sim d'une lévitation magnétique avec réalisation et mesures réelles [90] et d'une lévitation électromagnétique utilisée comme actionneur actif d'une suspension $\frac{1}{4}$ de véhicule [104]. Aussi on trouve la conception d'une loi de commande à l'aide du modèle bond graph, basée sur la passification (IDA-PBC : Interconnected Damping Assignment-Passivity Based Control) [92].

IV.4.2 Procédure de SAT de la lévitation électromagnétique

Notre objectif dans cette thèse, à cette section est de répéter la procédure de contrôle du suivi de trajectoire sur le modèle bond graph de la lévitation électromagnétique, en utilisant le modèle donné par la figure précédente (Fig. 4.5).

On veut appliquer la procédure SAT décrite dans la section III.2.1, sur notre modèle bond graph (Fig. 4.5). Pour cela, d'après la procédure proposée par S. Junco [24][32], on peut diviser notre modèle de système, en deux sous-systèmes interconnectés, puis on applique la procédure à chaque sous-système séparément, sachant que l'entrée du dernier sous-système est la sortie du premier, donc on concevait l'entrée du dernier sous-système par cette procédure, et on pose cette entrée comme sortie désirée du premier sous-système, afin de trouver à l'aide de la procédure SAT, leur entrée, qui est aussi l'entrée principale du système complet.

(A)- Sous-Système II :

Notre modèle bond graph est donné comme suit :

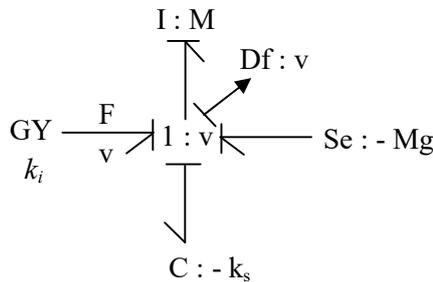


FIGURE 4.7: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME II

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

L'inversion bicausale E/S de notre modèle, conduise au modèle bond graph inverse suivant (Fig. 4.8) :

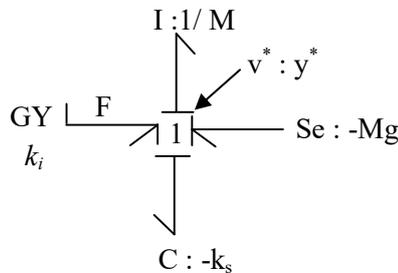


FIGURE 4.8: MODÈLE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Dédution de l'équation inverse :**

On déduit l'équation inverse à partir de la relation constitutive de jonction « 1 » du modèle bond graph inverse (Fig. 4.8) :

$$F = M \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{1}{k_s} \int v \cdot dt + M \cdot g \tag{4.4}$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur entre la sortie réelle $v(t)$ et la sortie désirée $v^*(t)$ comme suit :

$$e(t) = v^*(t) - v(t) \quad (4.5)$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$\dot{v}(t) = \dot{v}^*(t) - \dot{e}(t) \quad (4.6)$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (4.4), on trouve la relation suivante :

$$F = M.(\dot{v}^* - \dot{e}) - \frac{1}{k_s} \int (v^* - e) dt + M.g \quad (4.7)$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

On choisit la dynamique de l'erreur de sortie selon la relation (3.3), avec un degré relatif ($r = 1$), qui nous donne la relation suivante :

$$\dot{e}(t) = -k_g e(t), \text{ avec } k_g > 0 \quad (4.8)$$

Puis on le remplace dans la relation (4.7) :

$$F = M.(\dot{v}^*(t) + k_g e(t)) - \frac{1}{k_s} \int (v^*(t) - e(t)) dt \quad (4.9)$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On remplace dans la relation (4.9), la relation de l'erreur initiale (4.5), qui nous donne la loi finale de la commande, $F^*(t)$:

$$F^*(t) = -M.k_g v(t) - \frac{1}{k_s} \int v(t) dt + M.\dot{v}^*(t) + M.k_g v^*(t) + M.g \quad (4.10)$$

Avec un choix convenable du paramètre de gain de la commande k_g .

(B) - Sous-Système I :

Notre modèle bond graph est donné comme suit :

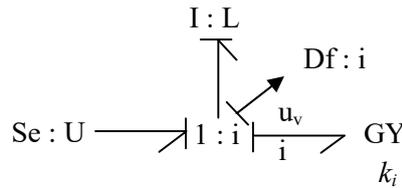


FIGURE 4.9: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME I

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

L'inversion bicausale E/S de notre modèle, conduite au modèle bond graph inverse suivant (Fig. 4.10) :

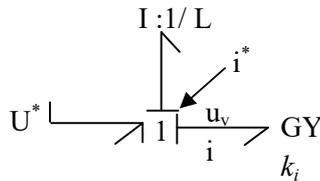


FIGURE 4.10: MODÈLE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Dédution de l'équation inverse :**

On déduit l'équation inverse à partir de la relation constitutive de jonction « 1 » du modèle bond graph inverse (Fig. 4.10) :

$$U = L \frac{di}{dt} + u_v = L \frac{di}{dt} + k_i v \tag{4.11}$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur entre la sortie réelle $i(t)$ et la sortie désirée $i^*(t)$ comme suit :

$$e_i(t) = i^*(t) - i(t) \tag{4.12}$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$i(t) = i^*(t) - e_i(t) \tag{4.13}$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (4.11), on trouve la relation suivante :

$$U = L \left(\frac{di^*}{dt} - \frac{de_i}{dt} \right) + k_i v \tag{4.14}$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

On choisit la dynamique de l'erreur de sortie selon la relation (3.3), avec un degré relatif ($r = 1$), qui nous donne la relation suivante :

$$\dot{e}_i(t) = -k_{ii}e_i(t), \text{ avec } k_{ii} > 0 \tag{4.15}$$

Puis on le remplace dans la relation (4.14) :

$$U = L \left(\frac{di^*}{dt} + k_{ii}e_i \right) + k_i v \tag{4.16}$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On remplace dans la relation (4.16), la relation de l'erreur initiale (4.12), qui nous donne la loi de la commande, $U^*(t)$:

$$U^*(t) = -L.k_{ii}i(t) + L.\frac{di^*}{dt} + k_{ii}.L.i^*(t) + k_i.v(t) \tag{4.17}$$

Avec un choix convenable du paramètre de gain de la commande k_{ii} . On note que la relation de $i^*(t)$ est :

$$i^*(t) = \frac{1}{k_i}.F^*(t) \tag{4.18}$$

Cette dernière relation est inspirée par la relation qui régit le "GY : k_i ", d'où la relation de la commande finale, est donnée comme suit :

$$U^*(t) = -L.k_{ii}i(t) + \frac{L}{k_i}.\frac{dF^*(t)}{dt} + \frac{k_{ii}.L}{k_i}.F^*(t) + k_i.v(t) \tag{4.19}$$

IV.4.3. Simulation

Pour la simulation de la loi de commande, on utilise le logiciel 20-Sim, qui intègre à la fois le modèle bond graph et la relation (4.19). Les paramètres des éléments bond graph sont choisis de la référence [102], avec un signal de référence d'un déplacement "x" échelon unitaire. Les paramètres du contrôleur sont choisis par tâtonnement, pour assurer un niveau performant de suivi de trajectoire, avec $k_{ii} = 185$ et $k_g = 370$.

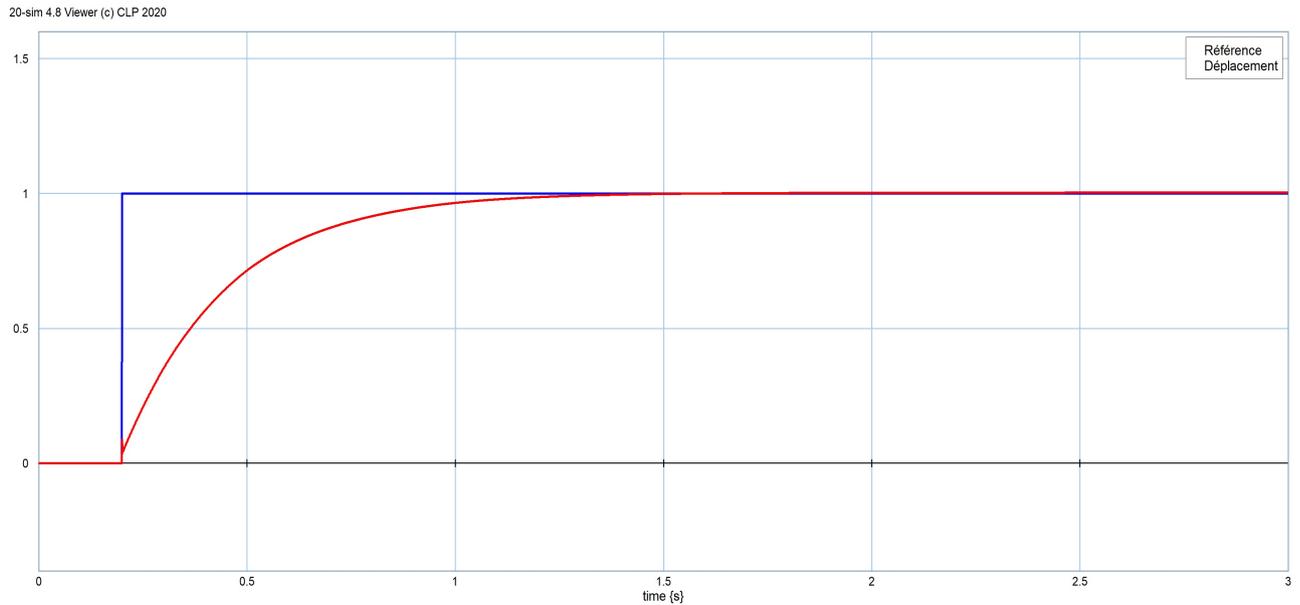


FIGURE 4.11 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE

De la figure précédente (FIGURE 4.11), on constate que la sortie du système suit régulièrement la référence, d'où l'efficacité de cette technique dans la résolution de tels problèmes.

Les paramètres k_{ii} et k_g sont choisis arbitrairement. Si on les modifiait pour objet d'améliorer le temps de réponse on trouve les résultats suivants :

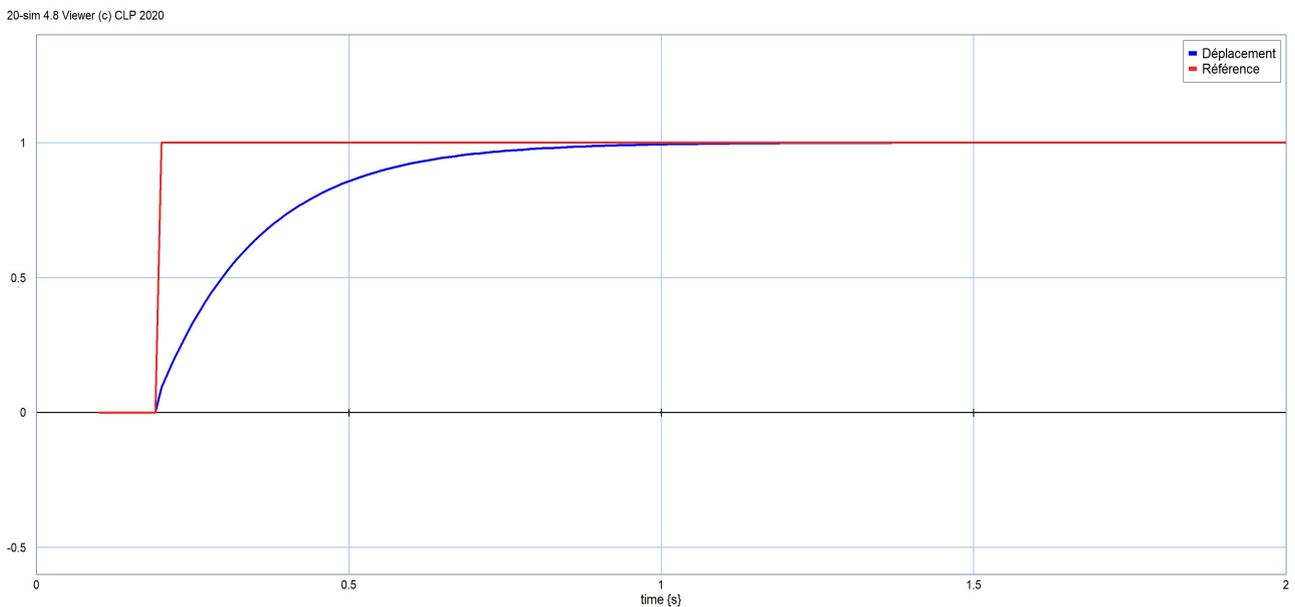


FIGURE 4.12 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC $k_{ii} = 300$ et $k_g = 600$

On remarque dans la figure (Fig. 4.12) que le temps de réponse est un peu amélioré par rapport au précédent (Fig. 4.11).

Pour les paramètres $k_{ii}=5000$ et $k_g=10000$, on trouve les résultats suivants (Fig. 4.13) :

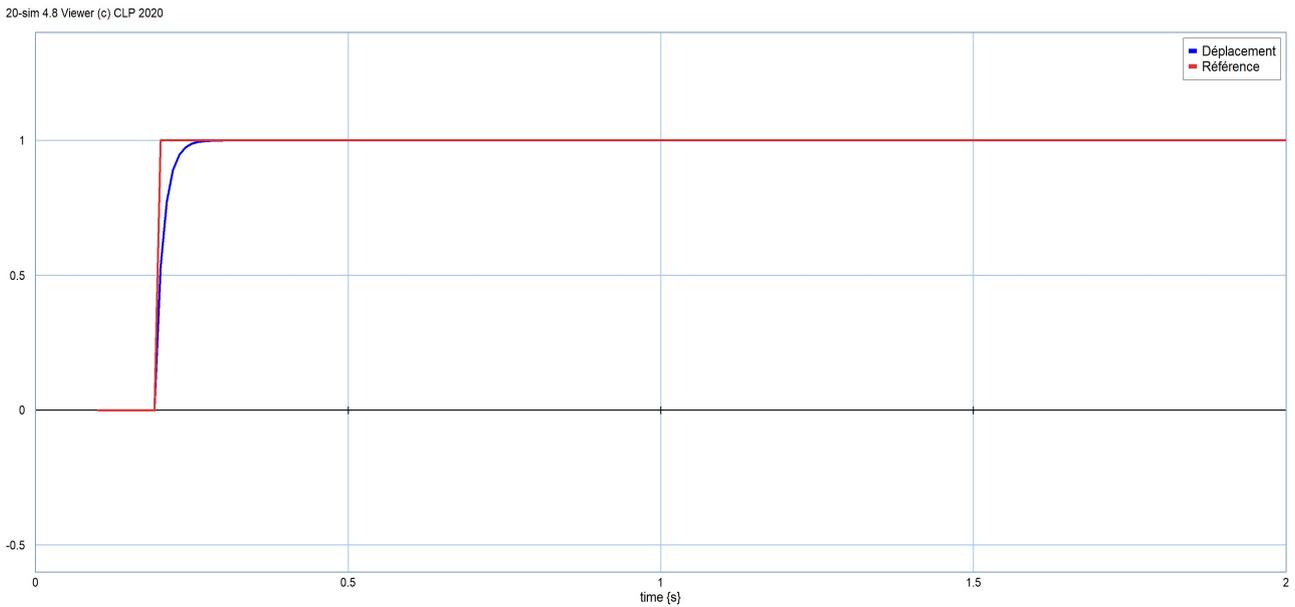


FIGURE 4.13 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC $k_{ii} = 5000$ et $k_g = 10000$

Pour cette dernière simulation (Fig. 4.13), on trouve que les résultats sont meilleurs, avec un suivi parfait de la trajectoire, avec un temps de réponse plus court. On remarque que l'erreur entre la référence et le déplacement est très petite.

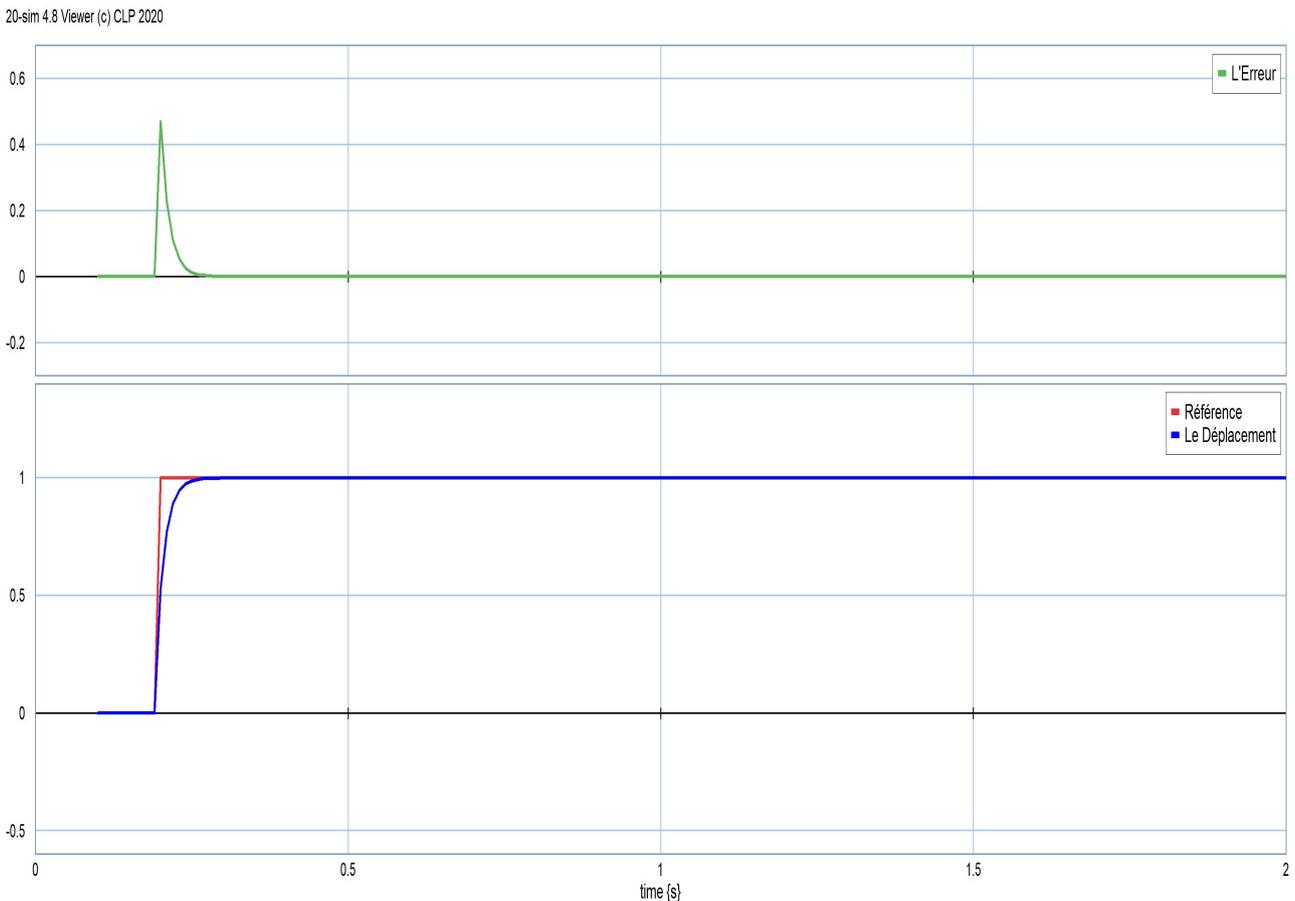


FIGURE 4.14 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC ET L'ERREUR

Pour la validation de cette technique, on compare nos résultats obtenus par les résultats des autres travaux de recherche, comme le travail des chercheurs A. K. Mishra et al. [90], publié en conférence internationale, et qui sont utilisés l'outil bond graph pour la conception d'un contrôleur PID pour régler la distance de la masse suspendue par élément électro magnétique, à travers le simulateur 20-sim, présenté par les figures suivantes :

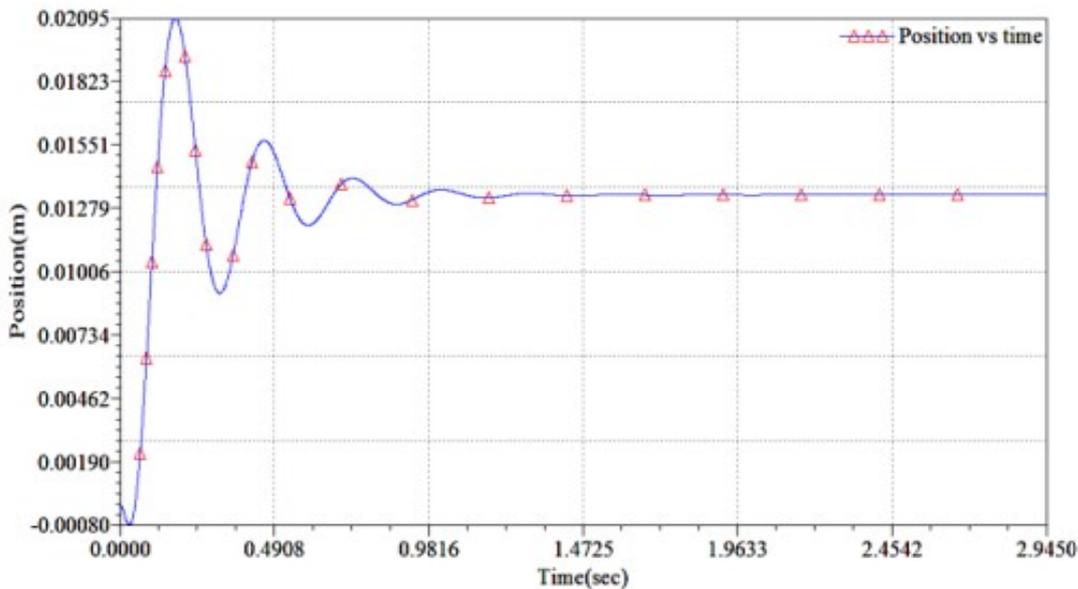


FIGURE 4.15 : RESULTAT DE CONTROLE PID PAR MODELE BOND GRAPH [90]

On constate que notre résultat est plus meilleur (Fig. 4.14) que le résultat ci-dessus, en temps de réponse, ainsi à l'élimination de l'amortissement de la réponse indicielle. On trouve ces mêmes résultats dans [104] publiés en journal international, pour le contrôle d'une suspension active de véhicule par amortisseur électromagnétique, utilisant un régulateur PID :

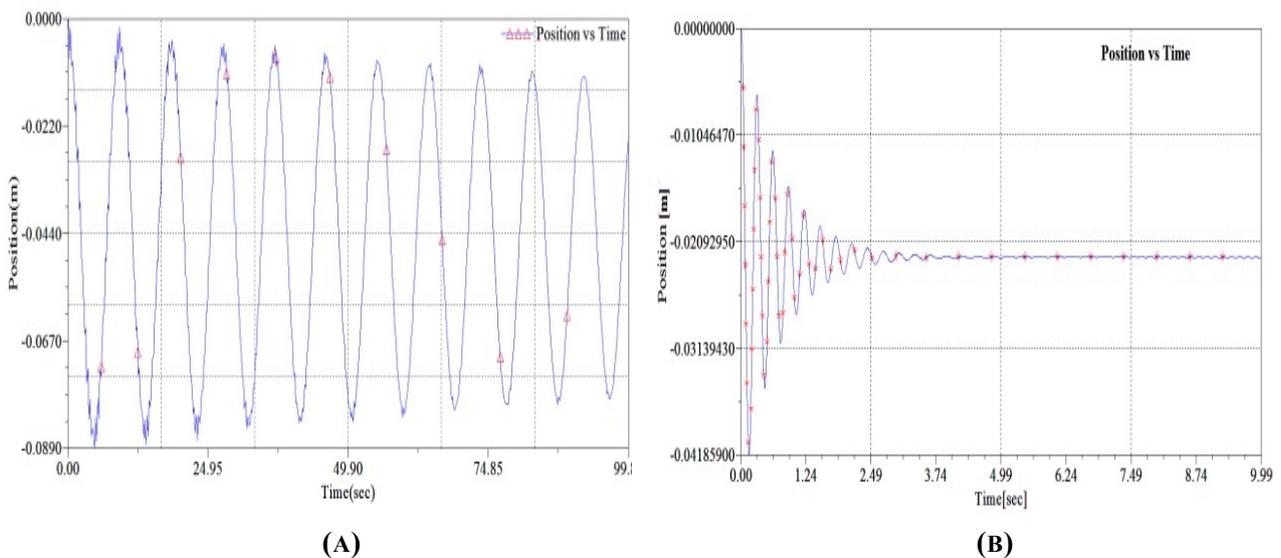


FIGURE 4.16 : RESULTAT DE CONTROLE PID D'UN AMORTISSEUR ELECTROMAGNETIQUE

(A) SANS LOI DE CONTROLE (B) AVEC LOI DE CONTROLE [104]

Pour valider de plus cette loi de commande, on choisit une autre référence, du type sinusoïdale, pour voir est ce que la sortie suivra ou non notre référence.

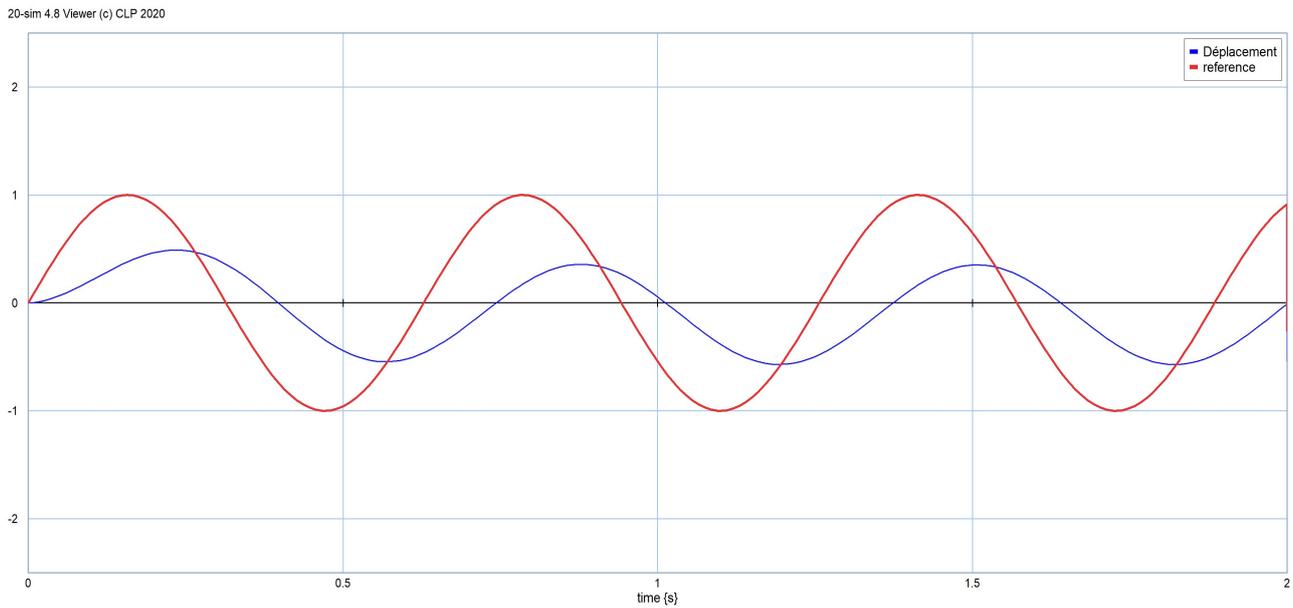


FIGURE 4.17 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC REFERENCE SINUSOÏDALE

Les paramètres choisis sont $k_{ii}=250$ et $k_g=500$, qui ont donné les résultats précédents (Fig. 4.17). Pour les paramètres $k_{ii}=15000$ et $k_g=30000$, la figure suivante (Fig. 4.18), montre un suivi idéal de la trajectoire, avec une erreur très réduite.

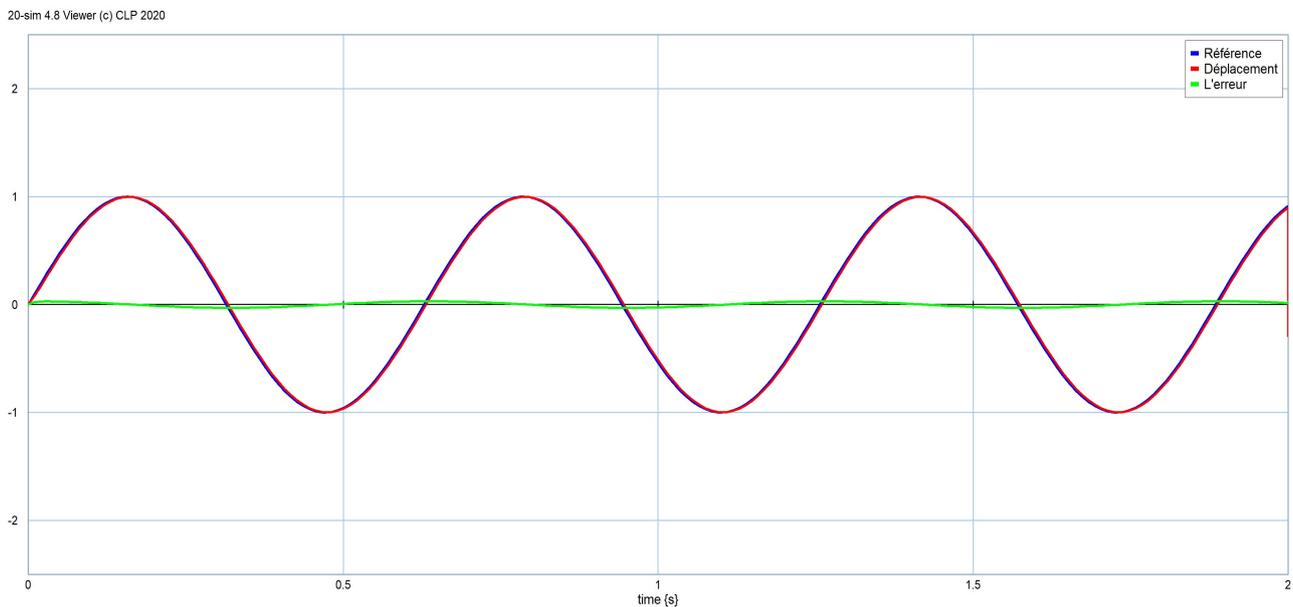


FIGURE 4.18 : SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE AVEC REFERENCE SINUSOÏDALE ET LEUR ERREUR DE SUIVI

Après ces résultats, on constate que cette technique est valide pour ce type de système, le seul problème est comment choisir les bons paramètres du régulateur.

IV.5. Loi de commande avec modèle bond graph incertain

IV.5.1 Modèle bond graph incertain

Dans le modèle bond graph (Fig. 4.5), on introduit une incertitude sur l'élément "I : M", qui est une erreur de modélisation " ΔI ", représente généralement une surcharge sur la masse suspendue. Sous la forme du modèle standard d'interconnexion (ou LFT) on obtient le modèle bond graph suivant :

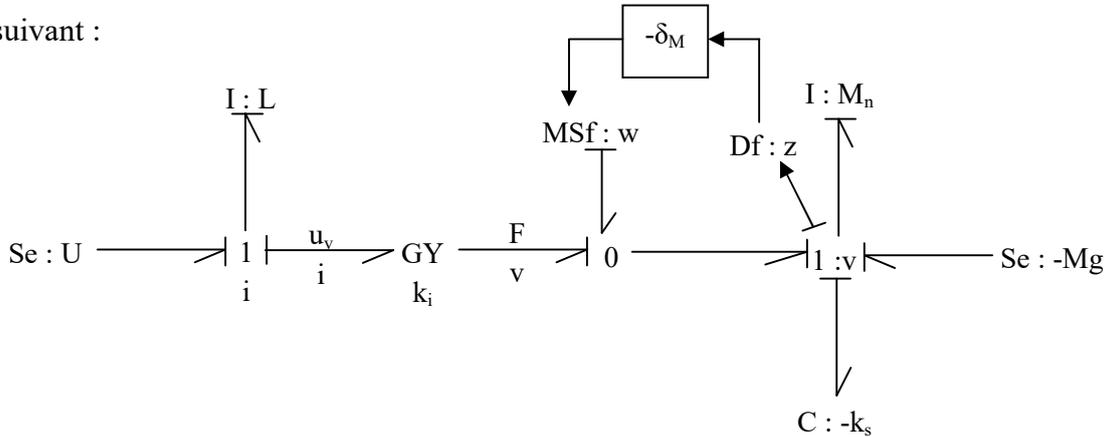


FIGURE 4.19 : MODELE BOND GRAPH DE LA LEVITATION ELECTROMAGNETIQUE AVEC INCERTITUDE

Le modèle bond graph précédent sera utilisé pour la conception de la loi de commande de suivi de trajectoire, dans la section suivante.

IV.5.2. Conception de la loi de commande

Comme on a vu précédemment, lors de la conception de la loi de commande, on suit la procédure décrite dans la section III.2.1, tout en partageant le modèle en sous-modèles, selon le nombre des jonctions du modèle.

A. Sous-Système II :

Notre modèle bond graph est donné comme suit :

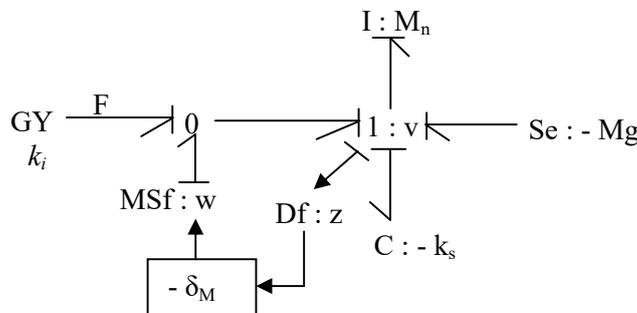


FIGURE 4.20: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME II

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

En suivant le chemin d'action causale (E/S), et les procédures d'inversion, on obtient le modèle bond graph suivant (Fig. 4.21) :

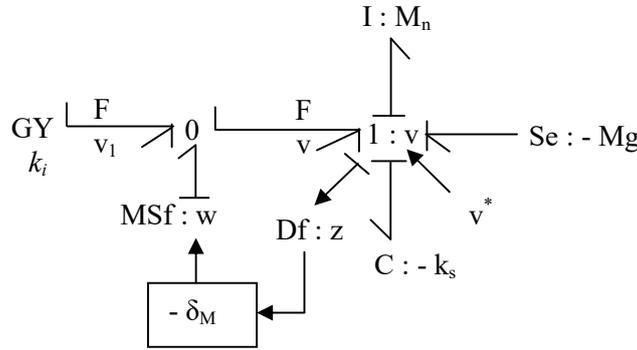


FIGURE 4.21: MODELE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Déduction de l'équation inverse :**

Pour la déduction de l'équation inverse, on exploite les relations constitutives des jonctions du modèle, comme suit :

- Jonction "1 : v" :

$$F = M \cdot g - \frac{1}{k_s} \int v \cdot dt + M_n \cdot \dot{v} \tag{4.20}$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur de suivi comme suit :

$$e_M = v^* - v, \quad \text{avec } v^* \text{ est la vitesse désirée} \tag{4.21}$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$v = v^* - e_M \tag{4.22}$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (4.20), on trouve la relation suivante :

$$F = M \cdot g + M_n (\dot{v}^* - \dot{e}_M) - \frac{1}{k_s} \int (v^* - e_M) \cdot dt \tag{4.23}$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

La dynamique de l'erreur est définie comme suit :

$$\dot{e}_M + k_M \cdot e_M = 0 \Rightarrow \dot{e}_M = -k_M e_M \text{ avec } k_M > 0 \tag{4.24}$$

Puis on le remplace dans la relation (4.23), on obtient :

$$F = M \cdot g + M_n (\dot{v}^* + k_M e_M) - \frac{1}{k_s} \int (v^* - e_M) dt \tag{4.25}$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On retient la valeur de l'erreur décrite par (4.21) dans la relation (4.25), on obtient la relation de la commande suivante :

$$F = M \cdot g + M_n \cdot \dot{v}^* + M \cdot k_M \cdot v^* - M \cdot k_M \cdot v - \frac{1}{k_s} \int v \cdot dt \tag{4.26}$$

- Jonction "0" :

$$\begin{cases} \text{Tous les efforts sont communs;} \\ v_1 = v - w, \text{ avec } w = -\delta_M \cdot v \Rightarrow v_1 = (1 + \delta_M) \cdot v \end{cases} \tag{4.27}$$

B. Sous-Systeme I :

Notre modèle bond graph est donné comme suit :

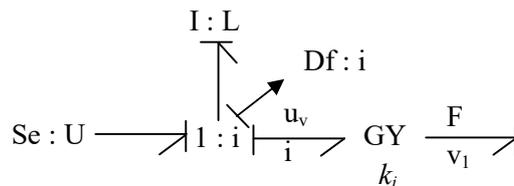


FIGURE 4.22: MODELE BOND GRAPH DU SOUS-SYSTEME I

→ **Etape 1 : Inversion bicausale entrée/sortie (E/S) :**

L'inversion bicausale E/S de notre modèle, conduite au modèle bond graph inverse suivant :

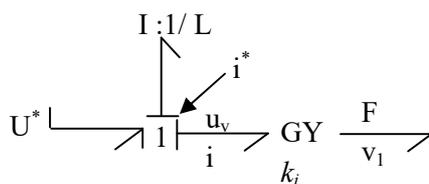


FIGURE 4.23: MODÈLE BOND GRAPH INVERSE

→ **Etape 2 : Dédution de l'équation inverse :**

On déduit l'équation inverse à partir de la relation constitutive de jonction « 1 » du modèle bond graph inverse :

$$U = L \frac{di}{dt} + u_v = L \frac{di}{dt} + k_i v_1 \quad (4.28)$$

$$\text{Donc } U = L \frac{di}{dt} + k_i (1 + \delta_M) v \quad (4.29)$$

→ **Etape 3 : Substitution de la sortie :**

On définit l'erreur entre la sortie réelle $i(t)$ et la sortie désirée $i^*(t)$ comme suit :

$$e_i(t) = i^*(t) - i(t) \quad (4.30)$$

D'où la relation de la vitesse suivante :

$$i(t) = i^*(t) - e_i(t) \quad (4.31)$$

On remplace cette dernière relation dans la relation (4.29), on trouve la relation suivante :

$$U = L \frac{d}{dt} (i^* - e_i) + k_i (1 + \delta_M) v \quad (4.32)$$

→ **Etape 4 : Définition de la dynamique de l'erreur :**

On choisit la dynamique de l'erreur de sortie selon la relation (3.3), avec un degré relatif ($r = 1$), qui nous donne la relation suivante :

$$\dot{e}_i(t) = -k_u e_i(t), \text{ avec } k_u > 0 \quad (4.33)$$

Puis on le remplace dans la relation (4.32) :

$$U = L \left(\frac{di^*}{dt} + k_u e_i \right) + k_i (1 + \delta_M) v \quad (4.34)$$

→ **Etape 5 : Substitution de l'erreur :**

On remplace dans la relation (4.34), la relation de l'erreur initiale (4.30), qui nous donne la loi de la commande, $U^*(t)$:

$$U^*(t) = -L.k_u i(t) + L.\frac{di^*}{dt} + k_u.L.i^*(t) + k_i(1 + \delta_M).v(t) \tag{4.35}$$

Avec un choix convenable du paramètre de gain de la commande k_u . On note que la relation de $i^*(t)$ est :

$$i^*(t) = \frac{1}{k_i}.F^*(t) \tag{4.36}$$

Cette dernière relation est inspirée par la relation qui régit le "GY : k_i ", d'où la relation de la commande finale, est donnée comme suit :

$$U^*(t) = -L.k_u i(t) + \frac{L}{k_i}.\frac{dF^*(t)}{dt} + \frac{k_u.L}{k_i}.F^*(t) + k_i(1 + \delta_M).v(t) \tag{4.37}$$

IV.5.3. Simulation

Avant de simuler la loi de commande, on donne le graphe du déplacement de la balle avec une incertitude sur la masse qui varie de ($\pm 0.5\%$) (Fig. 4.24).

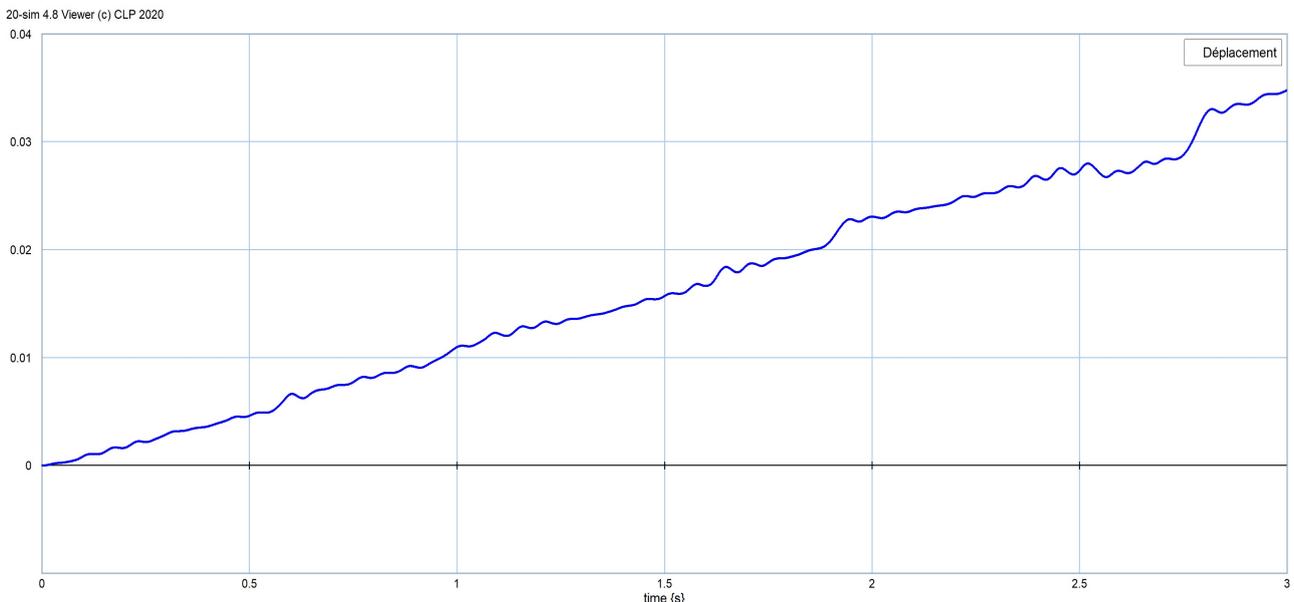


FIGURE 4.24 : SIMULATION DU DEPLACEMENT AVEC INCERTITUDE SANS COMMANDE

On voit sur cette figure, l'effet de l'incertitude sur le déplacement de la masse suspendue, avec une courbe presque linéaire, qui nécessite une régulation.

À l'aide du même simulateur 20-sim, on introduit la loi de commande obtenue par la relation (4.37), pour la même référence échelon, on obtient le résultat suivant:

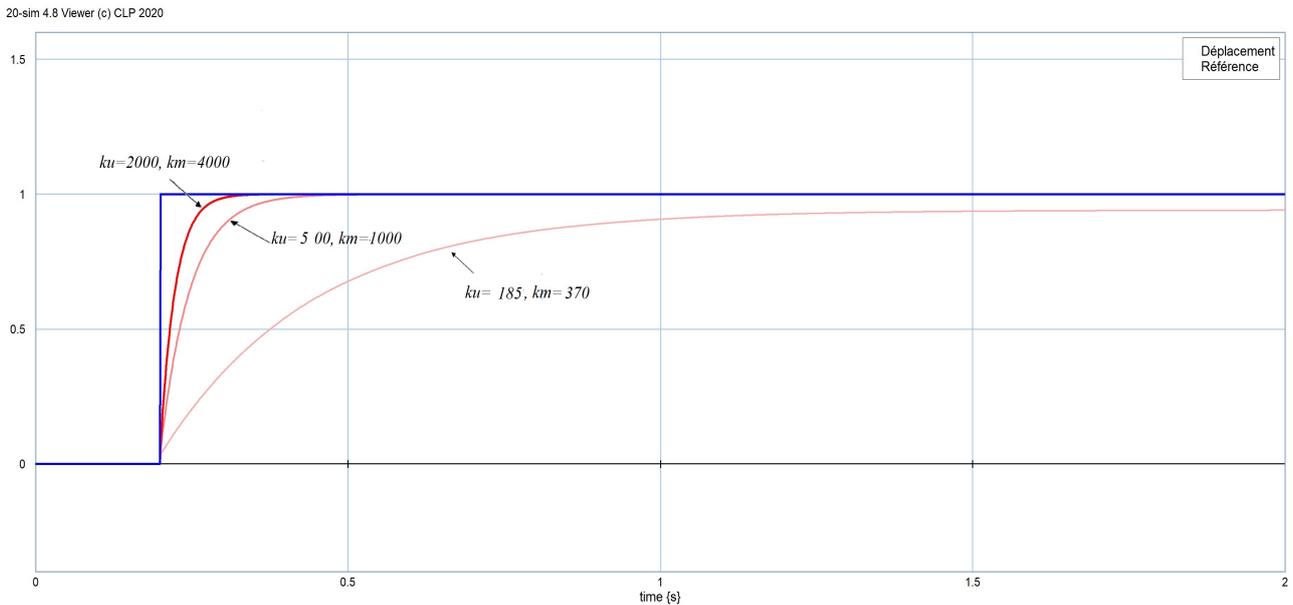


FIGURE 4.25 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE AVEC INCERTITUDE (STEP REFERENCE)

On voit dans la figure précédente, que le signal du déplacement suit le signal de référence, même en présence d'incertitude, qui est annulée par l'effet des intégrateurs utilisés dans la conception de la loi de commande, et cela pour les différentes valeurs des paramètres de la commande k_u et k_M , qu'on constate qu'il y a une relativité entre ces paramètres.

Pour d'autres formes de références, comme le signal sinusoïdal, on a les résultats suivants :

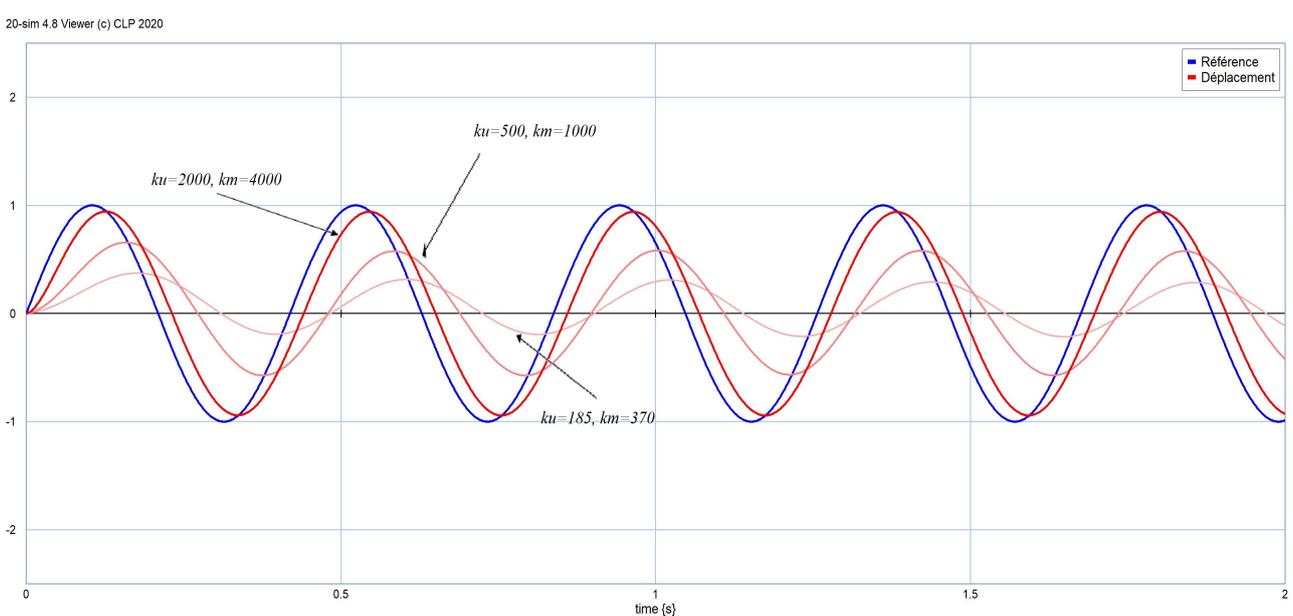


FIGURE 4.26 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE (SINUSOÏDE)

La figure (Fig. 4.26) montre que la sortie suit la trajectoire après l'ajustement des paramètres du régulateur, afin de trouver les plus adéquats.

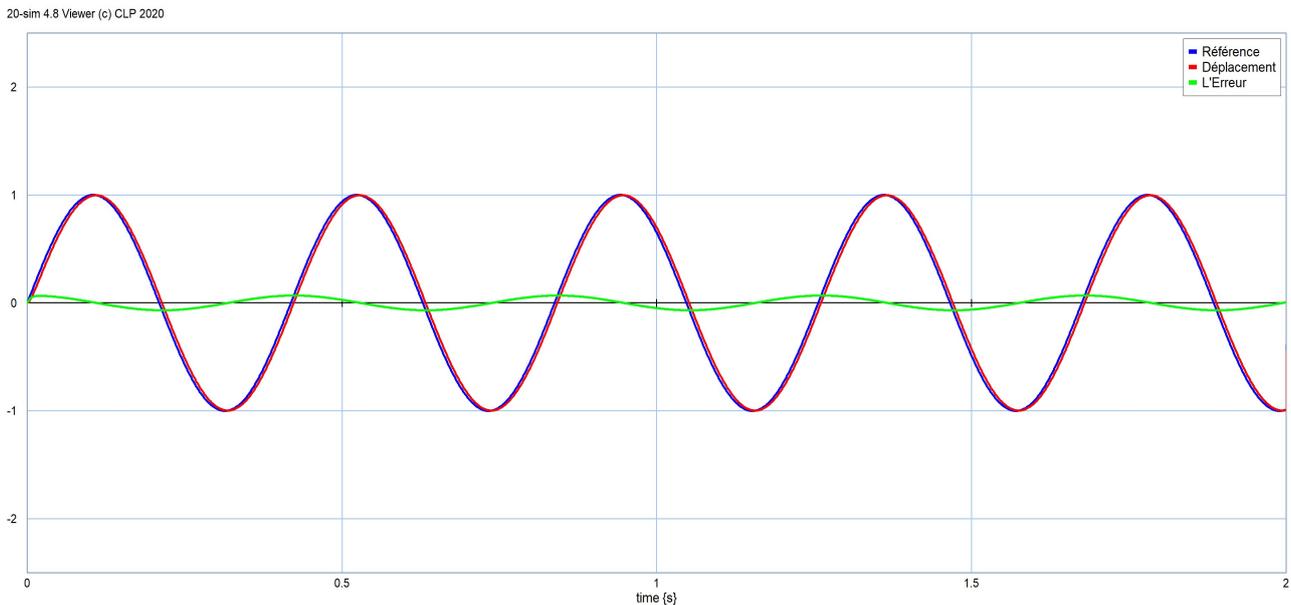


FIGURE 4.27 : SIMULATION DU DEPLACEMENT COMMANDEE AVEC ERREUR DE SUIVI (SINUSOÏDE)

Dans cette dernière figure (Fig. 4.27), nous avons utilisé les paramètres $k_u=10000$ et $k_M=20000$, qui nous meilleur résultat en suivi et en amplitude, avec une erreur plus réduite.

IV.6. Conclusion

L'objectif du présent chapitre était l'application de la technique de commande de suivi de trajectoire sur un système plus complexe, non linéaire qu'au système présenté au chapitre précédent. Notre système était la suspension ou la lévitation électromagnétique ou souvent appelée MAGLEV (Magnetic Levitation), qui est un système très répandu en matière de sujet de recherche, par leur application dans divers domaines et milieux industriels.

Après la présentation du système, nous avons introduit leur modèle bond graph, en forme multi-énergies, puis simplifié en mono-énergie, utilisé ensuite pour la conception de la loi de commande.

La loi de commande porte sur le maintien d'une distance fixe entre la masse suspendue et le système ou le circuit électromagnétique, et cela en absence et en présence de l'incertitude, qui est supposée comme surcharge ou masse additive.

Cette application, nous a conduits à conclure et valider notre technique de commande de suivi de trajectoire à l'aide de l'outil bond graph.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de la présente thèse, à travers ses travaux de recherche, est d'ajouter une contribution aux recherches sur la conception des lois de commande par l'outil bond graph. Cet outil est utilisé pour un tel objectif, suivant trois catégories :

- Par la déduction des modèles mathématiques classiques (espace d'état, fonction de transfert, schémas blocs), utilisés pour la conception des lois de commande ;
- Par l'emploi du modèle bond graph, à travers l'ajout de quelques éléments bond graph, qui jouent le rôle d'un contrôleur ;
- Ou par l'utilisation des deux méthodes précédentes, manipulations sur le modèle bond graph (inversion bicausale, déduction des relations, ..., etc.) et conception de la loi de commande par les techniques classiques et/ou modernes.

Notre travail rentre dans cette dernière catégorie, basant sur l'inversion bicausale, et en utilisant la décomposition du modèle bond graph en sous-modèles, adaptés à la conception d'une loi de commande du type backstepping avec intégrateurs.

Notre contribution est d'appliquer cette technique sur des modèles bond graph, qui présentent des incertitudes additives, formées en modèle standards d'interconnexion avec une transformation linéaire fractionnelle (ou LFT), qui sont adaptées aux problèmes de conception robuste des lois de commande et d'algorithmes de surveillance.

Pour cet objectif, nous avons rappelé quelques outils et méthodes d'analyse des modèles bond graph comme : les notions de causalité, bicausalité qui permettent de déduire les fondements d'analyse de commandabilité, observabilité, rang structurel, inversion des systèmes et d'autres. En plus, nous avons entamé la prise en compte de l'incertitude sur les éléments bond graph, avec leurs diversités, en matière de leurs applications en : sensibilité comme pour le bond graph incrémental, ou en développement du modèle canonique incertain et/ou modèle standard d'interconnexion pour le bond graph incertain.

La technique de commande de suivi de trajectoire était introduite et explorée dans le troisième chapitre en suivant une procédure de suivi asymptotique, efficace pour les problèmes de

ce type. Cette technique est appliquée sur un système mécanique simple de masse ressort amortisseur, par un modèle bond graph normal et modèle bond graph incertain, en forme LFT, et qu'ont permis de publier ses résultats en conférence internationale [33] et dans journal de publication internationale, par la suite [34].

Les techniques développées en troisième chapitre, sont appliquées sur un autre système non linéaire, plus complexe, qui est le système de lévitation électromagnétique (ou souvent appelé MAGLEV), par le développement des lois de commande à partir de leur modèle bond graph. Ce modèle est choisi parmi les modèles trouvés dans la littérature, qui varient du simple, complexe en multi-énergies et simplifié du type AMB (Active Magnetic Bearing). L'application sur le modèle normal et incertain pour le suivi d'une trajectoire fixe de la masse suspendue, a permis de valider l'efficacité de cette technique pour les deux types de modèles, et donc pour d'autres types de systèmes.

Dans l'élaboration des travaux de recherche de cette thèse, nous avons rencontré quelques problèmes et contraintes pour leur développement, concernant principalement le manque du logiciel de simulation des modèles bond graph (le seul logiciel disponible est le 20-sim ver 2.3 avec une clé expirée), en plus des difficultés à l'accès de certains travaux de recherche liés à ce sujet, et le nombre limité des chercheurs nationaux travaillant sur l'outil bond graph, à savoir dans l'utilisation de cet outil dans conception des lois de commande, d'où la nécessité de faire des relations avec des chercheurs internationaux, mais ce n'est pas possible à tous les moments (pas de bourse, pas de stage, obligations professionnels et personnels, ..., etc.).

Comme perspectives de ce thème de recherche, on vise à appliquer cette technique sur des modèles bond graph de type MIMO et des modèles multi-énergies et non linéaires, sans procéder à leurs linéarisations. Aussi, parmi nos perspectives, nous essayerons à développer des techniques de commande à base de modèles bond graphs, en présence de défauts, appelées souvent FTC, qui sont très répandues en milieu industriel (industrie pétrochimique, nucléaire, spatiale, ..., etc.)

Ce thème de recherche, nous a permis de confronter avec un outil (le bond graph), très riche en matière de ses axes d'application, comme : la modélisation, la simulation, le diagnostic, la conception des lois de commande, mais leur point fort, est se permet aux techniciens de différents domaines de la physique, de se communiquer entre eux par un même langage de travail et de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Paynter, Analysis and design of engineering systems, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, USA, 1961.
- [2] D.C. Karnopp, R. Rosenberg, Systems Dynamics: A unified approach, John Wiley & sons, New York, USA, 1975.
- [3] J. Thoma, Introduction to bond graphs and their applications, Pergamon Press, Oxford, UK, 1975.
- [4] F.E. Cellier, Continuous System Modeling, Springer-Verlag, New York, USA, 1991.
- [5] G. Dauphin-Tanguy, Les bond graphs, Edition Hermès-Lavoisier science publications, Paris, France, 2000.
- [6] W. Borutzky, Bond Graph Methodology – Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models, Springer, London, UK, 2010.
- [7] W. Borutzky, Bond Graph Modelling of Engineering Systems Theory, Applications and Software Support, Springer-Verlag, New York, USA, 2011.
- [8] W. Borutzky, Bond Graph Model-based Fault Diagnosis of Hybrid Systems, Springer International Publishing, 2015.
- [9] W. Borutzky, Bond Graphs for Modelling, Control and Fault Diagnosis of Engineering Systems, Springer International Publishing, 2017.
- [10] R. Merzouki, A.K. Samantaray, P.M. Pathak, B. Ould Bouamama, Intelligent Mechatronic Systems: Modeling, Control and Diagnosis, Springer Publishing Company, Incorporated. 2013.
- [11] P. J. Gawthrop, R. W. Jones, Bond-graph based adaptive control, In Proceeding of IFAC Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Vol. 25, Issue 14, pp. 67-72, Grenoble, France, 1-3 July, 1992.

- [12] S. Junco, Stability Analysis and stabilizing control Synthesis via Lyapunov's second Method Directly on bond graphs of nonlinear systems, In Proc. of IEEE Conference, IECON'93, 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 2065-2069, Maui, HI, USA, Nov. 17-20, 1993.
- [13] P.J. Gawthrop, Bicausal bond graphs, In Proc. of ICBGM'95, Simulation series, vol. 27, pp. 83-88, Las Vegas, Nevada, USA, 15-18, January, 2005.
- [14] S.-T. Wu, K. Youcef-Toumi, On relative degrees and zero dynamics from system configuration, Proc. of The American Control conference, pp. 1025-1029, San Francisco, CA, USA, Jun 2-4, 1993.
- [15] S.-T. Wu, K. Youcef-Toumi, On relative degrees and zero dynamics from physical system modeling, Journal of dynamic systems, measurement, and control, Vol. 117, pp. 205-217, Jun 1995.
- [16] R. F. Ngwompo, S. Scavarda, A.D. Thomasset, Physical interpretation of zero dynamics for linear SISO control systems, In Proc. of IFAC Control of Industrial Systems, Vol. 30, Issue 6, pp. 127-131, Belfort, France, May 20-22, 1997.
- [17] R. F. Ngwompo, S. Scavarda, A.D. Thomasset, Physical model-based inversion in control systems design using bond graph representation. Part 1: Theory, Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 215, N°2, pp. 95-104, 2001.
- [18] R. F. Ngwompo, S. Scavarda, A.D. Thomasset, Physical model-based inversion in control systems design using bond graph representation. Part II: Applications, , Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 215, N°2, pp. 105-112, 2001.
- [19] S.Y. Huang, K. Youcef-Toumi, Zero dynamics of nonlinear MIMO systems from system configurations. A bond graph approach, Proc. of IFAC 13th triennial world congress, Vol. 29, Iss. 1, pp. 4392-4397, San Francisco, USA, 30 June - 05 July, 1996.
- [20] S.Y. Huang, K. Youcef-Toumi, Zero dynamics of physical systems from bond graph models- Part I: SISO systems, J. Dyn. Sys. Meas. & Control., vol. 121, N°1, pp. 10-17, Mar 1999.
- [21] S.Y. Huang, K. Youcef-Toumi, Zero dynamics of physical systems from bond graph models- Part II: MIMO systems, J. Dyn. Sys. Meas. & Control., vol. 121, N°1, pp. 18-26, Mar 1999.
- [22] S. Junco, A Bond graph Approach to control systems synthesis, In Proc. of ICBGM'2001, Vol. 33, N°1, pp. 125-130, Phoenix, USA, Jan, 2001.

- [23] S. Junco, Lyapunov second method and Feedback stabilization directly on bond graphs, In Proc. of ICBGM'2001, Vol. 33, N°1, pp. 137-142, Phoenix, USA, Jan, 2001.
- [24] S. Junco, G. Garnero, A. Donaire, Suivi de trajectoire de vitesse du moteur série à CC : une approche Bond Graph, In Proc. du Conf. Int. Francophone d'Automatique, CIFA'2002, pp 400 – 405, Nantes, France, 8-10 Juillet, 2002.
- [25] S. Junco, C. Sueur, G. Dauphin Tanguy, A Bond graph approach to flatness-based cascade control of Nonlinear DC Motor, In Proc. of ICBGM'03, SCS simulation series, vol. 35, N° 2, pp. 274-282, January, 2003.
- [26] S. Junco, Virtual Prototyping of bond graphs Models for controller Synthesis through Energy and power shaping, In Proc. of Int. Conf. on Integrated Modeling & Analysis in Applied control & Automation, pp. 100-109, Genoa, Italy, Oct. 28-31, 2004.
- [27] S. Junco, A. Donaire, BG-supported synthesis of speed and position Tracking controllers for Brushless DC Motors Drives, In Proc. of ICBGM'2005, Vol. 37, pp.245-251, New Orleans, Louisiana, USA, January 23-27, 2005.
- [28] S. Junco, A. Donaire, A. Achir, C. Sueur, G. Dauphin-Tanguy, Non-linear control of a series direct current motor via flatness and decomposition in the bond graph domain, Proc. of Imecht, Part 1: J. of systems and control engineering, Vol. 219, pp. 215-230, 2005.
- [29] M A. Nacusse, S. Junco, Passive fault tolerant control: A bond graph Approach, Proc. of the Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied control and Automation (IMAACA'2011), pp. 75-82, Rome, Italy, September 12-14, 2011.
- [30] M. A. Nacusse, Junco S., Bond-Graph based controller Design of a Two-Input Two-output Four Tank system, Proc. of the Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied control and Automation (IMAACA'2013), pp. 87-96, Athens, Greece, September 25-27, 2013.
- [31] D. Alazard, C. Cumer, P. Apkarian, M. Gauvrit, G. Ferreres, Robustesse et commande optimale, Cépaduès éditions, Toulouse, France, 1999.
- [32] S. Junco, Trajectory tracking on bond graphs. Procedures and applications to DC electrical drives, In Proc. of the 13th European simulation symposium, simulation in industry, ESS'01, pp. 799-805, Marseilles, France, Oct. 18-20, 2001.

- [33] I. Dif, K. Benmahammed, A. Kouzou, A. Hafaifa, Bond Graph Synthesis Backstepping Control of Mass-Damping System, In Proc. of The second International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics ICAID'2017, Djelfa, Algeria, 16-17 Sept., 2017.
- [34] I. Dif, A. Kouzou, K. Benmahammed, A. Hafaifa, A., Trajectory Tracking Control Design of a Mass-Damping-Spring System with Uncertainty using the Bond Graph Approach, In Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 10, N° 6, pp. 6427-6431, 2020.
- [35] B. Samanta and S. Devasia, "Modelling and control of flexible manipulators using distributed actuators: a bond graph approach", Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 99-104, Tokyo, Japan, Oct. 31- Nov. 02, 1988.
- [36] M. Jamei, M. Mahfouf, D.A. Linkens, Fuzzy- based controller of Nonlinear Quarter car suspension system, In Proc. of the 7th Iranian students seminar in Europe (ISS 2000), UMIST, Manchester, UK, 2000.
- [37] M. Jamei, M. Mahfouf, D.A. Linkens, Elicitation and fine-tuning of fuzzy control rules using symbiotic evolution, Fuzzy sets and systems, Vol. 147, pp. 57-74, 2004.
- [38] C.H. LO, Y.K. Wong, A.B. Rad, & Simulation of Qualitatif bond graph Model using Fuzzy Arithmetics, In Proc. of ICBGM'2003, pp. 9-14, Odando, Florida, USA, 19- 23 January, 2003.
- [39] M. Mahfouf, M. Jamei, D.A. Linkens, Rule-Base generation via Symbiotic evolution for a Mamdani-Type Fuzzy control systems, In Proc. of the 18th IEEE Conf. on Fuzzy systems, Vol. 1, pp. 396-399, Melbourne, Victoria, Australia, Dec. 2-5, 2001.
- [40] Jr. J. H. Lumker, F.J. Fronczak, Design, Simulation, and Validation of a bond graph model and controller to switch between pump and motor operation using Four ON/OFF valves with a hydraulic axial Piston pump motor, In Proc. of the American control conference (ACC), pp.3605-3609, Chicago, Illinois, USA, June, 2000.
- [41] I. Dif, M. Khemliche, Modélisation par bond graph d'une suspension active de véhicule, Proceedings du Séminaire National sur l'Automatique et les Signaux, SNAS'2002, Annaba, Algérie, 27-28 Octobre 2002.
- [42] M. Khemliche, I. Dif, S. Latreche, B. Ould Bouamama, Modelling and analysis of an active suspension 1/4 of vehicle with bond graph, Proc. of The 1st International Symposium on Control, Communication and Signal Processing, ISCCSP'2004, pp. 811-814 Hammamet, Tunisia, 21-24 March 2004.

- [43] J.V. Amerongen, Modelling, Simulation and controller Design for Mechatronic systems with 20-sim 3.0, In International conference on Mechatronic systems, IFAC Proceedings volumes, Darmstadt, Germany, vol. 33, Issue 26, pp. 763 768, September, 2000.
- [44] A.M. Mughal, K. Iqbal, H_{∞} controller synthesis for a Physiological Motor control System Modeled with Bond graph, In Proc. of IEEE Int. Conf. on control Applications, pp. 947-952, Munich, Germany, October 4-6, 2006.
- [45] L. Clemen, O.M. Anubi, D. Margolis, On the regenerative capabilities of electrodynamic dampers using bond graphs and model predictive control, Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 138, N° 5, paper: 051006 (7 pages) , May 2016.
- [46] P.Y. Richard, C. Morvan, J. Buisson, Cormerais H., Sliding mode control of Hybrid systems modeled using bond graph with ideal switches, In Proc. of ICBGM'2003, Simulation Series Vol. 35, N°2, pp. 175-181, Orlando, Florida, USA, January 19-23, 2003.
- [47] J. Zhao, A. Song, B. Zhu, Z. Chen, Y. Sun, Nonlinear Backstepping control of Electro-hydraulic Brake system based on bond graph models, IEEE Access, Vol. 8, pp. 19100-19112, 2020.
- [48] S. Skjong, E. Pedersen, Model-based control designs for offshore hydraulic winch systems, Ocean Engineering, Elsevier, Vol. 121, pp. 224-238, 2016.
- [49] A. I. GAL, L. Vladareanu, R. I. Munteanu, Sliding motion control with Bond graph modeling applied on Robot leg, Revue Roumaine en science et Technique, Electrotechnique et Energie, Vol. 60, No 2, pp. 215 224, Bucarest, 2015.
- [50] M. Ji, Z. Zhang, G. Biswas, N. Sankar, Hybrid Fault Adaptive control of a wheeled Mobile Robot, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 8, N°2, pp. 226-233, June, 2003.
- [51] M. Ji, Supervisory Fault Adaptive control of Mobile Robot, Master of science thesis in Mechanical Engineering, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA, December, 2003.
- [52] N. Tanasescu, Synthesis methodology for active element using impedances based bond graph methods, The Annals of “ Dunarea de Jos ”, University of Galati, Fascicle III, pp. 98-104, 2004.
- [53] D. Yang, C. Sueur, Input and state observer for LTV band graph models, In IFAC Proceedings volumes, Vol. 45, Issue 2, pp. 386-391, 2012.

- [54] D.M. Trajkovic, V.D. Nikolic, D.S. Antic, S.S. Nikolic, S. Lj. Peric, Application of the hybrid bond graphs and orthogonal. Rational filters in Sag voltage effect Reduction, *Elektronika ir Elektrotechnika*, Vol. 19, N° 6, pp. 25-30, 2013.
- [55] S.R. Sahoo, S.S. Chiddarwar, Mobile Robot control using bond graph and Flatness based Approach, *Procedia computer science*, Vol. 133, pp. 213-224, 2018.
- [56] T.-J. Yeh, Backstepping control in the physical Domain, In Proc. of the American control conference (ACC), pp. 24-28, San Diego, California, USA, June 1999.
- [57] T.-J. Yeh, Backstepping control in the physical Domain, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 338, pp. 455-479, 2001.
- [58] T.-J. Yeh, Controller synthesis for cascade systems using bond graph, *International Journal of systems science*, Taylor & Francis Group, Vol. 33, N°4, pp. 1161-1177, 2002.
- [59] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, *Nonlinear Adaptive control Designs*, Wiley New York, USA, 1995.
- [60] P.J. Cheng, K.P. Huang, Modeling and control of the CCEA robotic arm, In Proc. of IEEE Conf. on robotic & biomimetic, Phuket, Thailand, pp. 1171-1176, Dec 7-11, 2011.
- [61] C. Sueur, A. Rahmani, Analyse structurelle et commande des modèles bond graph, chapitre 8 dans le livre collectif bond graphs, sous la direction de Dauphin Tanguy G., Hermès Science publications, Paris, France, 2000.
- [62] S. Lichiardopol, C. Sueur, Decoupling of non-linear bond graph models, Proc. of IEEE Int. Conf. on Control App., pp. 2237-2242 Munich, Germany, Oct. 4-6, 2008.
- [63] D. Vink, Aspects of Bond Graph Modelling in control, PhD Thesis in Mechanical Engineering, University of Glasgow, UK, January 2005.
- [64] R. F. Ngwompo, S. Scavarda, A.D. Thomasset, Bond Graph methodology for the Design of an actuating system: Application to a two- link manipulator, In Proc. of IEEE Int. conf. on Syst., Man & cybernetic (SMC), Vol. 3, pp. 2478 -2483, Orlando, USA, Oct 12-15, 1997.
- [65] D.W. Roberts, D.S. Ballance, P.J. Gawthrop, Design and Implementation of a Bond graph Observer for Robot control, CSC Research Report, CSC 95004, University of Glasgow, UK, 1995.

- [66] C. Pichardo-Almarza, A. Rahmani, G. Dauphin Tanguy, M. Delgado, Proportional Integral observer for systems modelled by bond graph, In Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 13, pp. 179 -211, 2015.
- [67] L. Yu and X. Qi, Bond-graph modeling in system engineering, In Proc. of The International Conference on Systems and Informatics (ICSAI'2012), pp. 376-379, Yantai, Shandong, China, May 19-20, 2012.
- [68] B.V. Controllab, 20-sim3.0, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1999.
- [69] F. Benslimane, F. Bounaama, B. Draoui, Bond Graph Modelling and control of a single zone Building in a semi-Arid Region for thermal Comfort, In Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal sciences, vol. 61, Issue 4, pp. 94-105, 2019.
- [70] B. Decotte, J. LeFevre, G. Dauphin-Tanguy, Neural Networks using Bond Graphs structure for model identification, In Proc of ICBGM, Vol. 33, N°1, pp. 21-26, Phoenix, Arizona, USA, Jan 7-11, 2001.
- [71] Z. Fan, K. Seo, R. Rosenberg, J. Hu, E. Goodman, Exploring Multiple design Topologies using genetic programming and Bond graph, In Proceedings of 4th Annual conf. on Genetic and Evolutionary computation, SECCO'02, pp. 1073 – 1080, San Francisco, CA. USA, July, 2002.
- [72] M. Fliess, J. Levine, P. Martin, P. Rouchon, Flatness and Defect of nonlinear systems - Introductory Theory and Examples, In Int. journal of control, vol. 61. No. 6, pp. 1327-1361, 1985.
- [73] P.Y. Richard, J. Buisson, H. Cormerais, Analysis of flatness using bond graph and bicausality, In IFAC Proc. of 15th Triennial world congress, pdf paper N° 376.pdf, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.
- [74] P.Y. Li, R. F. Ngwompo, Passification of electrohydraulic valves using bond graphs, In IFAC Proc. of 15th Triennial work congress, Barcelona, Spain, pdf paper, 2961, July 21-26,2002.
- [75] A. Achir, S. Junco, A. Donaire, C. Sueur, A Bond Graph. Method for Flatness - Based Dynamic Feedback linearization controller synthesis: Application to a current-Fed Induction motor, In Proc. of 20th European conference Modeling and Simulation, 2006.
- [76] J. Garcia-Gomez, S. Rimaux & M. Delgado, Bond Graphs in the Design of Adaptive Passivity-Based Controllers for DC/DC Power Converters, 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 132-137, Mumbai, India, 15-17 Dec., 2006.

[77] Y. Touati, R. Merzouki, B. Ould Bouamama, Fault estimation and isolation using bond graph approach, In the 8th IFAC Symposium on Faults detection, supervision and safety of technical processes (SAFEPROCESS), pp. 138-143, Mexico City, Mexico, Aug 29-31, 2012.

[78] Y. Lounici, Y. Touati, S. Adjerid, Bond graph model-based fault estimation in presence of uncertainties: Application to mechatronic systems, In Proc. of the 2nd Int. workshop on Signal processing applied to rotating machinery diagnostics, SIGROMD'18, paper: ID-30, Djelfa, Algeria, April 29-30, 2018.

[79] G. Dauphin-Tanguy, Sensitivity analysis of linear inverse models to parameter uncertainty, In Proc. of the 22nd European conference on modeling and simulation, pp. 464-470, Nicosia, Cyprus, June 3-6, 2008.

[80] A. Derkaoui, Dimensionnement pour des critères dynamiques et énergétiques des systèmes mécatroniques comportant des sous-systèmes à paramètres répartis : approche par méthode inverse, Thèse de doctorat en Automatique industrielle, INSA de Lyon, France, 2005.

[81] M. El Feki, Analyse et synthèse de tolérance pour la conception et le dimensionnement des systèmes mécatroniques, Thèse de doctorat en Energie et systèmes, Ecole centrale de Lyono, France, 2011.

[82] V.H. Nguyen, D. Eberard, W. Marquis-Favre, L. Krahenbuhl, Tolerance synthesis using bond graph inversion and fuzzy logic, In Proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronic (ICM'2013), pp. 442-447, Vicenza, Italy, Feb 27-Mar 1, 2013.

[83] D. Mosiek, Procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graphs, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1999.

[84] V.H. Nguyen, Synthèse de tolérance pour la conception des systèmes mécatroniques : Approche par bond graph inverse, Thèse de doctorat Automatique/Robotique, INSA Lyon, France, 2014.

[85] C.S. Kam, G. Dauphin-Tanguy, Bond graph tools for standard interconnection structure determination, In Proc. of ICBGM'01, Simulation Series, Vol. 33, N°1, pp. 33-40, Phoenix, AZ, USA, Jan. 2001.

[86] W. Borutzky, J. Granda, Determining sensitivities from an incremental true bond graph, In J. J. Granda and G. Dauphin-Tanguy (Eds) International Conference on Bond Graph Modeling, and

Simulation (ICBGM'2001), Phoenix, Arizona, USA, Simulation Series 33 No. 1 SCS Publishing pp. 3 – 8, January 7-11, 2001.

[87] W. Borutzky, G. Dauphin-Tanguy, Incremental bond graph approach to the derivation of state equations for robustness study, *Simulation modelling practice and theory*, Vol. 12, Issue 1, pp 41-60, 2004.

[88] C.S. Kam, G. Dauphin-Tanguy, Bond graph models of structured parameter uncertainties, *J. Franklin Inst*, Vol.342, Issue.4, p.379-399, 2005.

[89] G. Dauphin-Tanguy, C. S. Kam, P. Kubiak, Uncertainties in multiport elements, In *Proc. of The ICBGM'03*, pp. 32-37, Orlando, Florida, USA, Jan. 19-23, 2003.

[90] A. K. Mishra, R. Raina, S. BahadurYadav, A. Verma, S. Sarangi, A. Saha, Modeling and Simulation of Levitating Ball by Electromagnet using Bond Graph, *Proc. of the 1st Int. &16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, pp. 42-47, IIT Roorkee, India, Dec 18-20, 2013.

[91] M. Uddin, A.S. Siddiqui, A.K. Sharma, J.P. Gupta, A multi-level fuzzy rule based control strategy for maglev system, *EPE Journal*, Vol.10, N°1, pp. 26-31, 2000.

[92] N.R. Calchand, Modeling and control of magnetic shape memory alloys using port-hamiltonian framework, *Thèse de doctorat d'Automatique de l'université de Franche-Comté, Besançon, France*, 2014.

[93] D. Grivon, Design, Modelling and sensing possibilities of magneto-rheological based devices, *Thèse de doctorat en Robotique, contrôle et systèmes intelligents, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, Février 2017*.

[94] D. Vischer, H. Bleuler, Self-sensing active magnetic levitation, In *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 29, N°2, pp. 1276-1281, March 1993.

[95] R.G. Longoria, Magnetic circuits and device modeling, modeling of physical systems course at Department of mechanical engineering, University of Texas at Austin, USA, 2002.

[96] D.C. Karnopp, D.L. Margolis, R.C. Rosenberg, *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*, 5th edition, John wiley & sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2012.

- [97] R. Hayoun, I. Dif, S. Amara, M. Khemliche, M. Mostefai, Modélisation par bond graph d'une suspension électromagnétique (MagLev), Proc. du 3^{ème} Conf. sur le génie électrique CGE'03, Ecole Militaire Polytechnique, , Bordj Elbahri, Alger, Algérie, 15-16 Février 2004.
- [98] S. Das, M. Krishnan, S.A. Yost, K. Zimmerman-Oster, Advanced mechatronics: Development of a course on modeling and simulation of mechatronic systems, In Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition. Portland, OR, United States: American Society for Engineering Education, Chantilly, pp. 283-298, 2005.
- [99] C. Nițu, S. Nițu, B. Grănescu, Electromagnetic actuator modeling for modular robotics applications, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10, N° 5, pp. 1137-1142 , May 2008.
- [100] C. Nițu, B. Grănescu, M. Avram, Bond graphs modelling of electromagnetic actuators, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2017, Issue 1, pp. 118-123.
- [101] R.C. Rosenberg, State-space formulation for bond graph models of multiport systems, Journal of dynamics systems, measurement, and control, Vol. 93, N°1, pp. 35-40, Mar 1971.
- [102] H. Bleuler, D. Vischer, G. Schweitzer, A. Traxler, D. Zlatnik, New concepts for cost-effective magnetic bearing control, Automatica, Vol. 30, Issue 5, Pages 871-876, May 1994.
- [103] R.-J. Wai, J.-D. Lee, Backstepping based levitation control design for linear magnetic levitation rail system, IET Control theory Appl., Vol. 2, N° 1, pp. 72-86, 2008.
- [104] A.K. Mishra, R. Kumar, S. Sarangi, Mathematical modeling of electromagnetic levitation based active suspension using bond graph, Applied mechanics and materials, Vol. 575, pp. 785-789, 2014.

ANNEXE

Bond Graph Synthesis Backstepping Control of Mass-Damping System

Ismail Dif¹, Khier Benmahammed², Abdallah Kouzou¹, Ahmed Hafaifa¹

¹ Applied Automatic and Industrial Diagnostic Laboratory, , Electrical Engineering Department, Faculty of Science and Technology, University of Djelfa, BP 3117 road of Moudjbara, Djelfa 17000, Algeria

difismail@yahoo.fr

² Intelligent Systems Laboratory, Electronics Department, Faculty of Technology, University of Setif 1, road of Bejaia, Maabouda city, Setif 19000, Algeria

khierben@yahoo.com

Abstract. This paper deals with the design of a backstepping control law for a physical system which is modeled by the bond graph. This control strategy is based on the inversion of the system through their causal input/output (I / O) path using the principle of bicausality to track the desired trajectory. For the validation of the proposed control strategy, an application is performed on a simple mechanical system of mass-spring-damper. However, this proposed control can be applied in several applications and can be improved to ensure their efficiency.

Keywords: Bond graph, Backstepping control, Inverse system.

1 Introduction

Papers The bond graph modeling is a powerful tool for modeling multidisciplinary physical systems which knows an interesting development based on its graphic and algebraic characteristics for the analyze of the system properties, the synthesis of the control laws or algorithms for monitoring systems.

This work goes into designing a backstepping control law by using bond graph models, based on the application of the control law introduced by Junco (Junco et al. 2002).

The present paper is organized as follows: a brief on the concept of modeling bond graph is presented in section 2, followed by bicausality in bond graph, intro-

duced by Gawthrop (Gawthrop 1995), which is used for the inversion of systems. Then in section 3, the design of the backstepping control procedure for a mechanical system is presented. In this paper the software 20-sim version 2.3 (Controllab 1998) is used for the simulation and the validation of the proposed control.

2 Bond Graph Modeling

2.1 Principle

The Bond graph methodology for modeling physical systems was introduced by H. Paynter in 1961 (Paynter 1961), and formalized by Karnopp and Rosenberg (Karnopp and Rosenberg 1975) and Thoma (Thoma 1975) thereafter. It is based on energy conservation principle between interconnected physical systems. It formalizes the transfer of power in different parts of the physical system, represented by a graphical link of half-arrow (Fig. 1), and which is modeled by the product of two conjugate variables that form the power, the effort and flux:

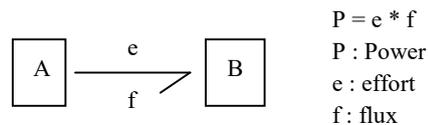


Fig. 1 Power transfer between systems A and B

All phenomena in a physical system can be modeled by their characters as a power producer (or active elements as effort source S_e or flow source S_f), power consumer (or passive elements such phenomenon of resistance element R , storage of energy, I element or element C), power transformer (direct transformation, TF element or mixed transformation, element GY) or conservative power (0 junction in common effort or junction 1 common flow).

The bond graph modeling of such physical system always goes through the following steps:

1. Word Bond graph for which is the abstract modeling of the system, it dividing it into sub-systems interconnected by graphic links ;
2. A causal Bond graph model: that is the representation of physical phenomena by bond graph elements, with the connecting elements in the direction of power transfer ;
3. Causality application: that is the mathematics of bond graph modeling. It is the representation of cause and effect between interconnected systems. It presents with a perpendicular stroke to bond representing the direction that the effort is known (Fig. 2). It is covered by means of selected assignment rules (Borne et al. 1992).

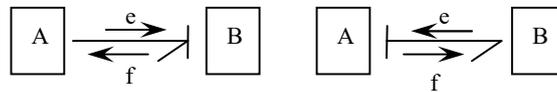


Fig. 2 Causality in bond graph

Like all modeling methods, the bond graph model also allows to its models to switch to other forms of modeling such as: block diagram, the state space or transfer function (Borne et al. 1992, Dauphin-Tanguy 2000), as based on the structural properties and the graphical methods.

2.2 Application

To illustrate this methodology much more, the following mechanical system is presented (Fig. 3) to be modeled by bond graph:

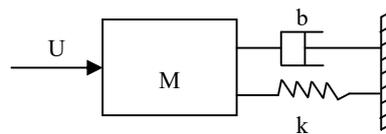


Fig. 3 Mass-spring-damper system

Following the modeling steps by bond graph, the bond graph model of this system can be presented as shown in Fig. 4.

The junction "1" shown in Fig. 4 shows the movement of the system speed, due to the force "U" applied to the "M" mass which is modeled by inertia "I", as a system input. The output is represented by a flow sensor "Df", which is a speed sensor. The shock absorber and spring are modeled by an element "R" and "C" respectively.

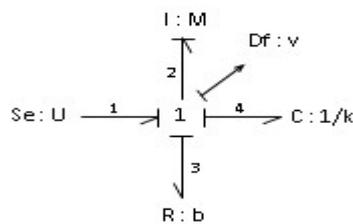


Fig. 4 Bond graph model for Application

The state-space model for this system can be deduced from its bond graph model, using the following procedure (Borne et al. 1992, Dauphin-Tanguy 2000):

1. Writing the structural laws associated with the junctions ;
2. Writing the constitutive laws of the elements connected to the junctions;
3. Combining different laws for obtaining the state-space.

The state vector " $x(t)$ " is composed of the energy variables " p " and " q " for the elements " I " and " C " in integral causality. The application of this procedure gives the following state equations:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1)$$

with

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{b}{M} & -k \\ \frac{1}{M} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \end{bmatrix}, D = 0 \quad (2)$$

2.3 Bicausal Bond Graph

The concept of bicausality in bond graph is introduced by P. Gawthrop in 1995 (Gawthrop 1995). It is used for the design of the inverse model of a system modeled by bond graph. It is also used to estimate the parameters of such a model and/or to estimate its state evolution.

In causality, the causal stroke indicates the direction where the effort is known, while in the bicausality, the causal stroke is divided into two strokes, top and bottom, perpendicular in the two side of the bond. The top line indicates the direction of effort and flow, while the lower line indicates the source of the effort and flow. Fig. 5 shows the difference between causality and bicausality.

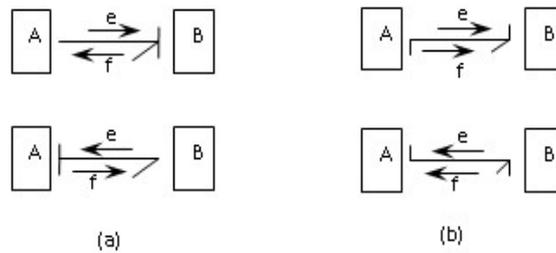


Fig. 5 Bond graph (a) Causality vs. (b) Bicausality

3 Backstepping Control Synthesis

The synthesis of a control law generally based on a model which describes the behavior of the studied system, while physical systems varies from linear to non-linear and non-variant or variants in time, therefore, there several control techniques that can be found in the literature.

Among the control techniques of nonlinear systems, the backstepping control is found, inspired by Kokotović for the 1st time in 1992 (Kokotović 1995) and subsequently developed by several researchers (Hassan 2002), and it has known several application areas, such as the control of the active vehicle suspension (Lin and Kanellakopoulos 1997).

The use of bond graph for the design of the backstepping control revealed in 1999 in the work of Yeh (Yeh 1999) where several developments and applications have been presented (Yeh 2001, Yeh 2002, Vink 2005, Cheng and Huang 2011). It is based on the addition of a target multiport component which is composed of bond graph elements; it shows the effect of closed loop control by backstepping.

Another use of the bond graph tool for the design of the backstepping law for tracking trajectory problems (Junco et al. 2002, Junco and Garnero 2002, Junco and Donaire 2005). It uses splitting bond graph model in several blocks interconnected, and by the principle of inversion of I / O system, the control law is calculated by backstepping for each block to the main input block, which represents the input law system.

This control technique, initiated by Junco et al. (Junco et al. 2002), is based on the application of an algorithm of five (05) steps, allows finding the control law for each junction block along the causal I / O path. The algorithm steps can be grouped in the following table:

Table 1. Steps for the design of Backstepping law control.

Steps	Operation
<u>Step 1</u> : Causal inversion	Inversion of I/O minimal causal dynamic path bond graph model using the bicausality
<u>Step 2</u> : Inverse Equation	Derivation on bond graph model the minimum dynamic equation I/O (<i>mde</i>), which presents the error
<u>Step 3</u> : Output substitution	Output substitution in <i>mde</i> : $y(t)=y^*(t)-e(t)$
<u>Step 4</u> : Error Dynamics	Constraining the error dynamic : $\dot{e}(t) = -k * e(t)$
<u>Step 5</u> : Error substitution	Error substitution by its definition : $e(t)=y^*(t)-y(t)$

with $y(t)$: the system output, $y^*(t)$: the desired output or trajectory

By applying the above procedure on the bond graph model of Fig. 4, the steps can be described as follow:

Step 1: Bond graph inversion, which is to build the inverse model I / O along the causal path I / O, as shown in the following figure:

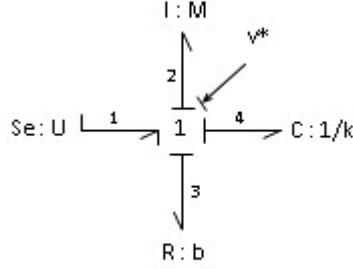


Fig. 6 Inverse bond graph Model

Step 2: Derivation of the (*mde*) following the inversion equation, the virtual input is obtained as follows:

$$u = b.v + M.\frac{dv}{dt} + \frac{1}{C} \int v dt \quad (3)$$

Step 3: Output substitution, the error of the output is defined as follows:

$$e_v = v^* - v \quad (4)$$

which leads to the equation:

$$u = b(v^* - e_v) + M.\dot{v}^* - \dot{e}_v + \frac{1}{C} \int (v^* - e_v) dt \quad (5)$$

Step 4 : Error dynamics, the dynamics of the error is defined as a 1st order equation (integrator):

$$\dot{e}_v + k_v e_v = 0, \quad \text{with } k_v > 0 \quad (6)$$

where equation (5) becomes:

$$u = b(v^* - e_v) + M.\dot{v}^* + k_v e_v + \frac{1}{C} \int (v^* - e_v) dt \quad (7)$$

Step 5: Error substitution, using equation (4) into equation (7) yields to the following equation:

$$u^* = (b - Mk_v)v + \frac{1}{C} \int v dt + M.\dot{v}^* + M.k_v.v^* \quad (8)$$

The last relation (8) is the relationship of the control input by backstepping, so that the output "v" follows the reference "v*", with a well appropriate choice of constant "k_v" for a better solution.

In application of this technique using 20-sim version 2.3, which allows the simulation of systems modeled by bond graph, and using these available toolboxes, the bond graph model of the presented system is implemented (Fig. 4) and the control law developed by backstepping relation (8), the following graph are obtained (Fig. 7), for a speed with square trajectory and the values of the parameters of the normalized systems and a choice of $k_v = 200$.

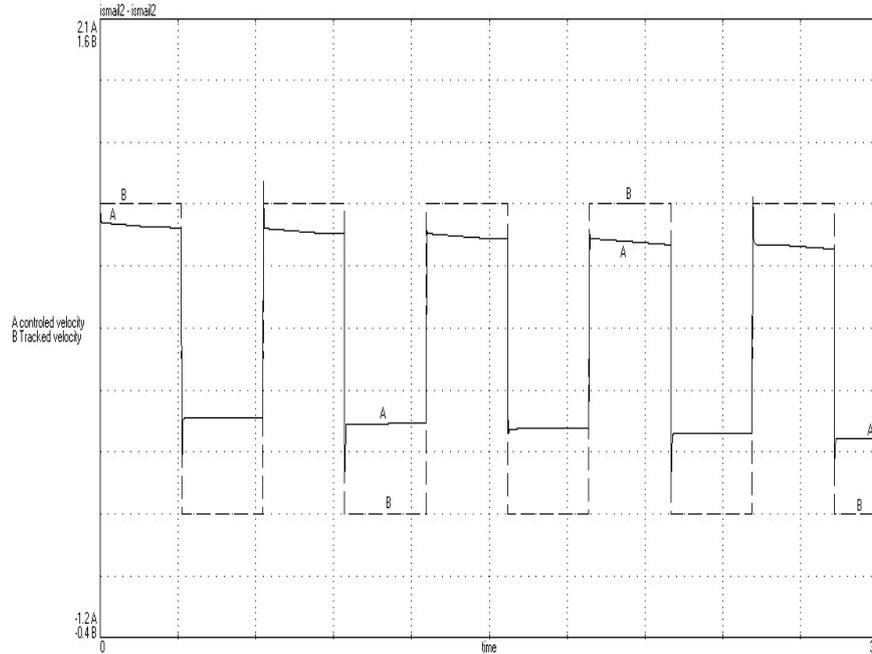


Fig. 7 Backstepping control simulation

The graph in Fig. 7 shows that the system tracks well the desired path through the control technique.

5 Conclusion

In this paper, the main aim is to design a backstepping control against the based on the bond graph tool modeling. Indeed it is proved in this paper that the bond graph is a powerful tool for modeling dynamic system to ensure the analysis of physical systems interconnected, and also very efficient for the design of control laws. The present simulation result shows clearly the effectiveness of the proposed and designed controller of the presented application. On the other side, the pro-

posed control algorithm can be improved to be a promising solution for several industrial control applications.

References

- Borne P, Dauphin-Tanguy G, Richard J P, Rotella F, Zambettakis I (1992) Modélisation et identification des processus. T2, Eds Technip, Paris, France
- Cheng P J, Huang H P (2011) Modeling and control of the CCEA robotic arm. Proc IEEE Int Conf Robot Biometrics, Phuket, Thailand, 1171-1176
- Controllab Products B V (1998) 20-Sim version 2.3. University of Twente in enschede, The Netherlands.
- Dauphin-Tanguy G (2000) Les Bond graphs. Eds Hermes, Paris, France.
- Gawthrop P J (1995) Bicausal bond graphs. Proceedings of 2nd International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation. LasVegas, USA, January, 1995, SCS Simulations Series, Vol. 27, pp. 83-88.
- Hassan K.K. (2002) Nonlinear systems. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey USA
- Junco S, Donaire A (2005) BG-supported synthesis of speed-and position-tracking controllers for brushless DC-motor drives. Proc Int Conf Bond Graph Mod Sim, New Orleans, Louisiana, USA,245-251
- Junco S, Donaire A, Garnero G (2002) Speed control of series DC motor: A bond graph based backstepping design. Proc IEEE Int Conf Sys Man Cyber Hammamet, Tunisia, 6
- Junco S, Garnero G, Donaire A (2002) Suivi de trajectoire de vitesse du moteur série à courant continu : une approche bond graph. Proc Conf Int Francophone Auto, Nantes, France, 400-405
- Karnopp D C, Rosenberg R C (1975) System dynamics: A unified approach. John Willey & Sons, New York, USA
- Kokotović P V (1992) The joy of feedback. Nonlinear and adaptive. IEEE Control systems magazine, 12: 7-17
- Lin J S, Kanellakopoulos I (1997) Nonlinear design of active suspensions. IEEE Ctrl sys mag 17: 3:45-59
- Paynter H M (1961) Analysis and design of engineering systems. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Thoma J U (1975) Introduction to bond graphs and their applications. Pergamon Press, Oxford, USA
- Vink D (2005) Aspects of bond graph modelling in control. Dissertation, University of Glasgow, UK
- Yeh T J (1999) Backstepping control in the physical domain. In Proc of The ACC, San Diego California, USA, 24-28
- Yeh T J (2001) Backstepping control in the physical domain. J Franklin Inst, 338: 455-479
- Yeh T J (2002) Controller synthesis for cascade systems using bond graphs. Int J Sys Sci, Taylor & Francis Group 33:14:1161-1177

Trajectory Tracking Control Design of a Mass-Damping-Spring System with Uncertainty using the Bond Graph Approach

Ismail Dif

Electrical Engineering Department
LAADI Laboratory
University of Djelfa
Djelfa, Algeria
difismail@yahoo.fr

Khier Benmahammed

Ferhat Abbas University Setif 1
LSI Laboratory
Setif, Algeria
khierben@ieee.org

Abdallah Kouzou

Electrical Engineering Department
LAADI Laboratory
University of Djelfa
Djelfa, Algeria
kouzouabdallah@yahoo.fr

Ahmed Hafaiifa

Electrical Engineering Department
LAADI Laboratory
University of Djelfa
Djelfa, Algeria
hafaiifa@hotmail.com

Abstract-This paper deals with the simulation, and design of a trajectory-tracking control law for a physical system under parameter uncertainty modeled by a bond graph. This control strategy is based on the inversion of the system through their causal Input/Output (I/O) path using the principle of bicausality to track the desired trajectory. The proposed control strategy is validated with the use of a simple mechanical mass-spring-damper system. The results show that the bond graph is a very helpful methodology for the design of control laws in the presence of uncertainties. This proposed control can be applied in several applications and can be improved to ensure robust control.

Keywords-bond graph; trajectory-tracking; bicausality; inverse system; uncertainty; 20-sim simulation

I. INTRODUCTION

Bond graph modeling is a rapidly developing powerful tool for modeling multidisciplinary physical systems with graphic and algebraic characteristics that help analyzing system properties and synthesizing control laws or algorithms for system monitoring. The work presented in this paper is based on the application of the control law introduced in [1] on a system modeled by a bond graph which was improved by the study of parametric uncertainties introduced in [2, 3] and the work in [3] regarding incremental bond graphs for the derivation of the state model for the study of robustness of bond graph models. These uncertainties are included by adding some bond graph elements which describe their effect in the system, as described in Section IV. This work consists of the design of a trajectory-tracking control law using uncertain bond graph models, in the same way as they are used in the development of diagnostic algorithms for industrial systems [5-

7]. Therefore, this work can represent a foundation stone for the design of robust control laws using bond graphs to ensure the control of complex systems.

II. BOND GRAPH MODELING

The bond graph methodology for modeling physical systems was first introduced in 1961 [10] and was formalized in [11, 12]. It is based on the principle of conservation of energy between interconnected physical systems. It formalizes the transfer of power in different parts of the physical system, which is represented by a graphical link of half-arrow (Figure 1), which is modeled by the product of two conjugate variables that form the power, the effort, and the flux. All phenomena in a physical system can be modeled by their characters: A power producer or active elements as effort source "Se" or flow source "Sf", power consumers or passive elements such as resistances with "R", energy storages with "I" or "C", power transformation with direct transformation, ("TF") or mixed transformation ("GY" or Gyrator), conservative power ("0" junction for common effort or "1" junction for common flow).

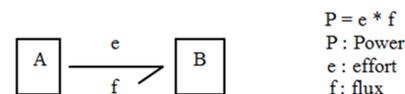


Fig. 1. Power transfer between systems A and B.

The bond graph modeling of such physical systems always goes through the following steps:

- The word bond graph, which is the abstract modeling of the system, dividing it into sub-systems interconnected by

graphic links.

- The causal bond graph model is the representation of physical phenomena by bond graph elements, with connecting elements in the directions of power transfer.
- The causality application is the mathematics of bond graph modeling. It is the representation of cause and effect between interconnected systems. It is represented with a perpendicular stroke to bond representing the direction that the effort is known (see Figure 2). It is covered through selected assignment rules [13].

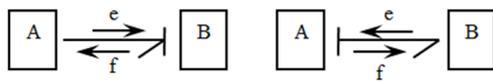


Fig. 2. Causality in bond graph.

As all modeling methods, the bond graph model allows its models to switch to other modeling forms such as block diagram, state space, or transfer function [13-14]. To better illustrate this methodology, the mechanical system and its bond graph model are presented in Figure 3.

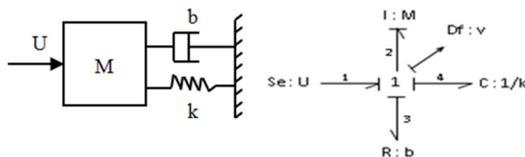


Fig. 3. Bond graph model of the mass-spring-damper system.

By following the bond graph modeling steps in Figure 3, the junction 1 shows the speed movement of the system, due to the force U applied to the mass M which is modeled by the inertia I, as system input or Se element. The output is represented by a flow detector Df, which is a speed sensor. The shock absorber and spring are modeled by R and C elements respectively. The concept of bicausality in a bond graph was introduced in 1995 [8]. It is used for the design of the inverse model of a system modeled by a bond graph. It is also used to estimate the parameters of such a model and/or to estimate its state evolution. In the causality concept, the causal stroke indicates the direction where the effort is known, while in the bicausality, the causal stroke is divided into two strokes, top and bottom, perpendicular to the two sides of the bond. The top line indicates the orientation of effort and flow, while the lower line indicates the source of the effort and flow. Figure 4 shows the difference between causality and bicausality.

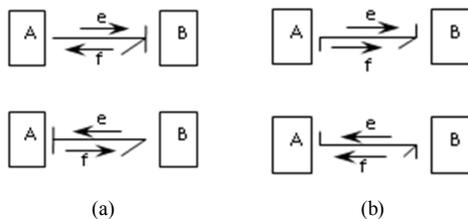


Fig. 4. Bond graph (a) causality vs. (b) bicausality.

III. TRAJECTORY-TRACKING CONTROL BY BOND GRAPH

The synthesis of a control law is generally based on a model describing the behavior of the system under study. Physical systems vary from linear [15] to non-linear [16] and may or may not vary in time with several control techniques to regulate or track trajectory, leading to several control laws which may be linear such as the LQR control [17], LQR control based on bond graph model [18], PID and Intelligent PID control [19], and nonlinear control in several techniques based on graphical model (bond graph) [20-21], mathematical model (CTC, VSC, backstepping, H_∞ , MPC, etc.) [22-24], or intelligent and meta-heuristic model optimization [19, 25-26], etc. [27-28]. In this paper, the tracking trajectory law is based in the technique initiated in [1] by the application of an algorithm of 5 steps which allows finding the control law for each junction block along with the causal I/O path. The algorithm steps are grouped in Table I.

TABLE I. TRAJECTORY-TRACKING LAW CONTROL DESIGN STEPS

Steps	Step name	Operations
Step 1	Causal inversion	Inversion of I/O minimal causal dynamic path in the bond graph model using the bicausality
Step 2	Inverse equation	Derivation on the bond graph model of the minimum dynamic equation I/O (<i>mde</i>), which presents the error
Step 3	Output substitution	Output substitution in <i>mde</i> : $y(t)=y^*(t)-e(t)$
Step 4	Error dynamics	Constraining the error dynamic: $\dot{e}(t) = -k * e(t)$
Step 5	Error substitution	Error substitution by: $e(t)=y^*(t)-y(t)$

$y(t)$: system output, $y^*(t)$: desired output or trajectory

By applying the above procedure on the bond graph model of Figure 3, the steps can be described as follows:

Step 1: Bond graph inversion, which is to build the inverse I/O model along the causal I/O path, as shown in Figure 5.

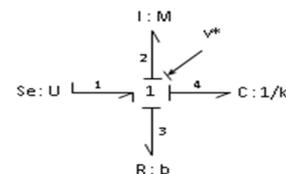


Fig. 5. Inverse bond graph model.

Step 2: Derivation of the (*mde*) following the inversion equation. The virtual input is obtained as:

$$U = b.v + M.\frac{dv}{dt} + \frac{1}{C} \int v dt \quad (1)$$

Step 3: Output substitution. The error of the output is defined as:

$$e_v = v^* - v \quad (2)$$

This leads to:

$$U = b(v^* - e_v) + M \cdot (\dot{v}^* - \dot{e}_v) + \frac{1}{C} \int (v^* - e_v) dt \quad (3)$$

Step 4: Error dynamics. The dynamics of the error is defined as a 1st order equation (integrator):

$$\dot{e}_v + k_v e_v = 0, \quad \text{with } k_v > 0 \quad (4)$$

where (3) becomes:

$$U = b(v^* - e_v) + M \cdot (\dot{v}^* + k_v e_v) + \frac{1}{C} \int (v^* - e_v) dt \quad (5)$$

Step 5: Error substitution. Using (2) into (5) yields (6):

$$U^* = (b - Mk_v)v + \frac{1}{C} \int v dt + M \cdot \dot{v}^* + M k_v v^* \quad (6)$$

Equation (6) is the relationship of the control input, so that the output v follows the reference v^* , with a well appropriate choice of constant k_v for a better solution. The application of this technique was done with the utilization of 20-sim [9] version 2.3 which allows the simulation of systems modeled by bond graphs. Using the available toolboxes, the bond graph model of the presented system is implemented (Figure 4) and with the control law developed by (6), the graph in Figure 6 is obtained for speed with square trajectory and a choice of $k_v=200$. The graph in Figure 6 shows that the system tracks well the desired path with the proposed control technique. In the next section, the uncertainty modeling parameters in a bond graph model are introduced and the control law for the uncertain model is recalculated.

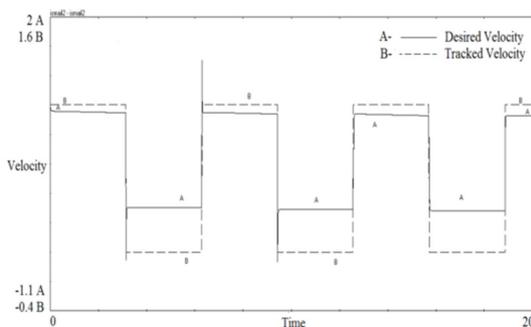


Fig. 6. Tracking-trajectory control simulation.

IV. UNCERTAINTY IN BOND GRAPH

The bond graph tool by its graphical character and its analytical and structural performances are also used to represent modeling uncertainties as action elements on the system bond graph model. The introduction of uncertainty addition [2, 3] was followed by [4]. This technique can be applied to the design of robust diagnosis algorithms of bond graph models [5-7]. In the literature, two types of consideration can be found on the study of uncertainties: structured and unstructured uncertainties [29]. The current work is focused in the second type, which includes modeling uncertainties of physical phenomena, such as additive and multiplicative uncertainty at the input or the output. In bond graph modeling,

both types of uncertainty (additive and multiplicative) are studied in [3], whereas in this work, the effect of input multiplicative uncertainty in the synthesis of control law is proposed. This is done using the standard interconnection model shown in Figure 7.

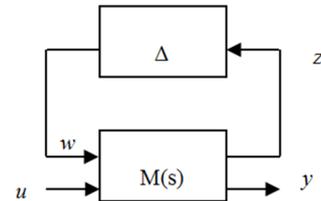


Fig. 7. Standard interconnection model.

The standard interconnection model can be represented by the following system of equations:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (7)$$

where x is the state vector, u the input vector, w the auxiliary input vector, z the auxiliary output vector, y the output vector, $M(s)$ is the nominal system, and Δ the diagonal uncertainty matrix, where $w = \Delta z$ with $\Delta = \text{diag}(\delta_i)$ and δ_i is the i^{th} parameter of the system.

In the bond graph model, only passive components (R, C, and I) are assumed and are subject to uncertainty with transformation elements (TF and GY). An example of the design of the standard interconnection model for the I element in integral causality, is presented as follows: the constitutive law of the I element in integral causality is:

$$f = \frac{1}{I} \int e dt \quad (8)$$

By introducing the term of the multiplicative error, it is found that:

$$f = \frac{1}{I_n} (1 + \delta_I) \int e dt \quad \text{With } \delta = -\frac{\Delta I}{I_n + \Delta I} \quad (9)$$

The bond graph model of the uncertain element I and in the last relation (9) gives the representation of Figure 8. By the addition of uncertainty on the I element of our model in Figure 3, the model in Figure 9 is obtained.

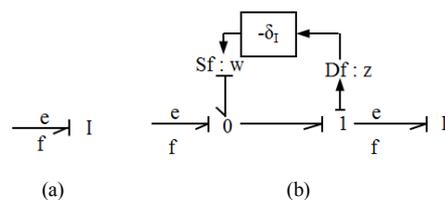


Fig. 8. Bond graph model of the element I: (a) nominal (b) with uncertainty.

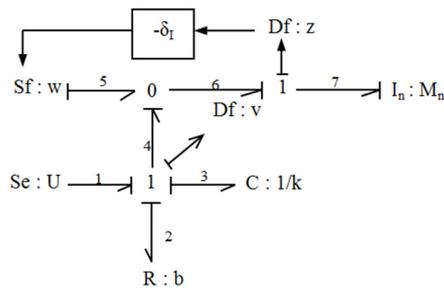


Fig. 9. Bond graph model with uncertainty.

V. DESIGN OF THE CONTROL LAW

By applying the control law design procedure stated above on the bond graph model with the uncertainty of the system presented in Figure 3, the following steps can be deduced.

Step 1: Bond graph model inversion. Applying the inversion procedure of the causal path input/output on our model, using the principle of bicausality, the following scheme is obtained:

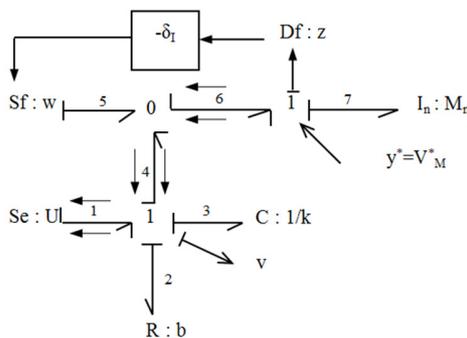


Fig. 10. Inverse I/O causal path.

Step 2: Derivation of the dynamic equation. Using the structural equations of junctions leads to:

- Junction 1: $v_M : e_6 = e_7$ with $e_7 = M_n \cdot \dot{v}_M$
- Junction 0: $f_4 = f_6 - f_5$ with:

$$\begin{cases} f_4 = v \\ f_6 = f_7 = v_M \\ f_5 = -v_M \cdot \delta_M \end{cases} \quad (10)$$

Hence:

$$v = (1 + \delta_M) \cdot v_M \quad (11)$$

- Junction 1: $v e_1 = e_2 + e_3 + e_4$ with:

$$\begin{cases} e_1 = U \\ e_2 = \frac{1}{C} \int v \cdot dt = k \int v \cdot dt \\ e_3 = b \cdot v \\ e_4 = e_6 = e_7 = M_n \cdot \dot{v}_M \end{cases} \quad (12)$$

Hence:

$$U = b \cdot v + M_n \cdot \dot{v}_M + k \int v \cdot dt \quad (13)$$

Replaces the speed v using (10) and (12) takes the following form:

$$U = b(1 + \delta_M) v_M + M_n \cdot \dot{v}_M + k(1 + \delta_M) \int v_M \cdot dt \quad (14)$$

Step 3: Output substitution. The output error is defined as:

$$e_{v_M} = v^*_M - v_M \Rightarrow v_M = v^*_M - e_{v_M} \quad (15)$$

This leads to the relation:

$$U = b(1 + \delta_M)(v^*_M - e_{v_M}) + M_n(\dot{v}^*_M - \dot{e}_{v_M}) + k(1 + \delta_M) \int (v^*_M - e_{v_M}) \cdot dt \quad (16)$$

Step 4: Error dynamics. The dynamics of the error is defined as a 1st-order equation (integrator):

$$\dot{e}_{v_M} + k_{v_M} e_{v_M} = 0 \text{ with } k_{v_M} > 0 \text{ then } \dot{e}_{v_M} = -k_{v_M} e_{v_M} \quad (17)$$

Equation (16) becomes:

$$U = b(1 + \delta_M)(v^*_M - e_{v_M}) + M_n(\dot{v}^*_M + k_{v_M} e_{v_M}) + k(1 + \delta_M) \int (v^*_M - e_{v_M}) \cdot dt \quad (18)$$

Step 5: Error substitution. Returning to (15) yields to (18):

$$U = [b(1 + \delta_M) - M_n k_{v_M}] v_M + M_n(\dot{v}^*_M + k_{v_M} e_{v_M}) + k(1 + \delta_M) \int v_M \cdot dt \quad (19)$$

which is the control law. The output v_M follows the desired trajectory v^*_M .

To validate the proposed control for this system, the control relation (19) is implemented on the 20-sim simulator, with a choice of nominalized values of parameters, and a value of k_{v_M} which allows reaching the control objective (tracking the trajectory of the desired speed), with a square-shaped signal, which for example simulates the motion of a rail traction chain. After choosing the uncertainty of the I element, which simulates additional load in a random form, the result shown in Figure 11 is found. The uncertainty of the presented case is chosen as random fluctuations bounded by the value (± 0.5) around the normalized nominal value. Figure 11 shows the desired trajectory (curve B) followed by the output of our system (curve A), which confirms the efficiency of the designed control to the uncertainties of the system parameters. The error between the desired and the tracked velocity is around 10% from the nominal value, which is accepted in a control law. The contribution of this work is in the use of graphical and algebraic properties of the bond graph tool for the design of the control law, when the model is in presence of uncertainties, without the need for mathematical equation derivation, such as used in [18, 20-21].

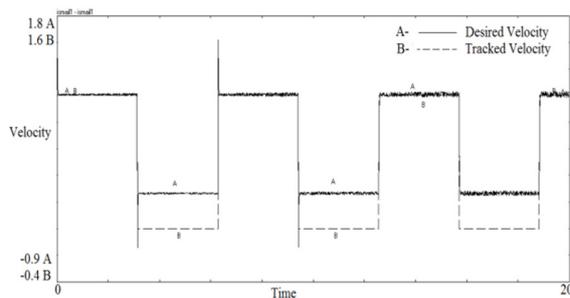


Fig. 11. Simulation result of designed control with 20-sim simulator.

For the implementation of this control law, a platform is needed that integrates bond graph models, such as the 20-sim software in later versions than the one used in this paper, which allow interaction with practical systems. We are working on the integration of bond graph models in embedded systems to use them in the design of control and diagnostic systems.

VI. CONCLUSION

The main aim of this paper was to design a robust tracking-trajectory control system which considers the uncertainties of system parameters, based on bond graph modeling. It has been proved that the bond graph is a powerful tool for modeling a dynamic system to ensure the analysis of interconnected physical systems. It is also very efficient for the design of control laws. The simulation results show the effectiveness and the robustness of the proposed and designed controller against parametric changes of the presented application. On the other side, the proposed control algorithm can be improved to be a promising solution for several industrial control applications.

REFERENCES

- [1] S. Junco, A. Donaire, and G. Garnero, "Speed control of series DC motor: a bond graph based backstepping design," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Yasmine Hammamet, Tunisia, Oct. 2002, vol. 3, <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1176035>.
- [2] C. S. Kam and G. Dauphin-Tanguy, "Bond graph tools for standard interconnection structure determination," in *Proceedings of the 2001 International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'01)*, Phoenix, AZ, USA, Jan. 2001.
- [3] C. Sié Kam and G. Dauphin-Tanguy, "Bond graph models of structured parameter uncertainties," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 342, no. 4, pp. 379–399, Jul. 2005, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2005.01.005>.
- [4] W. Borutzky and G. Dauphin-Tanguy, "Incremental bond graph approach to the derivation of state equations for robustness study," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 12, no. 1, pp. 41–60, Apr. 2004, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2003.11.002>.
- [5] M. A. Djeziri, B. Ould Bouamama, and R. Merzouki, "Modelling and robust FDI of steam generator using uncertain bond graph model," *Journal of Process Control*, vol. 19, no. 1, pp. 149–162, Jan. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.12.009>.
- [6] M. G. Kazemi and M. Montazeri, "A new robust fault diagnosis approach based on bond graph method," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, no. 11, pp. 4353–4365, Nov. 2017, <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0906-6>.
- [7] N. Tari, L. Sekhri, and H. Haffaf, "A Functional and Bond Graph Model for Robust Supervision," *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, vol. 66, no. 1, pp. 161–171, 2018.
- [8] P. J. Gawthrop, "Bicausal bond graphs," *Simulation Series*, vol. 27, 1994.
- [9] "20-sim | Modeling & Simulation," *20-Sim*. <https://www.20sim.com/> (accessed Oct. 27, 2020).
- [10] H. A. Paynter, *Analysis and Design of Engineering Systems*. The MIT Press, 1960.
- [11] D. Karnopp, *System dynamics: A unified approach*. New York, NY, USA: Wiley, 1975.
- [12] D. J. U. Thoma, *Introduction to Bond Graphs and Their Applications: Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies*. Oxford, UK: Pergamon Press, 2016.
- [13] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J. P. Richard, F. Rotella, and F. Zambettakis, *Automatique: Modélisation et identification des processus, tome 2*. Paris, France: Editions Technip, 2000.
- [14] G. Dauphin-Tanguy, *Les Bond Graphs*. Paris, France: Hermès, 2000.
- [15] P. J. Antsaklis and A. N. Michel, *A Linear Systems Primer*. Boston, MA, USA: Birkhäuser, 2007.
- [16] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2001.
- [17] S. A. Ajwad, J. Iqbal, R. U. Islam, A. Alsheikhy, A. Almeshal, and A. Mehmood, "Optimal and Robust Control of Multi DOF Robotic Manipulator: Design and Hardware Realization," *Cybernetics and Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 77–93, Jan. 2018, <https://doi.org/10.1080/01969722.2017.1412905>.
- [18] M. Khemliche, I. Dif, S. Latreche, and B. O. Bouamama, "Modelling and analysis of an active suspension 1/4 of vehicle with bond graph," in *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004*, Hammamet, Tunisia, Mar. 2004, pp. 811–814, <https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2004.1296569>.
- [19] S. A. Ajwad, J. Iqbal, M. I. Ullah, and A. Mehmood, "A systematic review of current and emergent manipulator control approaches," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 198–210, Jun. 2015, <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0335-0>.
- [20] T.-J. Yeh, "Controller synthesis for cascade systems using bond graphs," *International Journal of Systems Science*, vol. 33, no. 14, pp. 1161–1177, Jan. 2002, <https://doi.org/10.1080/0020772031000071794>.
- [21] J. Zhao, D. Song, B. Zhu, Z. Chen, and Y. Sun, "Nonlinear Backstepping Control of Electro-Hydraulic Brake System Based on Bond Graph Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19100–19112, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968513>.
- [22] J. Iqbal, M. I. Ullah, A. A. Khan, and M. Irfan, "Towards Sophisticated Control of Robotic Manipulators: An Experimental Study on a Pseudo-Industrial Arm," *Strojnicki Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 7–8, pp. 465–470, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2511>.
- [23] S. Ullah, A. Mehmood, Q. Khan, S. Rehman, and J. Iqbal, "Robust Integral Sliding Mode Control Design for Stability Enhancement of Under-actuated Quadcopter," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 1671–1678, Jul. 2020, <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0302-3>.
- [24] J. Iqbal, "Modern Control Laws for an Articulated Robotic Arm: Modeling and Simulation," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 2, pp. 4057–4061, Apr. 2019, <https://doi.org/10.48084/etasr.2598>.
- [25] M. Fouzia, N. Khenfer, and N. E. Boukezzoula, "Robust Adaptive Tracking Control of Manipulator Arms with Fuzzy Neural Networks," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 4, pp. 6131–6141, Aug. 2020, <https://doi.org/10.48084/etasr.3648>.
- [26] N. Dif, E. Boudissa, M. Bounekhla, and I. Dif, "Firefly Algorithm Improvement with Application to Induction Machine Parameters Identification," *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique*, vol. 65, no. 1, pp. 35–40, 2020.
- [27] W. E. Dixon, A. Behal, D. M. Dawson, and S. P. Nagarkatti, *Nonlinear Control of Engineering Systems: A Lyapunov-Based Approach*. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2003.
- [28] J. Iqbal, M. Ullah, S. G. Khan, B. Khelifa, and S. Čuković, "Nonlinear control systems - A brief overview of historical and recent advances," *Nonlinear Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 301–312, Dec. 2017, <https://doi.org/10.1515/nleng-2016-0077>.
- [29] D. Alazard, P. Apkarian, C. Cumer, G. Ferreres, and M. Gauvrit, *Robustesse et Commande Optimale*. Toulouse, France: Cepadues, 1999.

Résumés

الملخص: الأعمال المنجزة في هاته الأطروحة تخص استعمال أداة الروابط البيانية في إنشاء قوانين التحكم، سيما قوانين متابعة المسارات. أداة الروابط البيانية ، بمميزاتها في نمذجة وتحليل نماذج الأنظمة الفيزيائية متعددة المجالات، تمكننا كذلك من كونها أداة قوية في إنشاء قوانين التحكم باستعمال مبدأ الانعكاس الثنائي السببي لمسار الربط البياني مدخل/مخرج للنموذج، وباستعمال قانون التحكم بالرجوع إلى الخلف مثل قانون التحكم بخطوة إلى الوراء. طبقت تقنيات التحكم هاته على نظام ميكانيكي ونظام كهرومغناطوميكانيكي آخر، مما سمح لنا بالتحقق من فاعليتها وقوتها في مجابهة شكوك وأخطاء النمذجة.

الكلمات المفتاحية: الروابط البيانية، التتبع المماسي للمسارات، العكس، ثنائية السببية، التشكيك، التحويل الكسري الخطي، الرافعة الكهرومغناطيسية.

Abstract: The work developed in this thesis, deals with the use of the bond graph tool for the design of control laws, including the tracking trajectory control. The bond graph methodology, by its concepts of modeling, analysis of physical systems multi-domain, can also be a powerful tool in the design of control laws, using the principle of bicausal inversion of the bond graph path I / O of model, using a backstepping type of control. These control techniques are applied on a mechanical system and another electro-magnetic-mechanical system, which allowed us to validate their performance and robustness against modeling uncertainties.

Keywords: *Bond graph, Asymptotic Trajectory Tracking, Inversion, Bicausality, Uncertainty, Linear Fractional Transformation (LFT), Magnetic Levitation.*

Résumé : Les travaux élaborés dans cette thèse, traitent l'emploi de l'outil bond graph pour la conception des lois de commande, notamment le suivi de trajectoire. La méthodologie bond graph, par ses concepts de modélisation, analyse des systèmes physiques multi domaines, permet aussi d'être un outil performant dans la conception des lois de commande, en utilisant le principe d'inversion bicausale du chemin bond graph E/S du modèle, en utilisant une commande de type retour en arrière, comme la commande Backstepping. Ces techniques de commande sont appliquées sur un système mécanique et un autre électro-magnéto-mécanique, qui nous a permet de valider leurs performances et robustesses face aux incertitudes de modélisation.

Mots clés : *Bond graph, Suivi Asymptotique de Trajectoire, Inversion, Bicausalité, Incertitude, Transformation Linéaire Fractionnelle, Lévitiation Electromagnétique.*