

Th 2000 701

50376
1999
421

N° d'ordre :

THESE



présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

en Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

David MOSIEK

Maître es Informatique

**PROCEDURES GRAPHIQUES POUR L'ANALYSE
STRUCTURELLE DE SYSTEMES PHYSIQUES
MODELISES PAR BOND GRAPHS**

A soutenir le 12 Octobre 1999 devant le jury d'examen

M.	J.P. CASSAR	: Président
M.	A. EL MOUDNI	: Rapporteur
M.	J.P. LE BARON	: Rapporteur
Mme	G. DAUPHIN-TANGUY	: Examineur, Directeur de thèse
M.	A. AZMANI	: Examineur, Directeur de thèse
M.	M. TAGINA	: Examineur, Invité
M.	Ph. DESODT	: Examineur, Invité

AVANT-PROPOS

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) à l'Ecole Centrale de Lille et au Laboratoire de Productique de l'Ecole des Mines de Douai sous la direction de Madame G. DAUPHIN-TANGUY de Monsieur A. AZMANI.

Nous sommes particulièrement reconnaissant à Madame G. DAUPHIN-TANGUY, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et Directeur du LAIL et à Monsieur A. AZMANI, Maître de conférences à l'Ecole Centrale de Lille. Leur amabilité, Leurs conseils et la qualité de leurs rapports humains nous ont permis d'achever dans les meilleures conditions les travaux entrepris.

Nous remercions vivement le Professeur J.P. CASSAR, Professeur à l'Institut Agro-alimentaire de Lille, pour nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de thèse.

Nous sommes redevable à Messieurs les Professeurs A. EL MOUDNI et J.P. LE BARON pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.

Malgré l'éloignement géographique, Monsieur M. TAGINA, Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et Directeur le l'équipe bond graph du Laboratoire d'Analyse et de Commande des Systèmes, a accepté de participer à notre jury. Qu'il reçoive ici nos très vifs remerciements.

Nous tenons à remercier Monsieur Ph. DESODT, Responsable du Laboratoire d'Automatique et d'Electronique de l'Ecole des Mines de Douai pour l'honneur qu'il nous fait en participant à notre jury.

Nous voudrions adresser une pensée amicale aux membres du LAIL, au personnel du département Productique de l'Ecole des Mines de Douai, au personnel de l'Ecole Centrale de Lille et spécialement à l'équipe Bond Graph, l'équipe Commande ainsi que l'équipe Production Manufacturière (Pascal, Philippe, Janette, Stéphane, Jean-Marc, Laurent, Kasimir, Nicolas, Abdel, William, Laurent, François, Régis, Frédéric, Yann, Thierry, Wajdi, Hervé, Nathalie et tous les autres) pour la bonne humeur et la sympathie qu'ils entretiennent au laboratoire.

Enfin, nous remercions très sincèrement Monsieur M. VANGREVENINGE pour la reprographie de ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale	vii
------------------------------------	------------

Chapitre I

Pré-requis d'analyse structurelle	1
I-1 Introduction	3
I-2 Analyse structurelle à partir de la modélisation par bond-graphs	3
I-3 Surveillance de systèmes physiques	13
I-4 Bond-graphs bicausaux.....	16
I-5 Conclusion.....	21

Chapitre II

Conception de systèmes de surveillance utilisant une approche structurelle à partir d'un modèle bond graph 22

II-1 Introduction	24
II-2 Première approche avec parcours systématique du bond-graph	25
II-3 Utilisation d'une nouvelle représentation graphique : le graphe causal	45
II-4 Surveillabilité et placement des capteurs	60
II-5 Conclusion.....	75

Chapitre III

Gestion de sous-modèles bond graphs 76

III-1 Introduction.....	78
III-2 Définition des sous-modèles bond-graph.....	79
III-3 Traitement des sous-modèles bond-graphs	100
III-4 Extension à la bi-causalité.....	118
III-5 Conclusion	122

Chapitre IV

Outils pour l'aide à la conception intégrée 123

IV-1 Introduction..... 125

IV-2 Méthode générale..... 125

IV-3 Méthode utilisant la décomposition en sous-modèles bond-graphs 141

IV-4 Gestion des modifications structurelles 164

IV-5 Conclusion 166

Conclusion générale 168

Annexes 170

Annexe A 171

Annexe B 183

Bibliographie 189

INTRODUCTION GENERALE

L'analyse structurelle est une étape importante lors de la conception de modèles de systèmes physiques. En effet, en déterminant certaines propriétés structurelles du modèle étudié, elle permet, avant de passer au calcul numérique, de vérifier si le modèle choisi correspond aux besoins du concepteur.

Les modèles bond-graphs, très proches dans leur représentation des systèmes physiques qu'ils modélisent, permettent de fournir de par leur nature causale de nombreux outils d'analyse structurelle.

Cependant, la complexité croissante des systèmes physiques étudiés et de leurs modèles associés, rend pratiquement nécessaire l'automatisation de ces procédures d'analyse structurelle, par l'intermédiaire d'un programme informatique comme le logiciel ARCHER, développé au sein de l'équipe bond-graph du L.A.I.L.

Notre travail a consisté à déterminer comment implanter dans un logiciel tel qu'ARCHER des procédures d'analyse structurelle à partir d'un modèle bond-graph, en proposant une représentation des données adéquate tout en adaptant et complétant les procédures structurelles existantes afin d'optimiser leur traitement, utilisant le parcours des chemins causaux au sein des modèles bond-graph étudiés. Des nouveaux outils structurels sont également proposés, notamment dans le domaine de la surveillance.

De plus en plus, les concepteurs de modèles procèdent par l'assemblage de sous-modèles préexistants afin de déterminer le modèle global désiré, notamment afin de profiter de l'expérience des phases précédentes de modélisation. Dans une seconde phase, nous avons ainsi proposé une méthode de représentation des bond-graphs en sous-modèles, non seulement dans le but de pouvoir assembler des sous-modèles issus de bibliothèques, mais aussi afin d'améliorer le traitement informatique de ceux-ci.

Enfin, dans une dernière étape, nous nous sommes efforcé de reprendre les résultats d'analyse structurelle à partir d'un modèle bond-graph afin de proposer à l'utilisateur une démarche d'aide à la conception utilisant ces outils d'analyse structurelle afin de l'aider à choisir le modèle le mieux adapté à son cahier des charges.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons les notions de base qui seront utilisées dans les chapitres suivants, en rappelant quelques résultats d'analyse structurelle, la démarche de surveillance de systèmes physiques et enfin les bases de la notion de bicausalité dans un modèle bond-graph.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons deux méthodes de réalisation de systèmes de surveillance à partir d'un modèle bond-graph, utilisant toutes deux une approche structurelle. La première approche se base sur le parcours des chemins causaux du bond-graph afin d'en déduire les informations nécessaires. La deuxième méthode que nous proposons ensuite utilise une nouvelle représentation graphique causale déduite directement du modèle bond-graph qui permet de simplifier et d'accélérer les différentes étapes de conception des systèmes de surveillance.

Le troisième chapitre est consacré à proposer un formalisme permettant de gérer l'utilisation de sous-modèles bond-graphs dans un programme informatique, en précisant les

différentes informations qui vont être déterminées pour chaque sous-modèle afin d'adapter les procédures existantes de calcul formel et d'analyse structurelle. En fait, nous irons plus loin en indiquant, conjointement au traitement de sous-modèles issus de bibliothèques, une méthode de décomposition des bond-graphs en sous-modèles « algorithmiques » qui va nous permettre de faciliter les différents traitements informatiques. Enfin, nous montrerons que notre méthode peut être aisément adaptée afin de traiter des sous-modèles bicausaux.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous présentons deux approches permettant d'aider le concepteur à construire un modèle du système physique étudié possédant les propriétés structurelles qu'il désire. La première démarche que nous allons proposer va nous permettre d'établir le principe de l'approche proposée. Dans la deuxième démarche, nous étendons celle-ci afin de proposer des méthodes d'analyse structurelle et d'aide à la conception à partir d'un bond-graph décomposé en sous-modèles. Enfin, dans une dernière partie, nous proposons les principes de différents algorithmes permettant d'étendre à un modèle bond-graph modifié les informations structurelles déjà calculées (chemins causaux, boucles causales, propriétés structurelles) sur une version antérieure.

CHAPITRE I

PRE-REQUIS

D'ANALYSE STRUCTURELLE

Sommaire du chapitre I

I-1 Introduction	3
I-2 Analyse structurelle à partir de la modélisation par bond-graphs	3
I-3 Surveillance de systèmes physiques	13
I-4 Bond-graphs bicausaux.....	16
I-5 Conclusion	21

I - 1 Introduction

L'aide à la conception de systèmes physiques et plus particulièrement l'analyse structurelle de ceux-ci requiert des notions issus de domaines variés. Dans ce chapitre, nous présentons les notions de base qui seront utilisées dans les chapitres suivants.

Dans une première partie, nous rappelons quelques résultats d'analyse structurelle sur des modèles bond-graphs.

Ensuite, nous présenterons la démarche de surveillance de systèmes physiques, que nous appliquerons aux systèmes modélisés par bond-graphs dans le chapitre II.

Enfin, nous rappellerons les bases de la notion de bicausalité dans un modèle bond-graph, notions qui nous permettra d'étendre notre démarche de traitement des sous-modèles bond-graphs vue dans les chapitres III et IV aux modèles bond-graphs bicausaux.

I - 2 Analyse structurelle à partir de la modélisation par bond-graphs

L'outil bond-graph, qui a fait ses preuves pour la construction de modèles de connaissance de systèmes physiques pluridisciplinaires, est aussi un excellent support pour l'analyse des propriétés des modèles. Nous rappelons ici quelques résultats qui seront repris dans la suite du mémoire. Pour quelques rappels sur la méthodologie bond-graph, voir l'Annexe A.

On désigne par "propriété structurelle" toute propriété d'un modèle qui ne dépend que du type des éléments qui composent ce modèle et de la manière dont ils sont interconnectés, sans utiliser la valeur numérique de leurs paramètres. Nous allons ainsi rappeler les notions de rang-bg, de commandabilité et d'observabilité structurelles.

I - 2 - 1 Rang-bg de la matrice d'état associée au bond-graph

L'ordre n d'un modèle, et donc la dimension de la matrice d'état, est égal au nombre d'éléments I et C qui admettent une causalité intégrale quand on met le bond-graph en causalité intégrale préférentielle.

Le rang q de la matrice d'état correspond au nombre de modes non nuls du modèle, et on peut écrire :

$$q = n - k$$

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

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

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

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

Théorème [30]

Le **rang-bg de la matrice d'état** associée à un modèle bond-graph initialement en causalité intégrale est égal au nombre d'éléments I et C en causalité intégrale admettant une causalité dérivée quand on affecte une causalité dérivée au bond-graph. Si $(n_i)_i$ (respectivement $(n_d)_d$) représente le nombre de I et de C en causalité intégrale quand une causalité intégrale i (respectivement dérivée d) est appliquée au bond-graph, alors le rang q est donné par :

$$q = (n_i)_i - (n_i)_d$$

Remarque

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

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

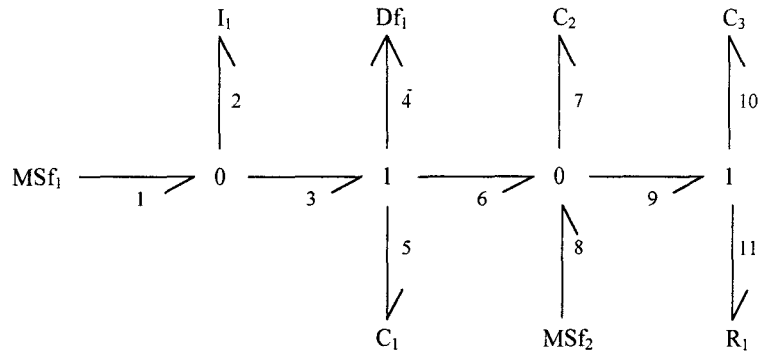


Fig. I.1 : Bond-graph acausal associé à un système d'ordre 4

Lorsqu'on applique la causalité intégrale à ce modèle, on obtient :

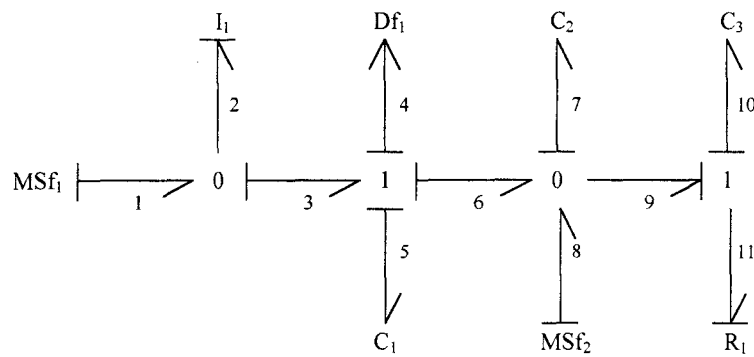


Fig. I.2 : Bond-graph en causalité intégrale associé à un système d'ordre 4

Les 4 éléments I et C admettent une causalité intégrale sans créer de conflit (figure I.2), le modèle est donc d'ordre $n = (n_i)_i = 4$.

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

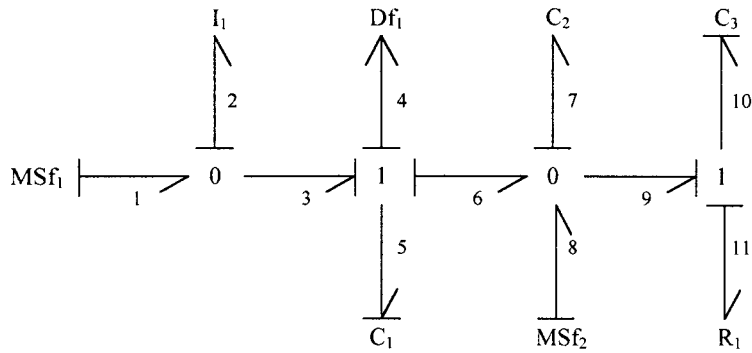


Fig. I.3 : Bond-graph en causalité dérivée

Si on essaie d'affecter une causalité dérivée à tous les I et C , on constate qu'on ne parvient pas à basculer l'élément C_2 en causalité dérivée (on aurait pu aussi choisir C_1 ou C_3). On en déduit que $(n_i)_d = 1$ et que le rang-bg de la matrice d'état est donc $q = 3$.

I - 2 - 2 Commandabilité / observabilité structurelles

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

Théorème [30]

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

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

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

Remarques

- Lorsque tous les éléments I , C initialement en causalité intégrale peuvent admettre une causalité dérivée, alors il suffit d'une commande pour rendre le modèle commandable et son placement dans le modèle ne repose que sur des considérations technologiques.
- Lorsque k éléments I , C restent en causalité intégrale, il faut alors k sources de commande bien placées pour rendre le modèle commandable. La dualisation de ces sources permet de tester si le placement choisi est correct.
- Le raisonnement précédent s'applique de façon identique pour l'étude de l'observabilité.

Reprenons l'exemple de la figure II.2 représentant un modèle d'ordre 4 affecté de la causalité intégrale et appliquons les deux conditions de test de la commandabilité et de l'observabilité.

- Première étape : On vérifie qu'il existe un chemin causal entre chaque I et C et au moins une source ou un détecteur, direct ou indirect (par l'intermédiaire d'un autre élément).
- Deuxième étape : Le modèle est-il commandable (resp. observable) par les deux entrées de commande MSf_1 et MSf_2 (resp. par le détecteur Df_1) placés à ces noeuds du bond-graph ?

Nous avons déjà pu constater à partir du modèle bond-graph en causalité dérivée de la figure I.3 que la matrice d'état associée à ce modèle est de rang 3 et le modèle possède donc un mode nul. On en déduit qu'il faudra donc au moins une commande **bien placée** et un capteur **bien placé**.

Pour faire disparaître la causalité intégrale restante sur l'élément C_2 , nous essayons tout d'abord de dualiser la source MSf_1 , ce qui revient à transformer la source de flux en source d'effort, et qui change donc la causalité (figure I.4) :

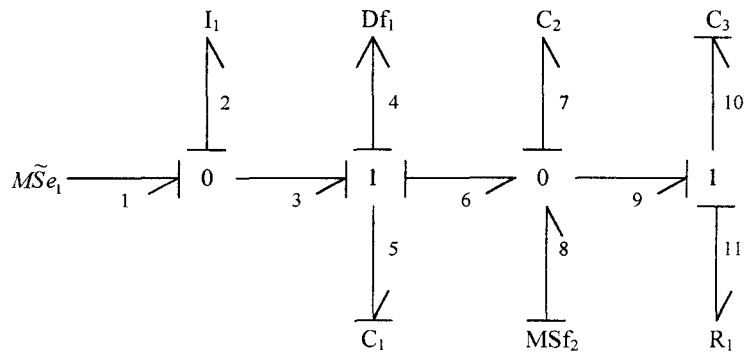


Fig. I.4 : Dualisation de la source MSf_1

Cependant comme nous pouvons le constater la dualisation de MSf_1 ne permet pas de passer l'élément C_2 en causalité dérivée (au contraire un conflit causal supplémentaire apparaît). Ceci s'interprète comme une non commandabilité structurelle de l'état par l'entrée MSf_1 . Si on dualise maintenant l'entrée MSf_2 on obtient le bond-graph suivant :

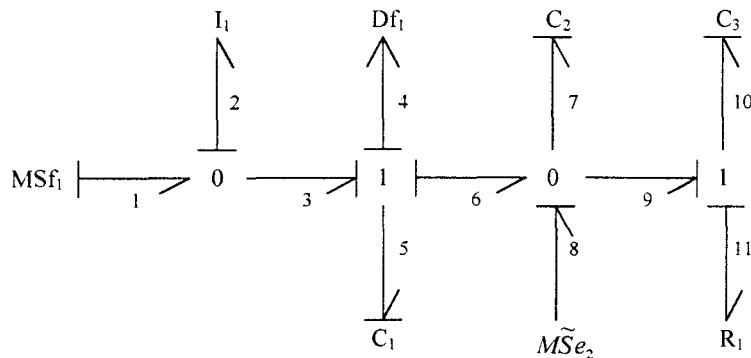


Fig. I.5 : Dualisation de la source MSf_2

Cette fois-ci, la dualisation de la source MSf_2 permet de passer l'élément C_2 en causalité dérivée. On en déduit que l'état est commandable par la source MSf_2 .

Afin de déterminer si le modèle est observable, essayons de dualiser le capteur Df_1 :

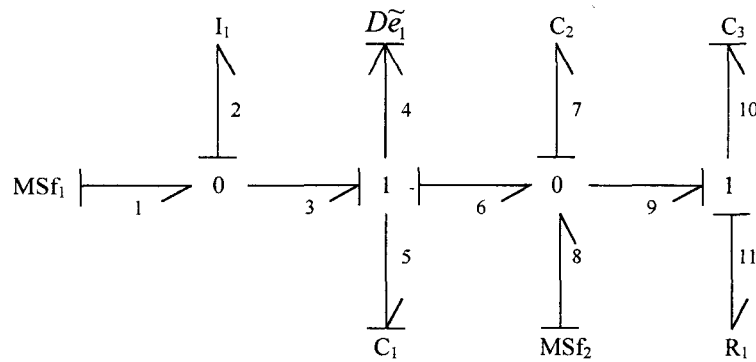


Fig. I.6 : Dualisation du capteur Df_1

On peut constater que la dualisation du capteur Df_1 ne permet pas de passer l'élément C_2 en causalité dérivée. On en déduit que l'état n'est pas observable (Df_1 étant le seul capteur).

I - 2 - 3 Autre propriétés structurelles, calcul formel et calcul de lois de commandes à partir d'un modèle bond-graph

D'autres propriétés structurelles mais aussi des procédures de calcul formel et de lois de commande peuvent être également étudiées, comme les recensent les tableaux suivants :

METHODES	REMARQUES SUR LES PROCEDURES GRAPHIQUES
PROPRIETES STRUCTURELLES D'UN SYSTEME Rang bond graph de la matrice de transfert Rang-bg des matrices A, B et C Condition de commandabilité structurelle Condition d'observabilité structurelle Critère d'inversibilité Critère de découplabilité Ordre des zéros à l'infini	 Repose sur la causalité Repose sur la causalité Utilise les chemins disjoints Test de l'inversibilité inclus Utilise les chemins disjoints et la longueur des chemins
SURVEILLANCE Détermination de la surveillabilité Positionnement des capteurs afin d'obtenir la surveillabilité Détermination du tableau des signatures	 Bond graph en causalité dérivée Utilise les chemins causaux inclus Bond graph en causalité dérivée Bond graph en causalité dérivée
NON LINEAIRE Linéarisation des systèmes non linéaires Commandabilité d'un bond graph linéaire avec des sources modulées linéairement Commandabilité des systèmes non linéaires commandés par MTF et MGY	 Utilise des sous-modèles bond-graphs
MATRICES CARACTERISTIQUES D'UN SYSTEME Détermination de l'équation d'état Détermination de la matrice de transfert Détermination de la matrice système Détermination de la matrice de structure	 Bond graph en causalité intégrale Bond graph en causalité intégrale ou en dérivée
OPERATIONS SUR LE SYSTEME OU SUR LE MODELE Détermination du bond graph dual et du bond graph réciproque	

METHODES	REMARQUES SUR LES PROCEDURES GRAPHIQUES
Inversion entrée-sortie d'un système Simplification de modèles par la méthode des perturbations singulières	Correspondance entre les équations d'état lentes/rapides et les bond graphs lents/rapides
COMMANDABILITE EN ETAT ET OBSERVABILITE STRUCTURELLE	
Détermination des termes de la matrice de commandabilité C_s	Bond graph en causalité intégrale
Détermination des termes de la matrice d'observabilité O_b	Bond graph en causalité intégrale
Calcul de la première forme de commandabilité C_s^{-1}	Bond graph en causalité intégrale Calcul formel et tests d'indépendance simultanés
Calcul de la première forme d'observabilité O_b^{-1}	Bond graph en causalité intégrale Matrice C de rang plein
Détermination des sous-espaces commandables	
Détermination des sous-espaces observables	
PLACEMENT DE POLES PAR RETOUR D'ETAT	
Placement de pôles structurel Monovariabale	Bond graph en causalité intégrale Utilise les cycles causaux et familles de cycles causaux
Méthode 1 : calcul formel du polynôme caractéristique en boucle fermée	
Méthode 2 : mise sous forme canonique de la matrice d'état	Bond graph en causalité intégrale Utilise les cycles causaux et familles de cycles causaux C_s^{-1} doit être calculée formellement Calcul de produits de matrices
Placement de pôles structurel Multivariabale	Bond graph en causalité intégrale Utilise les cycles causaux et familles de cycles causaux C_s^{-1} doit être calculée formellement Calcul de produits de matrices
POLES ET ZEROS PARTICULIERS D'UN SYSTEME LINEAIRE	
Détermination des zéros de transmission, des zéros infinis, des zéros invariants et des modes fixes d'un système	

METHODES	REMARQUES SUR LES PROCEDURES GRAPHIQUES
DECOUPLAGE ENTREES-SORTIES PAR RETOUR D'ETAT Calcul du déterminant de la matrice système $P(s)$ Détermination de la matrice de découplage A^* Détermination de la matrice de découplage B^*	Bond graph en causalité intégrale Utilise les cycles causaux et familles de cycles causaux Bond graph en causalité intégrale Bond graph en causalité intégrale
SURVEILLANCE Génération des Relations de Redondance Analytique	Bond graph en causalité dérivée
MULTIPORTS Détermination de la matrice de transfert et de l'équation d'état d'un modèle bond graph comprenant des multiports Décomposition des multiports en éléments 1-port	Utilise des nouveaux types de chemins/boucles Conditions sur les matrices associées aux multiports
MODELE BONG GRAPH A PARTIR D'UNE MATRICE DE TRANSFERT Détermination d'un modèle bond graph à partir de la matrice de transfert d'un système	
CALCUL DE LOIS DE COMMANDE Détermination de sous-espaces AB invariants Calcul de lois de commande pour le découplage entrée-sortie Calcul de lois de commande pour le rejet de perturbations	Approche géométrique Caractérisation graphique des sous-espaces invariants

I - 3 Surveillance de systèmes physiques

I - 3 - 1 Présentation

La complexité croissante des processus industriels les rendent de plus en plus sensibles aux défaillances. Afin que ces pannes puissent être traitées le plus rapidement possible, il convient d'être en mesure de les détecter et de les localiser d'une manière la plus efficace possible, afin de pouvoir diagnostiquer avec la plus grande précision l'origine de ces pannes [32], [33].

La détection consiste à comparer le fonctionnement réel du système avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse de fonctionnement normal (ce qui implique de disposer d'un modèle du fonctionnement normal obtenu par apprentissage ou d'une manière analytique), et à générer une alarme lorsque l'on détecte des différences.

La localisation, quant à elle, consiste à comparer le fonctionnement réel du système avec le fonctionnement de celui-ci sous certaines hypothèses de défaillances (ce qui implique de disposer des modèles correspondant à ces systèmes défaillants). Ainsi, la localisation permet de circonscrire la défaillance à un sous-ensemble de composants du système surveillé. Ainsi, plus le système de surveillance est optimisé, plus fine sera la localisation.

I - 3 - 2 Différentes approches

La construction d'un système de surveillance se décompose en deux parties : la première consiste à déterminer un ensemble de relations significatives (ensemble de fonctions de variables à surveiller et de paramètres connus) et la seconde de mettre au point des règles de diagnostic (celui-ci repose sur la théorie de la décision et sur l'analyse des données). La génération des résidus s'effectue en comparant les données brutes aux données délivrées par

le modèle. Celle-ci peut être réalisée par différentes approches : l'estimation des paramètres, l'estimation de l'état et l'utilisation de la redondance.

I - 3 - 2 - 1 Estimation des paramètres

Les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour estimer les différentes valeurs des paramètres du modèle analytique. Les écarts entre les valeurs estimées et les valeurs de référence constituent des résidus qui seront analysés par la théorie de la décision [34], [35], [36], [37], [38], [39].

I - 3 - 2 - 2 Estimation de l'état

Les techniques d'estimations d'état utilisent des données de base brute pour estimer les sorties du système. Celles-ci sont comparées aux sorties réelles : tout écart entre la valeur mesurée de la sortie et la valeur réelle de la sortie constitue un résidu.

Il existe deux classes d'approches, la première estime d'abord le vecteur d'état (observateur de Luenberger [40], [41], [42], filtre de Kalman [43], [44]) puis en déduit l'estimation des sorties par application de l'équation de mesure. L'autre approche utilise des observateurs qui estiment directement les sorties, ou plus généralement toute combinaison des variables d'état dont on connaît le comportement théorique en fonctionnement normal [45], [46].

I - 3 - 2 - 3 Principe de la redondance

Le principe de redondance consiste à déterminer la valeur des variables par différentes manières et d'analyser si les résultats coïncident. Cette redondance peut être aussi bien physique qu'analytique.

La redondance physique consiste à utiliser 2 ou 3 capteurs afin de mesurer la même variable. La comparaison des sorties des capteurs permet de conclure sur la présence ou non d'une défaillance. Cette méthode est facile à appliquer et est très fiable, cependant elle est très coûteuse et lourde [47].

La redondance analytique consiste à trouver des relations entre les variables connues du système (entrées et sorties) [48][42]. Ces relations, appelées Relations de Redondance Analytique (RRAs), sont satisfaites si le comportement actuel du système est cohérent avec le comportement de référence, non satisfaites sinon. Cet ensemble des RRAs est utilisé dans la procédure de décision à la fois pour détecter la présence de défaillances dans le système mais aussi pour localiser celles-ci.

I - 3 - 3 Démarche utilisant des Relations de Redondance Analytique

Génération des RRAs

La qualité du modèle utilisé pour représenter le système affecte beaucoup la qualité des RRAs trouvées. Plusieurs méthodes de génération des RRAs ont ainsi été développées. Elles se basent généralement sur la représentation par espace d'état [49], la représentation par schéma-blocs [9], la représentation structurelle [48] ou la matrice de transfert [9]. Dans [20] et [11] il a été montré que la modélisation par bond-graphs permet également de générer des RRAs. C'est ce type de modélisation que nous utiliserons dans le chapitre II.

Détermination des résidus et localisation des pannes

Une fois les RRAs connues, on est en mesure de calculer les résidus associés à ces équations et d'en déduire les équations non vérifiées et donc de localiser les éléments

susceptibles d'être défaillants. La précision de cette localisation dépend fortement du nombre et de la position des capteurs au sein du système.

Placement des capteurs pour la surveillance

Détecter l'occurrence d'une défaillance est une chose, être en mesure de la localiser précisément en est une autre. La conception d'un système de surveillance efficace repose sur la détermination précise du nombre de capteurs nécessaires ainsi que de leur placement optimal au sein du système. Nous proposerons dans le chapitre II des méthodes permettant d'aider le concepteur à placer les capteurs.

I - 4 Bond-graphs bicausaux

I - 4 - 1 Définition de la notion de bicausalité

Dans la causalité conventionnelle, les variables conjuguées d'effort et de flux sont systématiquement couplées : le trait causal indique le sens dans lequel l'effort est connu, le flux étant toujours considéré comme connu dans le sens opposé au trait causal.

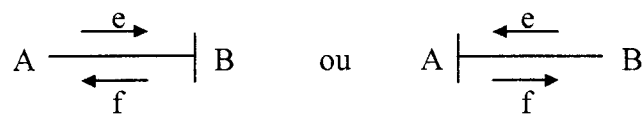


Fig. I.7 : Deux cas de figure de causalité pour les bond-graphs classiques

La notion de bicausalité, définie par P.J. Gawthrop [4], autorise quant à elle le « découplage » des variables d'effort et de flux, autorisant deux nouveaux cas de figure :

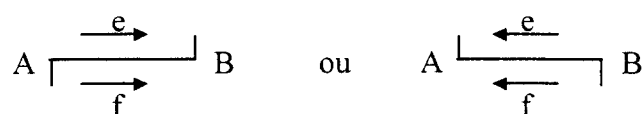


Fig. I.8 : Deux nouveaux cas de figure permis par la bicausalité

I - 4 - 2 Répercussions sur les éléments et jonctions

Le tableau suivant recense les nouveaux cas de figure d'affectation de la causalité au niveau des éléments et des jonctions d'un modèle bond-graph bicausal :

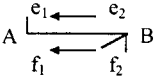
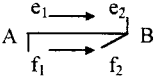
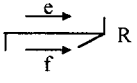
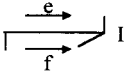
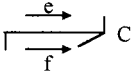
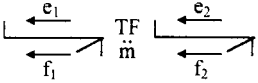
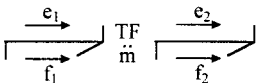
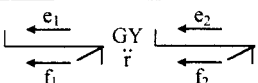
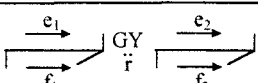
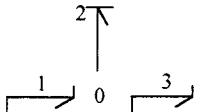
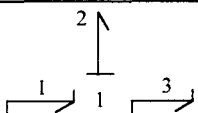
Élément ou Jonction	Représentation bicausale	Relations
Cas général (I)		$e_1 = e_2$ $f_1 = f_2$
Cas général (II)		$e_2 = e_1$ $f_2 = f_1$
Élément R		$R = e/f$
Élément I		$I = p/f$
Élément C		$C = q/e$
Transformateur (I)		$e_1 = m e_2$ $f_1 = f_2/m$
Transformateur (II)		$e_2 = e_1/m$ $f_2 = m f_1$
Gyrateur (I)		$e_1 = r e_2$ $f_1 = f_2/r$
Gyrateur (II)		$e_2 = e_1/r$ $f_2 = r f_1$
Jonction 0		$e_2 = e_1$ $e_3 = e_1$ $f_3 = f_1 - f_2$
Jonction 1		$f_2 = f_1$ $f_3 = f_1$ $e_3 = e_1 - e_2$

Fig. I.9 : Affectation de la bicausalité sur les éléments et jonctions et équations associées

I - 4 - 3 Cas des sources et des détecteurs

Dans le cadre de la bicausalité, les sources et capteurs du système sont définis par un élément générique SS (Source Sensor), dont sa nature est fixée par sa causalité :

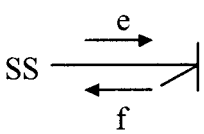
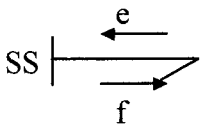
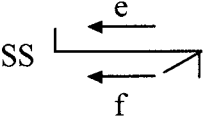
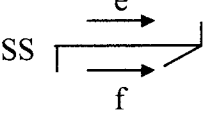
Affectation causale	Nature de l'élément SS
	Source d'effort / Détecteur de flux (SeDf)
	Source de flux / Détecteur d'effort (SfDe)
	Détecteur d'effort / Détecteur de flux (DeDf)
	Source d'effort / Source de flux (SeSf)

Fig. I.10 : Nature de l'élément SS en fonction de sa causalité

I - 4 - 4 Détermination de l'inverse d'un modèle grâce aux bond-graphs bicausaux

Définitions [4] [19]

- Le **bond-graph inverse** d'un système est son modèle bond-graph causal obtenu après affectation de la causalité étendue à la bicausalité et telle qu'il représente graphiquement le modèle inverse permettant d'exprimer ses entrées en fonction de ses sorties.

- La **longueur généralisée** $l^p(u_i, y_j)$ d'un **chemin causal entrée-sortie (E/S)** noté p entre une variable d'entrée u_i et une variable de sortie y_j est défini par :

$$l^p(u_i, y_j) = (-1)^\sigma n_i(p) - n_d(p)$$

avec $\sigma = 0$ si le bond-graph est en causalité préférentielle intégrale

$\sigma = 1$ si le bond-graph est en causalité préférentielle dérivée

où $n_i(p)$ (resp. $n_d(p)$) est le nombre d'éléments en causalité intégrale (resp. en causalité dérivée) rencontrés en parcourant le p de u_i à y_j .

- Nous désignerons par **ensemble bijectif de m chemins causaux entrées-sorties**, tout ensemble S constitué de m chemins causaux E/S tels que chaque variable d'entrée du système est point de départ d'un seul chemin de l'ensemble et chaque variable de sortie du système est point d'arrivée d'un seul chemin de l'ensemble.

Un ensemble bijectif S définira donc comme son nom l'indique une bijection de l'ensemble des variables de commande vers l'ensemble des variables de sortie du système.

- La longueur généralisée $l(S)$ d'un ensemble bijectif S de m chemins causaux E/S notés $p_i, i = 1 \text{ à } m$ est la somme des ordres des m chemins p_i constituant l'ensemble S :

$$l(S) = \sum_{i=1}^m l(p_i) \text{ avec } p_i \in S$$

- Deux chemins causaux E/S sont dits **disjoints** s'ils ne passent par aucune variable commune. Un ensemble bijectif S de m chemins causaux E/S est dit disjoint s'il est constitué de m chemins causaux disjoints deux à deux.

A partir de ces définitions, Fotsu Ngwompo [19] a proposé la procédure de construction du bond-graph inverse suivante :

Procédure de construction du bond-graph inverse [19]

Phase 1 :

Sur le bond-graph direct, déterminer l'ensemble ξ des ensembles bijectifs S de m (m étant le nombre d'entrées et de sorties) chemins causaux Entrée->Sortie disjoints

- Si $\xi = \emptyset$, alors le système n'est pas inversible et la procédure s'arrête
- Sinon déterminer un ensemble S_0 tel que l'ordre $l(S_0) = \min_{S \in \xi} \{l(S)\}$

Phase 2 :

Sur le bond-graph acausal, remplacer les sources et les détecteurs associés aux variables de commande et de sortie par des éléments SS

Phase 3 :

Choisir un élément à causalité obligatoire. Affecter sa causalité obligatoire et propager cette causalité à travers la structure de jonction en respectant les contraintes de causalité.

Répéter la phase 3 jusqu'à ce que tous les éléments à causalité obligatoire aient une causalité.

Phase 4 :

Choisir un chemin p_i ($i = 1$ à m) de S_0 . Affecter la causalité source d'effort / source de flux à son élément SS de sortie et propager cette bicausalité en direction de son élément SS d'entrée le long du chemin p_i . Cette propagation doit atteindre et imposer la causalité détecteur d'effort / détecteur de flux à l'élément SS d'entrée. En déduire toutes les implications causales possibles au niveau de la structure de jonctions.

Répéter la phase 4 pour tous les chemins p_i ($i = 1$ à m) de S_0 .

- Si des conflits de causalité ou des boucles de causalité non solvables apparaissent à ce niveau de la procédure, alors le système n'est pas inversible et la procédure s'arrête.

Phase 5 :

Choisir un élément I ou C sans causalité et lui affecter la causalité intégrale. En déduire toutes les implications causales possibles.

Répéter la phase 5 jusqu'à ce que tous les éléments I et C aient une causalité.

Phase 6 :

Choisir un élément R sans causalité et lui affecter une causalité arbitraire. En déduire toutes les implications causales possibles.

Répéter la phase 6 jusqu'à ce que tous les éléments du bond-graph aient une causalité.

I - 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons succinctement présenté les pré-requis nécessaires à la lecture de ce mémoire : certains résultats d'analyse structurelle utilisant la modélisation par bond-graphs, le principe de la démarche de surveillance de systèmes physiques, et les fondements de la notion de bicausalité dans un modèle bond-graph.

CHAPITRE II

CONCEPTION DE SYSTEMES DE SURVEILLANCE UTILISANT UNE APPROCHE STRUCTURELLE A PARTIR D'UN MODELE BOND-GRAPH

Sommaire du chapitre II

II-1 Introduction	24
II-2 Première approche avec parcours systématique du bond-graph	25
II-3 Utilisation d'une nouvelle représentation graphique : le graphe causal	45
II-4 Surveillabilité et placement des capteurs	60
II-5 Conclusion.....	75

II - 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons deux méthodes de réalisation de systèmes de surveillance à partir d'un modèle bond-graph, utilisant toutes deux une approche structurale.

La première méthode, correspondant à l'extension de premiers travaux utilisant la représentation par bond-graphs pour l'étude de la surveillance de systèmes physiques [11], se base principalement sur le parcours systématique du bond-graph en suivant les chemins causaux afin d'en déduire les informations nécessaires [6], [7]. La deuxième méthode que nous proposons ensuite utilise une nouvelle représentation graphique causale déduite directement du bond-graph qui permet de simplifier et d'accélérer les différentes étapes de conception des systèmes de surveillance [8].

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons une démarche de traitement de la surveillance d'un système modélisé par bond-graph utilisant un parcours classique des chemins causaux. Dans la deuxième partie, nous introduisons une nouvelle représentation graphique causale permettant de mettre en valeur les variables importantes pour la surveillance. A partir de cette représentation, nous décrivons une méthode de génération des différentes relations de redondances analytiques à partir desquelles il sera possible de détecter et d'isoler les défaillances pouvant survenir sur les éléments du système. Enfin, nous montrerons dans la troisième partie que cette représentation constitue un outil intéressant afin d'aider le concepteur à trouver un placement des capteurs lui permettant de surveiller son système dans les meilleures conditions.

Les travaux présentés ici se focalisent essentiellement sur la surveillance de défaillances pouvant affecter les acteurs et les actionneurs, mais ces résultats peuvent être facilement étendus à la surveillance des composants.

II - 2 Première approche avec parcours systématique du bond-graph

II - 2 - 1 Principe de génération des relations de redondance analytique

Cette première méthode de génération des relations de redondance analytique (RRAs) se base sur le parcours causal systématique du modèle bond-graph.

La finalité des RRAs déterminées ici est de permettre la détection et l'isolation de pannes pouvant survenir sur les entrées (sources) ou sorties (capteurs) du système.

En considérant que l'on se trouve dans le cas linéaire, la détermination des RRAs permettant de surveiller les capteurs se fait simplement en déterminant la matrice de transfert du système. En effet, cette matrice constitue un ensemble de relations de redondance indépendantes entre elles [9]. Si n_S représente le nombre de capteurs, alors on peut en déduire qu'il existe n_S RRAs indépendantes.

La matrice de transfert $M_T(s)$ est obtenue en calculant les transmittances existant entre toutes les sorties et les entrées du système. Les transmittances sont obtenues en utilisant la règle de Mason étendue aux bond-graphs, consistant à localiser les boucles causales du modèle bond-graph et ensuite à en calculer les gains [3], [2].

Ainsi, le terme $m_{ij}^y(s)$ de $M_T(s)$ correspondant à la transmittance reliant la sortie "i" à l'entrée "j" peut être définie par :

$$\frac{Y_i(s)}{U_j(s)} = \frac{\sum_k T_k(s) D_k(s)}{D(s)} \quad (\text{II.1})$$

où T_k est le gain du $k^{\text{ième}}$ chemin causal entre Y_i et U_j , D et D_k correspondent respectivement au déterminant du bond-graph et au déterminant réduit obtenu en appliquant la condition supplémentaire que les boucles causales retenues pour le calcul ne touchent pas la chaîne d'action k .

La détermination des RRAs pour la surveillance des entrées de commande est plus délicate, et nécessite le parcours des différents chemins causaux reliant les sources et les capteurs [11].

Un des avantages de la modélisation par bond-graph est que celui-ci fait apparaître simultanément la structure et le comportement du système étudié. Les jonctions 0 et 1 expriment les différentes relations existant entre les flux et les efforts au sein du modèle. Ainsi, les jonctions 0 (respectivement les jonctions 1) relient des éléments soumis à un effort (respectivement un flux) commun, la somme pondérée des flux (respectivement des efforts) étant égale à zéro. En partant de ces jonctions, le but est d'étudier tous les chemins causaux aboutissant aux sources et aux capteurs. La causalité dérivée est généralement appliquée afin d'obtenir des RRAs sous une forme dérivée, afin d'éviter l'influence des conditions initiales. Cette méthode a la particularité de générer autant de relations que de jonctions 0 et 1. Elle ne nécessite pas le calcul du déterminant bond-graph et des différents gains des boucles causales. Dans le cas de bond-graphs comprenant des éléments multiports [5], nous proposons de

$$f_5 = f_8 = f_7 = \frac{1}{b_1} e_7 = \frac{1}{b_1} (e_5 - e_6 - e_8) = \frac{1}{b_1} (e_5 - e_8 - J_1 s f_6) \quad (\text{II.2})$$

$$f_7 = \frac{1}{b_1} (e_5 - e_8) - \frac{J_1 s}{b_1} f_7 \quad (\text{II.3})$$

Afin de résoudre la dernière équation, nous avons à nouveau besoin de déterminer l'expression de f_7 , ce qui nous amène à une boucle algorithmique. La valeur de f_7 pourrait être aisément déterminée en factorisant f_7 :

$$f_7 \left(1 + \frac{J_1 s}{b_1} \right) = \frac{1}{b_1} (e_5 - e_8) \quad (\text{II.4})$$

$$f_5 = f_8 = f_7 = \frac{1}{b_1 + J_1 s} (e_5 - e_8) \quad (\text{II.5})$$

où e_5 et e_8 nous sont donnés par les jonctions avoisinantes.

Mais cela impliquerait que l'on devrait d'abord détecter que f_7 doit être factorisé, puis d'utiliser du calcul formel pour déterminer sa valeur.

Sur la figure II.1 (b), les entrées et sorties de la jonction 1 sont respectivement f_5 - e_8 et e_5 - f_8 . Il vient naturellement que :

$$f_8 = f_5 \quad (\text{II.6})$$

et

$$e_5 = e_6 + e_7 + e_8 = (J_1 s + b_1) f_5 + e_8 \quad (\text{II.7})$$

Dans ce cas, aucune factorisation n'est requise.

Ainsi, uniquement par l'observation de la causalité, nous pouvons détecter à l'avance si des manipulations symboliques vont devoir être faites. Afin de simplifier ces calculs formels lorsqu'ils sont détectés, nous proposons d'utiliser des éléments équivalents, comme nous allons le montrer sur l'exemple fig. II.1 (a).

Dans l'équation (II.5), nous définissons par Z_{eq} le terme $\frac{1}{b_1 + J_1 s}$. Celui-ci correspond à la substitution des éléments J_1 et b_1 par l'admittance équivalente. Ainsi, si cette partie de modèle bond-graph est remplacée par :

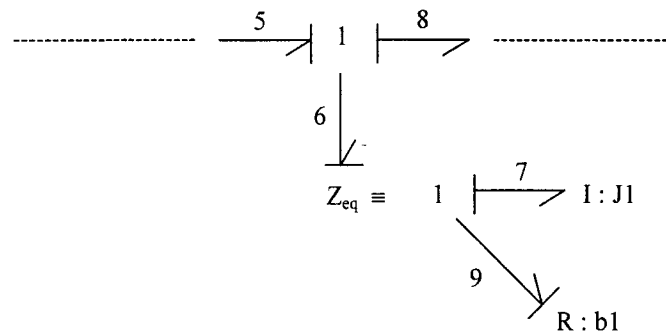


Fig. II.2 : Substitution des éléments d'une jonction par un seul élément équivalent Z_{eq}

nous obtenons directement :

$$f_5 = f_8 = f_6 = Z_{eq}(e_5 - e_8) \quad (II.8)$$

Cette simplification peut être effectuée quel que soit le nombre d'éléments présents sur la jonction. La fonction équivalente est obtenue en calculant à l'aide de la règle de Mason appliquée au modèle bond-graph la fonction de transfert liant la variable de sortie de l'élément équivalent à sa variable d'entrée (dans l'exemple précédent, $f_6(s) / e_6(s)$).

De la même façon, la même opération peut être effectuée sur une jonction 0.

La généralisation de cette simplification peut être établie de la manière suivante :

- Si la jonction sur laquelle se situe l'interruption de chemin causal est de type 1, nous obtenons :

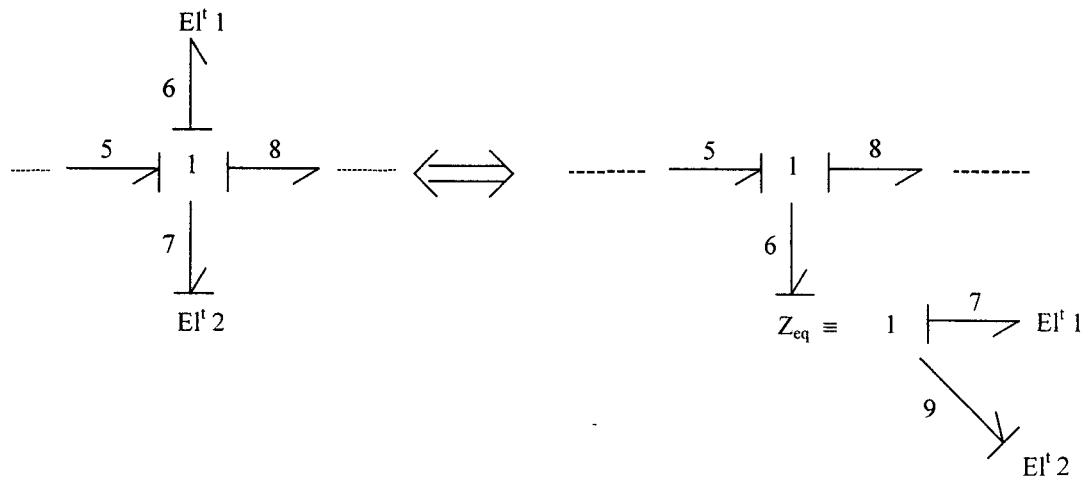


Fig. II.3 : Bond-graph équivalent pour une jonction 1

- Si la jonction sur laquelle se situe l'interruption de chemin causal est de type 0, nous obtenons :

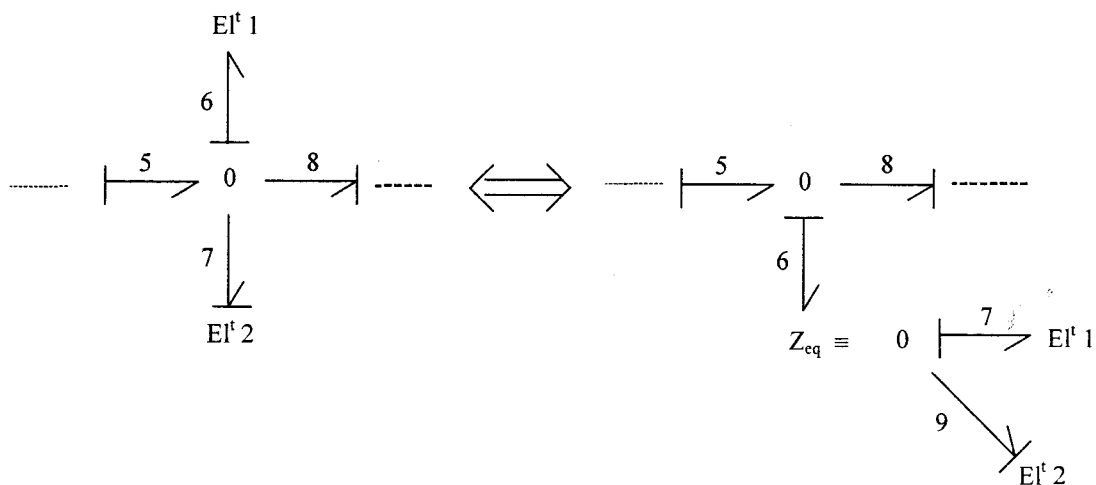


Fig. II.4 : Bond-graph équivalent pour une jonction 0

II - 2 - 2 - 2 Au moins 2 jonctions consécutives sans capteur

Considérons le système électromécanique suivant, composé d'un moteur électrique commandé par la tension u , un embrayage, un réducteur, un frein et une charge dynamique :

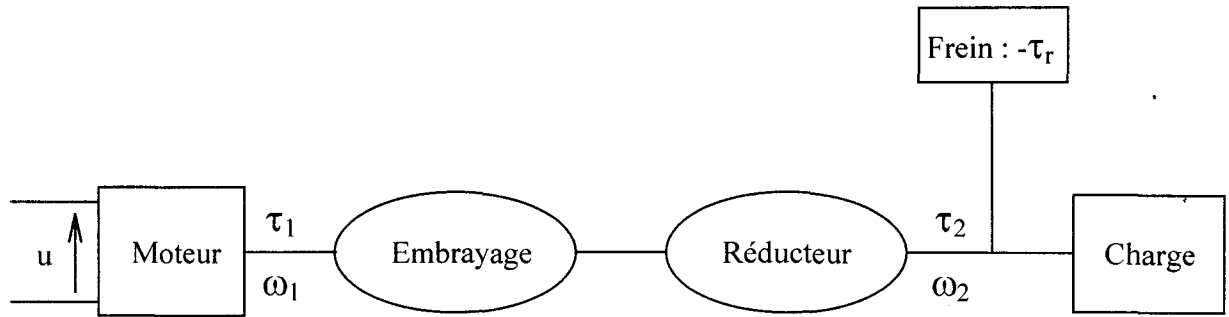


Fig. II.5 : Système électromécanique

Les entrées, supposées connues, sont la tension u et le couple de freinage $-\tau_r$ agissant sur la charge dynamique. Les capteurs de flux (Df) et d'effort (De) permettent de mesurer respectivement la vitesse angulaire ω de la charge et le couple τ_1 appliqué à l'embrayage.

Ce système peut se modéliser par le bond-graph en causalité dérivée suivant :

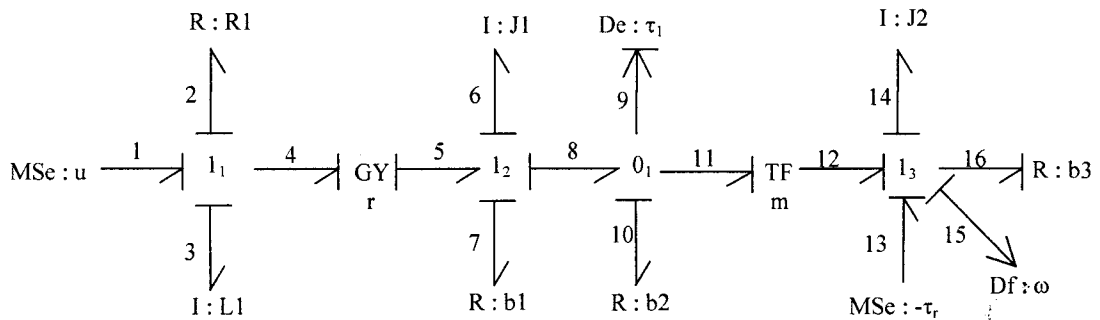


Fig. II.6 : Modèle bond-graph d'un système électromécanique

Dans une première phase, nous pouvons déterminer les boucles causales de ce modèle bond-graph, dont nous déduisons les transmittances de la matrice de transfert :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \omega \end{bmatrix} (s) = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} \frac{b_2}{r} \left(1 + \frac{J_2 s}{b_3} \right) & -\frac{b_2}{mb_3} \left(1 + \frac{J_1 s + b_1}{r^2} (R_1 + L_1 s) \right) \\ \frac{b_2}{mrb_3} & \frac{1}{b_3} \left(1 + \frac{1}{r^2} (R_1 + L_1 s) (J_1 s + b_1 + b_2) \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ -\tau_r \end{bmatrix} (s) \quad (II.9)$$

avec :

$$D(s) = 1 + \frac{1}{r^2} (R_1 + L_1 s) (J_1 s + b_1 + b_2) + \left[1 + \frac{J_1 s + b_1}{r^2} (R_1 + L_1 s) \right] \left(\frac{1}{m^2} \frac{b_2}{b_3} + \frac{J_2 s}{b_3} \right) + \frac{b_2}{r^2} (R_1 + L_1 s) \frac{J_2 s}{b_3}$$

A l'aide des RRAs indépendantes de (II.9) nous sommes en mesure d'isoler les défaillances pouvant affecter les capteurs de couple et de vitesse [11].

Afin de pouvoir détecter les fautes pouvant survenir sur les entrées u et τ_r , d'autres RRAs doivent être générées. La seconde phase consiste alors à parcourir des chemins causaux du modèle bond-graph afin d'obtenir les RRAs requises. En partant de la jonction 0_1 , le résultat suivant peut être obtenu :

$$f_8 - f_{10} - f_{11} = 0 \quad (\text{II.10})$$

Dans l'équation (II.10), les deux variables f_{10} et f_{11} peuvent être déterminées par l'environnement.

Cependant, afin d'exprimer f_8 en fonction des variables connues (issues de sources ou mesures), il est alors nécessaire de suivre les chemins causaux dans les liens (1, 2, ..., 8) ce qui nous mène aux relations :

$$\begin{aligned} f_8 &= f_5 \\ f_5 &= \frac{1}{r} e_4 = \frac{1}{r} (u - e_2 - e_3) = \frac{1}{r} (u - R_1 f_2 - L_1 s f_3) \\ &= \dots \\ f_5 &= \frac{1}{r} \left(u - (R_1 + L_1 s) \frac{1}{r} (e_8 + (b_1 + J_1 s) f_5) \right) \end{aligned}$$

dans laquelle e_8 peut être déterminé par l'environnement.

Nous sommes à nouveau confrontés à une équation implicite. Mais cette fois, le problème semble bien plus difficile à résoudre.

Si nous factorisons f_5 , nous obtenons :

$$f_5 = \frac{\frac{1}{r}u - \frac{1}{r^2}(R_1 + L_1s)e_8}{1 + \frac{1}{r^2}(R_1 + L_1s)(b_1 + J_1s)} \quad (\text{II.11})$$

Afin de trouver une méthode plus efficace, analysons dans cet exemple pourquoi nous sommes une nouvelle fois confrontés à un problème de factorisation. Si nous examinons les variables de flux et d'effort que nous voulons déterminer, nous pouvons remarquer qu'il n'y a aucun problème au niveau de la jonction 1₁ mais qu'à la jonction 1₂ f_5 est « bloqué » et ne peut atteindre la jonction 0₁ sur laquelle se situe un capteur d'effort. En fait, lorsque le problème est examiné de plus près, il est constaté qu'il y aura une équation implicite chaque fois qu'une jonction sans capteur n'est pas connectée causalement à au moins une jonction liée à un capteur.

Cela peut être prouvé à l'aide de la théorie des matroïdes :

Dans [13], une étude sur les modèles graphes de systèmes physiques a montré que les variables qui n'appartiennent à aucun cycle où apparaît un capteur ne peuvent pas être supervisées. Dans [1], la théorie des matroïdes a été utilisée pour transposer certains résultats concernant les graphes aux bond-graphs et particulièrement afin de mettre en évidence un isomorphisme entre les cycles d'un graphe et ceux du bond-graph associé (le modèle bond-graph du même système physique).

Les cycles de flux ont été définis comme les paires de liens connectées aux jonctions 1 et à l'ensemble des liens sauf un connectés à une jonction 0. Les cycles d'effort ont été définis d'une manière duale.

Ainsi, une variable n'appartient à aucun cycle où apparaît un capteur si elle est connectée à une jonction sans capteur et que les jonctions voisines ne le sont pas non plus.

De ce fait, afin de trouver une solution à ce problème, il apparaît intéressant de regrouper les jonctions incriminées 2 à 2, jusqu'à ce que l'on obtienne une seule jonction connectée à une jonction reliée à un capteur.

Plusieurs configurations impliquant de telles équations implicites peuvent être rencontrées :

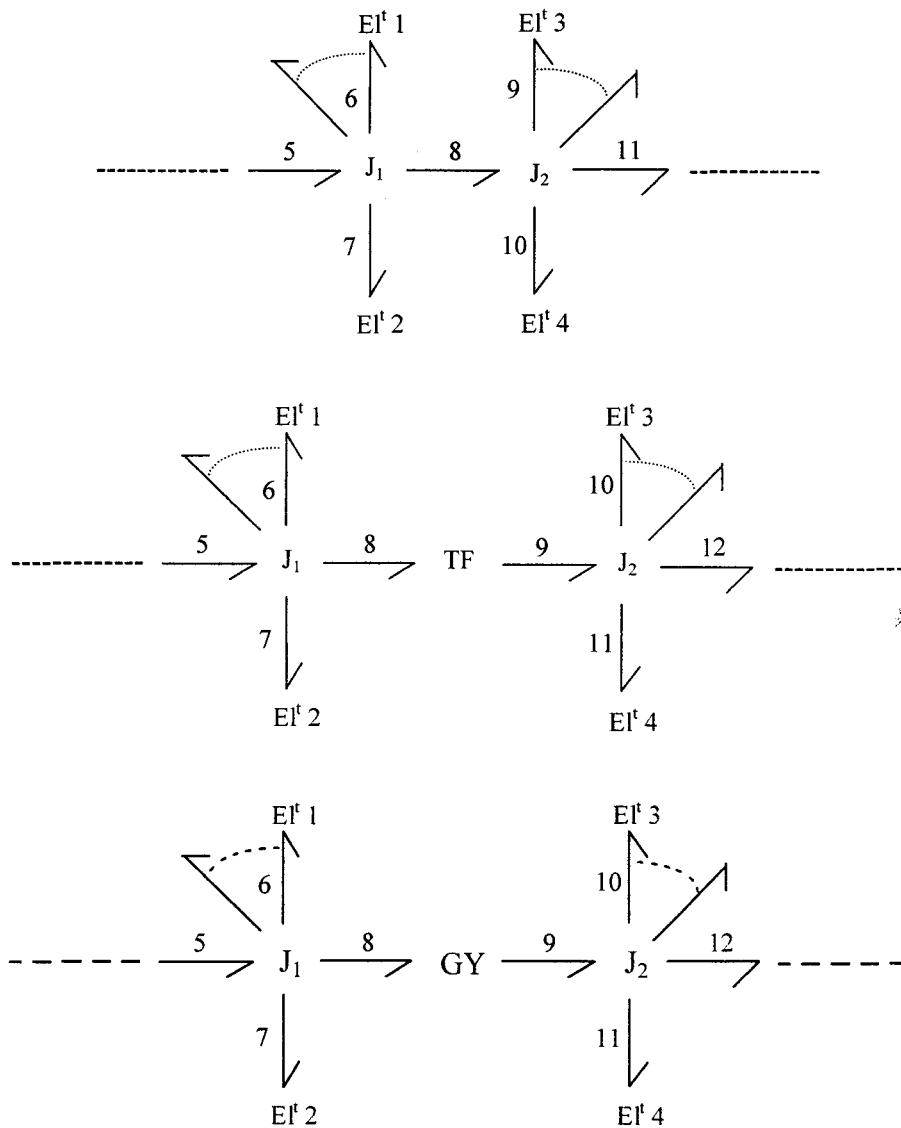


Fig. II.7 : Différents cas de jonctions à regrouper

De la même façon, si nous sommes en présence d'un modèle bond-graph possédant des éléments multiports, de nouvelles équivalences doivent être définies.

Puisque notre objectif est de réaliser un programme informatique générant automatiquement les RRAs, cela aurait pour conséquence de devoir modifier le programme à chaque fois qu'un nouvel élément est créé, ce qui n'est pas très pratique.

De plus, si nous avons par exemple cinq jonctions connectées ensemble sans aucun capteur, il serait alors nécessaire de calculer au moins quatre équivalences.

Dans la partie suivante, une méthode ne comprenant pas ces inconvénients est présentée.

II - 2 - 2 - 3 Proposition d'une méthode informatisable

La méthode que nous allons maintenant proposer pour obtenir une jonction équivalente, utilise la règle de Mason.

L'idée est de remplacer l'ensemble des jonctions J_j avec les éléments qui y sont connectés (sources incluses) par une seule jonction J_{eq} connectant un élément équivalent Z_{eq} et une source équivalente S_{eq} (si besoin est) :

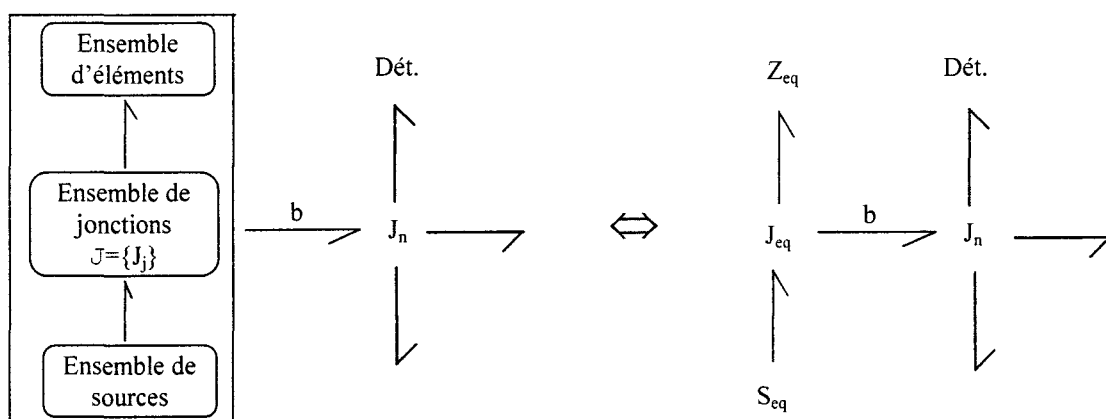


Fig. II.8 : Remplacement par une jonction équivalente

Afin de déterminer le type de J_{eq} ainsi que l'affectation causale de ses éléments connectés Z_{eq} et S_{eq} , une règle heuristique peut être énoncée :

Règle heuristique :

Le type de J_{eq} (0 or 1) est imposé par le type de la jonction voisine J_n (connectée à un capteur) : J_{eq} est choisi en tant que $\bar{J}_n$. Une fois que le type de J_{eq} est fixé, le type de la source S_{eq} est proposé comme étant une source d'effort si $\bar{J}_n$ est une jonction 1, et une source de flux sinon. Le choix de S_{eq} va imposer la causalité de Z_{eq} et ainsi la manière dont on va le calculer. Il est à noter que s'il n'existe aucune source connectée à une des jonctions J_j alors il n'y aura pas de source S_{eq} connectée à la jonction J_{eq} et ainsi l'élément équivalent Z_{eq} peut alors dans ce cas être connecté directement à la jonction J_n .

Afin de calculer la valeur de S_{eq} , la règle de Mason est appliquée en considérant les sources connectées à J_j en tant qu'entrées, et le flux ou effort sortant du lien b (suivant la causalité de ce dernier) en tant que sortie. Si le trait causal du lien b est du côté de J_n (respectivement du côté de J_{eq}) alors la sortie sera un effort (respectivement un flux).

Pour le calcul de Z_{eq} , la règle de Mason est appliquée avec l'effort (respectivement le flux) porté par le lien b comme entrée, et le flux (respectivement l'effort) porté par le lien b comme sortie, suivant la causalité du lien b.

Remarque

S'il y a plusieurs sources connectées à l'ensemble de jonctions J_j , alors les pannes associées à ces sources ne pourront être isolées. Il n'y a donc aucun inconvénient à les regrouper dans S_{eq} .

Si nous appliquons cette méthode à l'exemple figure II.6, le modèle bond-graph simplifié suivant va être trouvé :

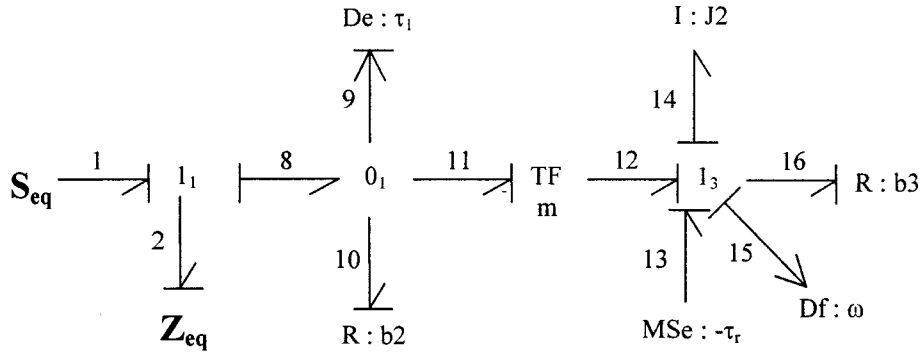


Fig. II.9 : Bond-graph simplifié

dans lequel S_{eq} et Z_{eq} sont définis par :

$$S_{eq} = \frac{\frac{1}{r}u}{1 + \frac{1}{r^2}(R_1 + L_1s)(b_1 + J_1s)} \quad (II.12)$$

$$Z_{eq} = \frac{-\frac{1}{r^2}(R_1 + L_1s)}{1 + \frac{1}{r^2}(R_1 + L_1s)(b_1 + J_1s)} \quad (II.13)$$

II - 2 - 3 Détection et prévention des relations implicites

Nous allons montrer que le type de problèmes qui génèrent des relations implicites sont le résultat de la présence de boucles causales (entre deux éléments) ne croisant aucune jonction connectée à un capteur, ou plus exactement quand la somme des gains de ces boucles (pour chaque paire d'éléments) est non nulle.

La présence de ces relations implicites peut également être détectée à partir d'une forme modifiée de la matrice de structure du bond-graph que nous allons définir ici. Cette matrice, que nous nommons Σ , peut être utilisée pour générer les RRAs.

II - 2 - 3 - 1 Utilisation d'une forme modifiée de la matrice de structure

La matrice de structure S , qui représente la structure du modèle bond-graph, montre les relations respectant l'affectation causale entre les différentes variables du système.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

Les vecteurs associés à cette matrice sont :

X : le vecteur d'état (p pour les I et q pour les C) décomposé en x_i et x_d , les sous-vecteurs associés respectivement aux éléments en causalité intégrale et dérivée.

$\dot{X}$: la dérivée du vecteur d'état décomposée en $\dot{x}_i$ et $\dot{x}_d$.

Z : le complémentaire du vecteur d'état (f pour les I et e pour les C) décomposé en Z_i et Z_d .

U : vecteur des sources d'entrée.

Y : vecteur des capteurs de sortie.

D_{in} : vecteur d'entrée des éléments R.

D_{out} : vecteur de sortie des éléments R.

Afin d'être en mesure de détecter l'existence de relations implicites entre les variables et d'avoir suffisamment de relations pour générer les RRAs à partir de cette matrice, certaines relations doivent être ajoutées et certains termes de la matrice doivent être réorganisés.

Ainsi, les relations entre les flux et les efforts au niveau des éléments sont ajoutées :

$$D_{out} = L \cdot D_{in}, \quad Z_d = H'(s) \cdot \dot{x}_d, \quad Z_i = H(1/s) \cdot \dot{x}_i$$

La présence de capteurs ajoute quelques relations entre les variables inconnues (qui vont donc devoir être calculées) du système et les variables connues (directement grâce aux sources et aux capteurs). Puisque notre objectif est de trouver des relations entre les variables connues du système, les capteurs sont ajoutés dans le vecteur V_E (cf. définition de Σ ci-dessous).

Ce qui nous mène à la définition de la matrice Σ :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_{i_1} \\ Z_{d_1} \\ D_{in_1} \\ \dot{x}_{i_2} \\ Z_{d_2} \\ D_{in_2} \\ \dot{x}_{i_3} \\ Z_{d_3} \\ D_{in_3} \\ Y \\ \dot{x}_i \\ Z_d \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \end{bmatrix}}_{V_S} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & \Sigma_{14} & \Sigma_{15} & \Sigma_{16} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \Sigma_{23} & \Sigma_{24} & \Sigma_{25} & \Sigma_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Sigma_{31} & \Sigma_{32} & \Sigma_{33} & \Sigma_{34} & \Sigma_{35} & \Sigma_{36} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Sigma_{41} & \Sigma_{42} & \Sigma_{43} & \Sigma_{44} & \Sigma_{45} & \Sigma_{46} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Sigma_{51} & \Sigma_{52} & \Sigma_{53} & \Sigma_{54} & \Sigma_{55} & \Sigma_{56} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{i_1} \\ \dot{x}_{d_1} \\ D_{out_1} \\ Z_{i_2} \\ \dot{x}_{d_2} \\ D_{out_2} \\ Z_{i_3} \\ \dot{x}_{d_3} \\ D_{out_3} \\ U \\ \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix}}_{V_E} \quad (II.15)$$

avec V_S le vecteur de sortie et V_E le vecteur d'entrée pour notre système d'équations.

Ainsi cette matrice contient toutes les équations qui vont nous permettre de générer les RRAs. Il est impératif d'utiliser ces équations dans le sens $V_S = \Sigma V_E$ afin de respecter la causalité. Il est à noter que le vecteur Y est également dans notre vecteur d'entrée car nous considérons les valeurs que les capteurs mesurent comme des données connues pour notre système d'équations.

Les vecteurs $\dot{x}_i$, Z_d , D_{in} , Z_i , $\dot{x}_d$ et D_{out} sont décomposés en trois sous-vecteurs :

$\dot{x}_{i1}$, Z_{d1} , D_{in1} , Z_{i1} , $\dot{x}_{d1}$ et D_{out1} représentent les variables correspondant aux éléments qui ont des efforts et flux mutuellement dépendants (valeurs opposées situées symétriquement dans la matrice Σ , ce qui indique une dépendance des variables comme pour la matrice de structure S).

$\dot{x}_{i2}$, Z_{d2} , D_{in2} , Z_{i2} , $\dot{x}_{d2}$ et D_{out2} représentent les variables correspondant aux éléments qui ont leur variable de sortie (dans V_S) qui dépend d'un ou plusieurs des efforts et flux mutuellement dépendants.

$\dot{x}_{i3}$, Z_{d3} , D_{in3} , Z_{i3} , $\dot{x}_{d3}$ et D_{out3} représentent les variables restantes (qui peuvent donc être directement exprimées en fonctions des variables connues (sources et capteurs)).

Considérons l'exemple suivant :

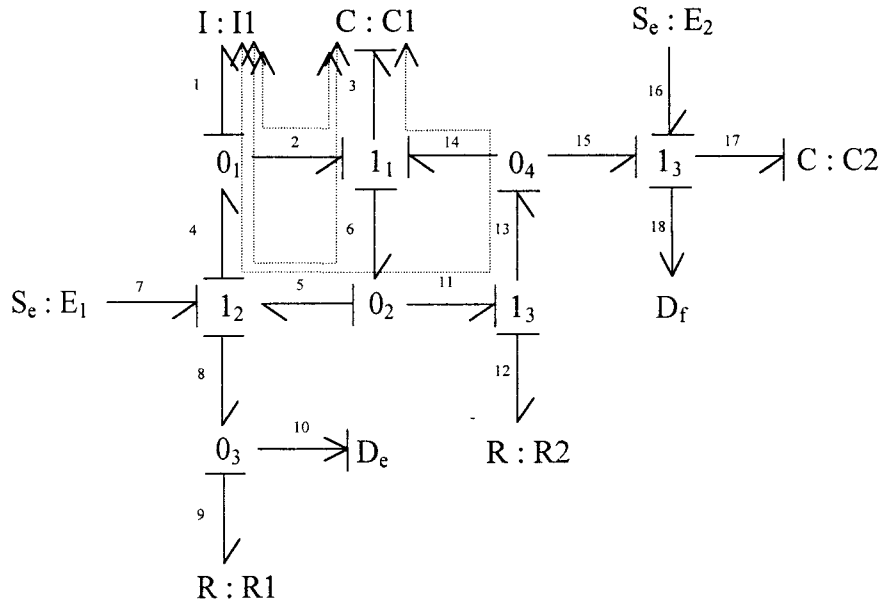


Figure II.10 : Bond-graph en causalité dérivée

La matrice de structure Σ associée à ce modèle bond-graph est déterminée comme suit (pas d'éléments en causalité intégrale dans cet exemple) :

$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l}
 Z_{d_1} \\
 D_{in_1} \\
 Z_{d_2} \\
 D_{in_2} \\
 Y \\
 \dot{x}_d \\
 D_{out}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 f_1 \\
 e_3 \\
 f_{12} \\
 e_{17} \\
 f_9 \\
 D_e \\
 D_f \\
 e_1 \\
 f_3 \\
 f_{17} \\
 e_{12} \\
 e_9
 \end{array} \\
 \underbrace{\hspace{1cm}}_{V_S}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc}
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & 0 & -1 \\
 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & 0 & -1 \\
 \hline
 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & & & & & & & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & & & & & & & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & & & & & & & 0 & 0 \\
 \hline
 & & & & & & & H'(s) & & & & & & & \\
 & & & & & & & & L & & & & & &
 \end{array} \right]
 \begin{array}{l}
 e_1 \\
 f_3 \\
 e_{12} \\
 f_{17} \\
 e_9 \\
 E_1 \\
 E_2 \\
 f_1 \\
 e_3 \\
 e_{17} \\
 f_{12} \\
 f_9 \\
 D_e \\
 D_f
 \end{array}
 \right\}
 \begin{array}{l}
 \dot{x}_{d_1} \\
 D_{out_1} \\
 \dot{x}_{d_3} \\
 D_{out_2} \\
 U \\
 Z_d \\
 D_{in} \\
 Y
 \end{array}
 \quad (II.16)$$

A partir de l'étude de la structure de la matrice Σ , nous pouvons énoncer la proposition suivante.

Proposition :

L'existence d'une relation implicite entre deux variables du système est associée à la présence de valeurs opposées situées symétriquement dans la matrice Σ , à l'intersection des efforts et flux impliqués.

Preuve :

Afin d'exprimer les efforts et flux inconnus en fonction des variables connues (sources et capteurs), l'équation $V_S = \Sigma V_E$ est utilisée, jusqu'à ce que les relations ne contiennent plus que des variables connues.

Les relations liant $[Z_i, \dot{x}_d, D_{out}]^T$ et V_E ne causent aucun problème puisque celles-ci constituent des relations directes entre le flux et l'effort de chaque élément.

Les relations liant Y et V_E ne sont pas utilisées dans ce calcul.

Il nous reste alors les relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ Z_{d1} \\ D_{in1} \end{bmatrix} = [\Sigma_{11}] \begin{bmatrix} Z_{i1} \\ \dot{x}_{d1} \\ D_{out1} \end{bmatrix} + [\Sigma_{12}] \begin{bmatrix} Z_{i2} \\ \dot{x}_{d2} \\ D_{out2} \end{bmatrix} + [\Sigma_{13}] \begin{bmatrix} Z_{i3} \\ \dot{x}_{d3} \\ D_{out3} \end{bmatrix} + [\Sigma_{14}] U + [\Sigma_{15}] \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \end{bmatrix} + [\Sigma_{16}] Y$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i2} \\ Z_{d2} \\ D_{in2} \end{bmatrix} = [\Sigma_{21}] \begin{bmatrix} Z_{i1} \\ \dot{x}_{d1} \\ D_{out1} \end{bmatrix} + [\Sigma_{22}] \begin{bmatrix} Z_{i2} \\ \dot{x}_{d2} \\ D_{out2} \end{bmatrix} + [\Sigma_{23}] \begin{bmatrix} Z_{i3} \\ \dot{x}_{d3} \\ D_{out3} \end{bmatrix} + [\Sigma_{24}] U + [\Sigma_{25}] \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \end{bmatrix} + [\Sigma_{26}] Y$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i3} \\ Z_{d3} \\ D_{in3} \end{bmatrix} = [\Sigma_{31}] \begin{bmatrix} Z_{i1} \\ \dot{x}_{d1} \\ D_{out1} \end{bmatrix} + [\Sigma_{32}] \begin{bmatrix} Z_{i2} \\ \dot{x}_{d2} \\ D_{out2} \end{bmatrix} + [\Sigma_{33}] \begin{bmatrix} Z_{i3} \\ \dot{x}_{d3} \\ D_{out3} \end{bmatrix} + [\Sigma_{34}] U + [\Sigma_{35}] \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \end{bmatrix} + [\Sigma_{36}] Y$$

Afin d'obtenir des relations composées uniquement de variables connues, tous les produits $[\Sigma_{ij}] [V]$ doivent également pouvoir s'exprimer uniquement en fonction des variables connues.

Les produits $[\Sigma_{i4}] [U]$ et $[\Sigma_{i6}] [Y]$, $i = 1..3$, ne sont fonctions que des entrées et sorties.

Le produit $[\Sigma_{i5}] [\dot{x}_i, Z_d, D_{in}]^T$, $i = 1..3$, est toujours nul (puisque Σ_{i5} , $i = 1..3$ est toujours nul).

Le produit $[\Sigma_{i3}] [Z_{i3}, \dot{x}_{d3}, D_{out3}]^T$, $i = 1..3$, en utilisant les relations $D_{out} = L \cdot D_{in}$, $Z_d = H'(s) \cdot \dot{x}_d$ et $Z_i = H(1/s) \cdot \dot{x}_i$, peut être exprimé uniquement en fonction des variables connues, par définition vu le type de variables rangées dans les vecteurs Z_{i3} , $\dot{x}_{d3}$ et D_{out3} .

Les produits $[\Sigma_{i2}] [Z_{i2}, \dot{x}_{d2}, D_{out2}]^T$, $i = 1..3$, et $[\Sigma_{i1}] [Z_{i1}, \dot{x}_{d1}, D_{out1}]^T$, $i = 2..3$, peuvent en partie s'exprimer en fonction des variables connues mais aussi en fonction des variables de $[\dot{x}_{i1}, Z_{d1}, D_{in1}]^T$. Ainsi, si $[\Sigma_{i1}] [Z_{i1}, \dot{x}_{d1}, D_{out1}]^T$ peut (respectivement ne peut pas) être exprimé en fonction des variables connues, ainsi peut (respectivement ne peut pas) l'être le produit $[\Sigma_{i2}] [Z_{i2}, \dot{x}_{d2}, D_{out2}]^T$.

Puisque $[\Sigma_{11}]$ est constitué de toutes les valeurs opposées situées symétriquement dans la matrice, chaque variable de $[\dot{x}_{i1}, Z_{d1}, D_{in1}]^T$ est dépendante de sa variable complémentaire dans $[Z_{i1}, \dot{x}_{d1}, D_{out1}]^T$, c'est-à-dire qu'il va exister une relation implicite entre ces deux variables, elles ne pourront pas être exprimées uniquement en fonction des variables connues.

Ce résultat peut être vérifié sur le bond-graph figure II.10.

La détermination des variables f_1 , e_3 et f_{12} à partir de la matrice Σ déduite du bond-graph mène aux équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 f_1 &= f_4 - f_2 = f_5 - f_3 = f_6 - f_{11} - f_3 = f_3 - f_3 - f_{13} \\
 &= -f_{14} - f_{15} = -f_3 - D_f \\
 e_3 &= e_2 - e_6 + e_{14} = e_1 - e_5 + e_{13} = e_1 - e_4 + E_1 - D_e + e_{11} - e_{12} \\
 &= e_1 - e_1 + E_1 - D_e + e_5 - e_{12} = E_1 - D_e + e_4 - E_1 + D_e - e_{12} = e_1 - e_{12} \\
 f_{12} &= f_{13} = f_{14} - f_{15} = f_3 - D_f
 \end{aligned}$$

Lorsqu'on essaie de déterminer f_1 , f_3 reste dans l'équation et de même e_1 reste dans l'équation lorsqu'on essaie de déterminer e_3 , on peut donc en conclure qu'il existe une équation implicite entre les variables associées à I1 et C1. De la même façon, il y a une équation implicite entre e_3 et f_{12} . On aurait déjà pu parvenir à cette conclusion par le fait qu'il existe entre ces variables des valeurs opposées symétriquement situées dans la matrice Σ (propriété issue de celles de la matrice de structure S qui sert de base à la construction de la matrice Σ).

Remarque

La matrice Σ , puisqu'elle contient toutes les relations utiles entre les flux, les efforts, les sources et les capteurs du système, peut également être utilisée afin de générer les Relations de Redondance Analytique.

II - 2 - 3 - 2 Etude des boucles causales entre les paires d'éléments

Nous avons montré ci-dessus que l'existence de relations implicites peut être détectée par la présence de valeurs opposées situées symétriquement dans la matrice Σ . Puisque les valeurs dans la matrice de structure S (qui constitue une sous-matrice de Σ) sont le résultat de

la somme des gains de tous les chemins causaux entre les deux éléments impliqués, ne croisant aucune jonction connectée à un capteur (puisque Y a été introduit dans V_E), une valeur non nulle dans cette matrice correspond sur le bond-graph à un nombre impair de chemins causaux, ne croisant aucune jonction connectée à un capteur, entre les deux éléments impliqués. Ainsi des valeurs opposées dans la matrice résultent dans l'existence d'un nombre impair de boucles causales, ne croisant aucune jonction connectée à un capteur, entre les deux éléments.

Revenons sur l'exemple de la figure II.4. Dans cet exemple, il y a trois boucles causales entre I1 et C1 ne croisant aucune jonction connectée à un capteur. Puisque ce nombre est impair, nous savons qu'il y aura une équation implicite liant les variables associées à I1 et C1. Cela est vérifié lorsque l'on calcule le flux f_1 et l'effort e_3 , comme nous l'avons vu dans la partie II-2-3-1.

II - 3 Utilisation d'une nouvelle représentation graphique : le graphe causal

II - 3 - 1 Motivation pour l'utilisation d'une nouvelle représentation graphique

Dans la partie précédente, nous avons proposé des méthodes de génération des Relations de Redondance Analytique directement à partir du modèle bond-graph. Cependant, nous allons montrer que cette démarche présente quelques inconvénients.

Par exemple, considérons le système mécanique suivant et son modèle bond-graph associé :

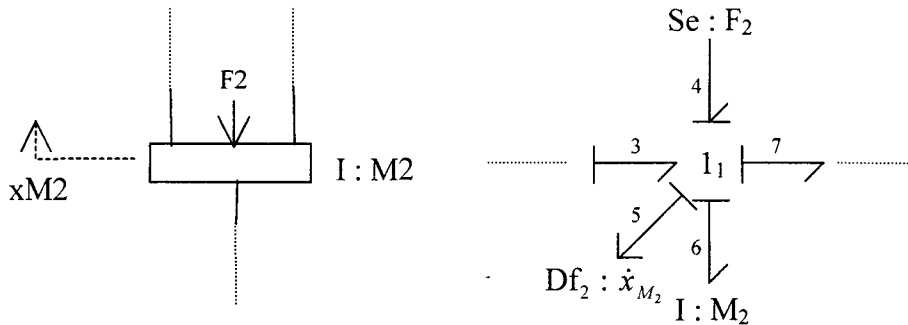


Fig. II.11 : Partie d'un système mécanique et son bond-graph associé en causalité dérivée

Dans l'exemple de la figure II.11, le capteur de flux $Df_2 : \dot{x}_{M_2}$ mesure la vitesse commune à la jonction 1, qui est donc la vitesse de translation de la masse M_2 soumise à la force F_2 (source d'effort Se).

Lorsqu'on examine la causalité au niveau de la jonction 1_1 (traduisant l'égalité entre les vitesses c'est-à-dire les flux), nous pouvons remarquer que les flux f_6 et f_7 peuvent être déterminés par l'intermédiaire de f_3 , mais aussi en utilisant l'information fournie par le capteur Df_2 , ce qui s'écrit :

$$f_6 = f_3 \text{ et } f_6 = Df_2$$

Ainsi, afin d'être capable d'intégrer aisément les informations fournies par les capteurs dans les équations, il est nécessaire de considérer les capteurs en tant que sources d'information (puisque un capteur indique la valeur d'un flux ou d'un effort), afin de faire apparaître sur les jonctions avec capteurs que le flux ou effort correspondant peut être déterminé soit par le lien causal imposant sa valeur sur la jonction (le représentant causal),

soit directement par le capteur. Pour cela, il faudrait inverser la causalité du capteur, ce qui n'est pas autorisé avec la représentation causale classique.

L'utilisation de la bicausalité [4] ne suffit pas non plus, puisque nous voulons représenter sur un même lien la possibilité de calculer l'effort et le flux de plusieurs manières.

De plus, le parcours systématique de tous les chemins causaux afin de générer suffisamment de RRAs indépendantes ou d'effectuer de l'analyse structurale peut s'avérer dans certains cas être complexe si des précautions ne sont pas prises.

Ces raisons nous ont amené à définir une nouvelle représentation graphique construite à partir du modèle bond-graph, que nous appelons le graphe causal, qui va prendre en compte les redondances d'information au niveau des jonctions tout en améliorant la procédure de calcul des RRAs en la rendant plus directe et plus rapide.

II - 3 - 2 Syntaxe et construction du graphe causal

Afin d'illustrer notre méthode, nous allons utiliser le système suivant :

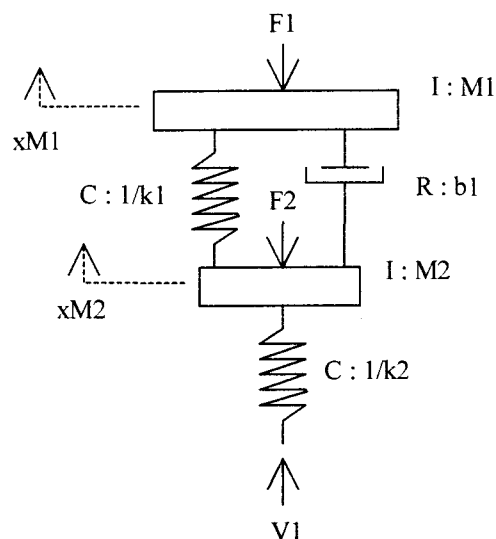


Fig. II.12 : Exemple de système mécanique

Les entrées du système (qui vont servir de commande) sont la vitesse V_1 , et les forces exercées sur les deux masses, notées F_1 et F_2 . Deux capteurs de flux (Df_1 et Df_2) mesurent la vitesse respectivement des masses M_1 et M_2 . Un capteur d'effort (De_1) mesure la force appliquée à l'amortisseur. Le modèle bond-graph correspondant à ce système, affecté d'une causalité dérivée, correspond à la figure II.13 :

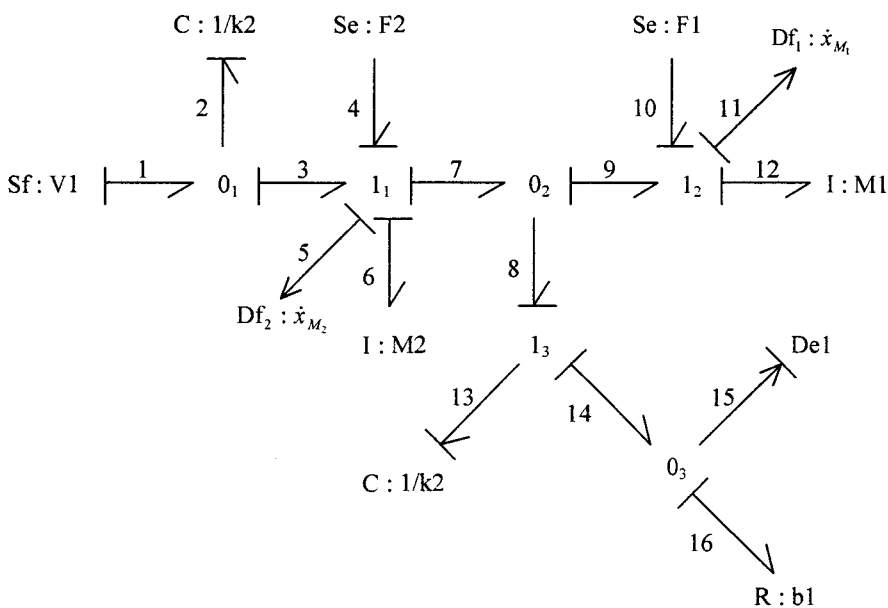


Fig. II.13 : Modèle bond-graph en causalité dérivée

La construction du graphe causal peut être comparée à la détermination du graphe de fluence avec les sommets correspondant aux variables connues (sources et capteurs) et les arcs correspondant aux fonctions. Toutes les variables intermédiaires sont intégrées dans les fonctions et n'apparaissent donc pas dans le graphe causal en tant que sommets. Cependant, nous devons introduire deux nouveaux symboles.

Afin de faire apparaître le fait que les capteurs sont des pseudo-entrées dans notre graphe causal, nous introduisons un opérateur d'équivalence = :

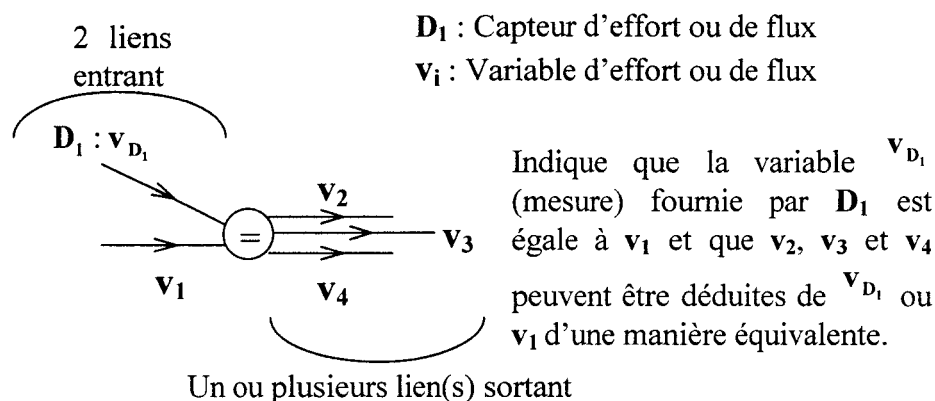


Fig. II.14 : Définition de l'opérateur =

L'exemple de la figure II.11 peut alors être représenté de la manière suivante :

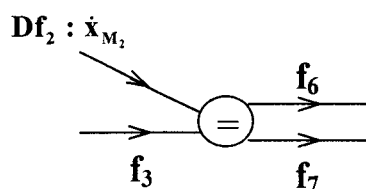


Fig. II.15 : Représentation de l'exemple de la fig. II.9

D'autre part, afin de représenter une somme de variables, l'opérateur + va être utilisé :

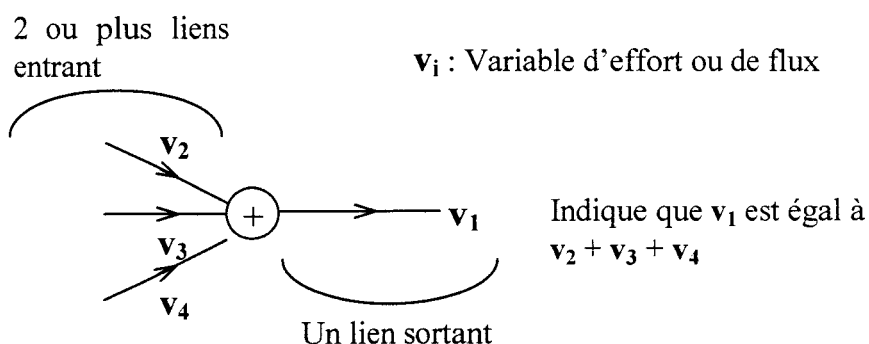


Fig. II.16 : Définition de l'opérateur +

Grâce à ces notations, nous sommes maintenant en mesure de construire notre graphe causal à partir de n'importe quel modèle bond-graph, tel que celui de la figure II.13, en utilisant la méthode suivante :

Méthode de construction du graphe causal à partir d'un modèle bond-graph

Phase 1 :

Pour chaque jonction 0 (resp. 1) reliée à un capteur, nous plaçons un opérateur = dans le graphe causal et nous lui connectons les efforts (resp. les flux) intervenant dans cette jonction, avec les efforts (resp. les flux) connus (la variable imposant sa valeur dans la jonction et la variable mesurée par le capteur) définis entrant dans l'opérateur = et les variables déduites définies comme sortant de l'opérateur.

Phase 2 :

Une fois tous les opérateurs = placés, pour chaque variable (flux ou effort) entrant dans les opérateurs =, nous suivons les chemins causaux sur le modèle bond-graph afin d'exprimer celle-ci en fonction des variables connues par l'intermédiaire des opérateurs = (sortant de ces opérateurs) et des entrées à surveiller (sources du modèle bond-graph), en utilisant au besoin les opérateurs +.

Une fois toutes les variables entrant dans les opérateurs = traitées, toutes les variables sortant de ces opérateurs sont reliées au reste du graphe causal qui est maintenant complet.

Dans l'exemple de la figure II.13, les jonctions 1_1 , 1_2 et 0_3 connectées respectivement aux capteurs Df_2 , Df_1 et De_1 vont ainsi être traitées, chacune des variables imposant sa valeur dans les jonctions correspondantes à ces capteurs (i.e. les variables f_3 , f_9 et e_{16}) étant exprimée

en fonction des variables pouvant être connues par l'intermédiaire des opérateurs = (f_6, f_7, f_{12} et e_{14}) et des entrées à surveiller (les sources F_1, F_2 et V_1).

Ainsi, prenons l'exemple du traitement de la jonction 0_3 :

- tout d'abord, un opérateur = associé à cette jonction est créé :

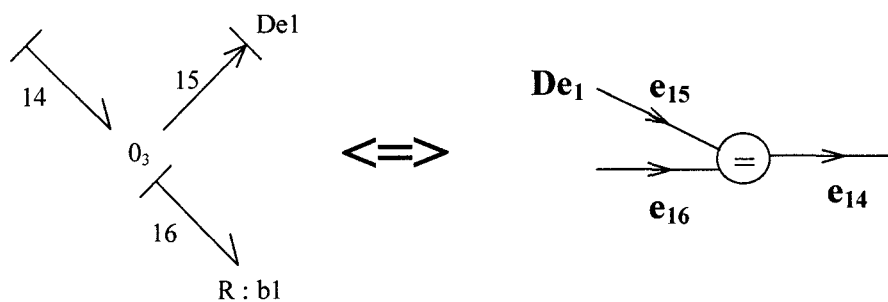


Fig. II.17 : Représentation de la jonction 0_3

dans lequel :

- e_{15} correspond au capteur De_1
- e_{16} impose sa causalité effort sur la jonction
- e_{14} peut être déduit soit à partir de la valeur du capteur, soit par l'intermédiaire de e_{16}

- ensuite, nous calculons e_{16} en fonction des entrées F_1, F_2 et V_1 et des variables connues par l'intermédiaire des opérateurs = (f_6, f_7, f_{12} et e_{14}), ce qui donne dans le cas linéaire :

$$e_{16} = -\frac{b_1}{k_1} s F_1 + \frac{b_1 M_1}{k_1} s^2 f_{12} - \frac{b_1}{k_1} s e_{14} \quad (\text{II.17})$$

Le graphe causal global associé au bond-graph de la figure II.13 est présenté dans la figure suivante (cas linéaire puisqu'on fait apparaître les transformées de Laplace) :

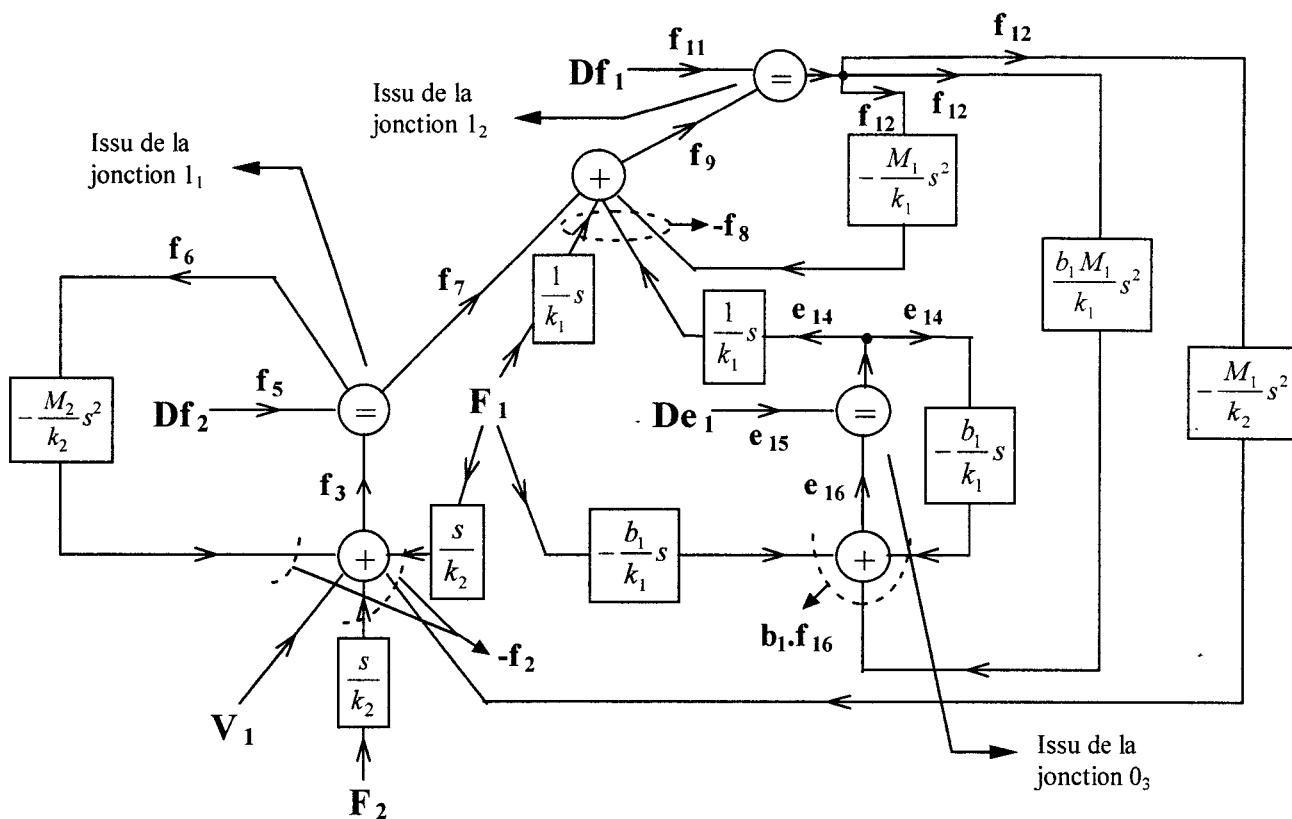


Fig. II.18 : Graphe causal issu du modèle bond-graph fig. II.13 (cas linéaire)

Ce qui nous amène finalement au graphe causal suivant, lorsque l'on ne fait apparaître que les variables utiles (cas linéaire ou non linéaire) :

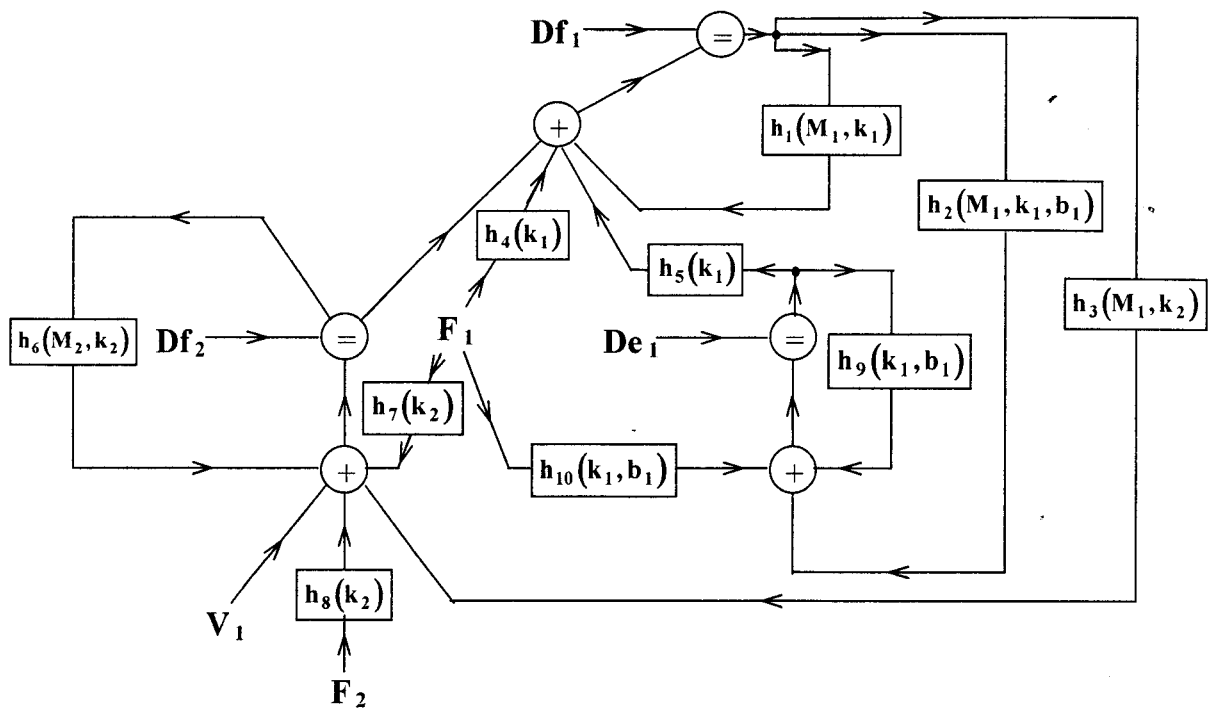


Fig. II.19 : Graphe causal correspondant au bond-graph de la fig. II.13 (cas linéaire ou non linéaire)

II - 3 - 3 Génération des Relations de Redondance Analytique

II - 3 - 3 - 1 Cas linéaire

Tout d'abord, dans le cas linéaire, des simplifications basiques (correspondant aux factorisations résultant de la présence de boucles causales au niveau des opérateurs $=$) sont réalisées afin d'accélérer les traitements ultérieurs :

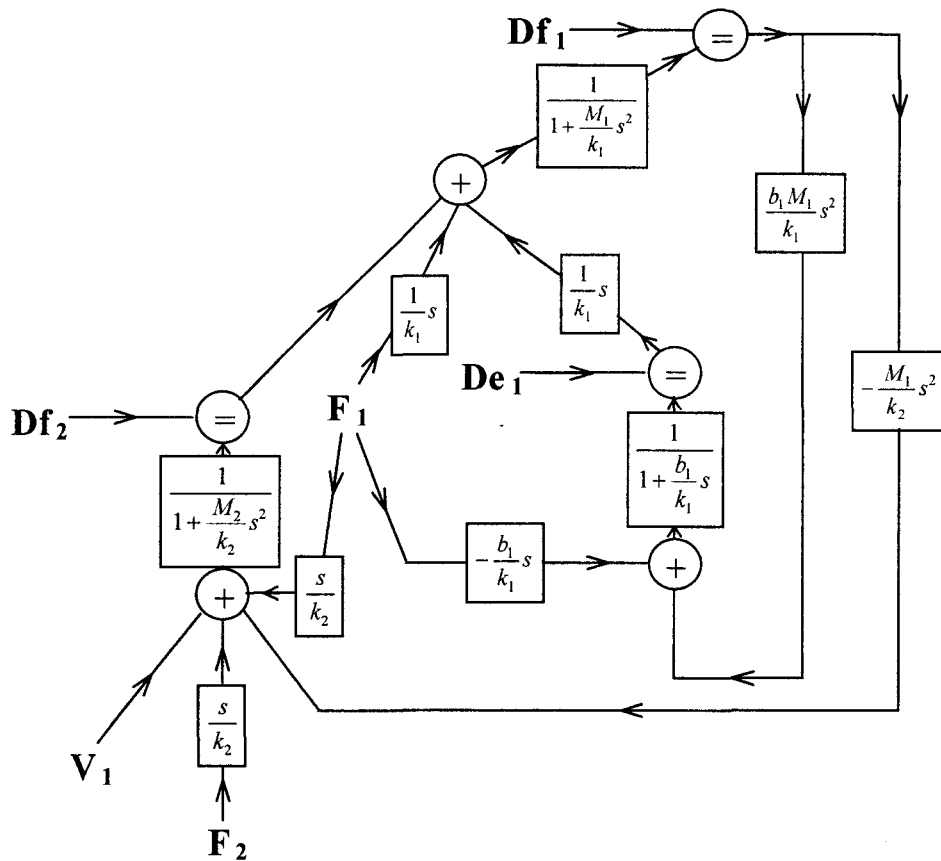


Fig. II.20 : Graphe causal simplifié dans le cas linéaire correspondant au bond-graph de la fig. II.13

On ne fait apparaître directement sur le graphe causal que les variables que l'on veut surveiller, les autres variables étant intégrées dans les fonctions. Si de nouvelles variables devaient être surveillées, celles-ci seraient tout simplement extraites des blocs fonction afin d'apparaître explicitement sur le graphe causal.

Ensuite, afin de déterminer les RRAs, les équivalences au niveau des opérateurs $=$ sont utilisées, pour suivre les différents chemins nous permettant de construire les relations entre les variables à surveiller.

Huit RRAs peuvent être ainsi directement générées de cette manière à partir du graphe causal de la figure II.20 :

- à partir de l'opérateur = près de Df_1 :

En utilisant les valeurs mesurées par les capteurs Df_2 et De_1 :

$$Df_2 + \frac{1}{k_1} s F_1 + \frac{1}{k_1} s De_1 - \left(1 + \frac{M_1}{k_1} s^2 \right) Df_1 = 0 \quad (II.18)$$

En utilisant la valeur mesurée par le capteur De_1 :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} V_1 + \frac{\frac{s}{k_2}}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} F_2 + \left(\frac{1}{k_1} s + \frac{\frac{s}{k_2}}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} \right) F_1 \\ & + \frac{1}{k_1} s De_1 - \left(1 + \frac{M_1}{k_1} s^2 + \frac{\frac{M_1}{k_2} s^2}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} \right) Df_1 = 0 \end{aligned} \quad (II.19)$$

En utilisant la valeur mesurée par le capteur Df_2 :

$$Df_2 + \frac{\frac{1}{k_1} s}{1 + \frac{b_1}{k_1} s} F_1 - \left(1 + \frac{M_1}{k_1} s^2 + \frac{\frac{M_1}{k_1 k_2} s^3}{1 + \frac{b_1}{k_1} s} \right) Df_1 = 0 \quad (II.20)$$

Sans utiliser les autres capteurs :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} V_1 + \frac{\frac{s}{k_2}}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} F_2 + \left(\frac{\frac{s}{k_2}}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} + \frac{\frac{1}{k_1} s}{1 + \frac{b_1}{k_1} s} \right) F_1 \\ & - \left(1 + \frac{M_1}{k_1} s^2 + \frac{\frac{M_1}{k_2} s^2}{1 + \frac{M_2}{k_2} s^2} + \frac{\frac{M_1}{k_1 k_2} s^3}{1 + \frac{b_1}{k_1} s} \right) Df_1 = 0 \end{aligned} \quad (II.21)$$

- à partir de l'opérateur = près de Df_2 :

En utilisant la valeur mesurée par le capteur Df_1 :

$$V_1 + \frac{s}{k_2} F_2 + \frac{s}{k_2} F_1 - \frac{M_1}{k_2} s^2 Df_1 - \left(1 + \frac{M_2}{k_2} s^2\right) Df_2 = 0 \quad (\text{II.22})$$

En utilisant la valeur mesurée par le capteur De_1 :

$$\begin{aligned} V_1 + \frac{s}{k_2} F_2 + \frac{\frac{s}{k_2} F_1 - \frac{M_1}{k_2} s^2 Df_1}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2} - \frac{\frac{M_1}{k_1 k_2} s^3}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2} De_1 \\ - \left(1 + \frac{M_2}{k_2} s^2 + \frac{\frac{M_1}{k_2} s^2}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2}\right) Df_2 = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

- à partir de l'opérateur = près de De_1 :

En utilisant la valeur mesurée par le capteur Df_1 :

$$\frac{b_1}{k_1} s F_1 + \frac{M_1}{k_2} s^2 Df_1 + \left(1 + \frac{b_1}{k_1}\right) De_1 = 0 \quad (\text{II.24})$$

En utilisant la valeur mesurée par le capteur Df_2 :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\frac{b_1}{k_1} s + \frac{\frac{M_1}{k_1 k_2} s^3}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2}}{\frac{M_1}{k_2} s^2}\right) F_1 + \frac{\frac{M_1}{k_2} s^2}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2} Df_2 \\ + \left(1 + \frac{b_1}{k_1} + \frac{\frac{M_1}{k_1 k_2} s^3}{1 + \frac{M_1}{k_1} s^2}\right) De_1 = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

Afin de pouvoir concrètement détecter et isoler les défaillances pouvant survenir sur les sources et les capteurs, le tableau des signatures suivant associé aux RRAs trouvées peut être construit :

Df₁	Df₂	De₁	F₁	F₂	V₁	
1	1	1	1			(II.18)
1		1	1	1	1	(II.19)
1	1		1			(II.20)
1			1	1	1	(II.21)
1	1		1	1	1	(II.22)
	1	1	1	1	1	(II.23)
1		1	1			(II.24)
	1	1	1			(II.25)

Fig. II.21 : Tableau des signatures

A partir de cette table, les RRAs non vérifiées indiqueront quelles variables sont défaillantes. Puisque F_2 et V_1 possèdent la même signature, il ne sera pas possible de déterminer si la faute affecte F_2 , V_1 ou les deux. Afin de remédier à cela, un nouveau placement des capteurs doit être envisagé.

Une particularité très intéressante de notre méthode réside dans le fait que les coefficients dans les relations générées sont aussi simples que possible. Cela est dû au fait que les boucles du graphe causal sont évitées autant que possible. Cependant, si plus de RRAs sont requises, les boucles du graphe causal sont simplifiées (ce qui correspond à des factorisations) au fur et à mesure lorsque cela est possible (si la factorisation n'implique pas d'éléments non linéaires) de manière à pouvoir générer de nouvelles RRAs à partir du graphe causal. Cette opération n'est pas effectuée systématiquement car elle génère des relations de

plus en plus complexes (de plus en plus de termes et de dérivations) et donc de moins en moins fiables (car plus sensibles aux perturbations).

On peut par ailleurs remarquer que les relations de la matrice de transfert peuvent être déterminées directement à partir de notre graphe causal, puisqu'elles représentent les relations entre les sorties (correspondant aux capteurs) et les entrées (les sources). Cela peut requérir certains regroupements du graphe causal (factorisations), ce qui ne pose jamais de problème formel puisque l'on se trouve dans le cas linéaire.

La génération de RRAs supplémentaires n'a pas pour seul but d'être en mesure d'obtenir des signatures différentes pour les variables à surveiller. En effet, certaines des RRAs déjà trouvées peuvent ne pas nous convenir ou ne pas suffire d'où la nécessité de les remplacer ou de les compléter. Ainsi, outre le fait que l'utilisateur peut lui-même imposer ses propres critères, on peut citer les raisons suivantes :

- Pour des raisons de robustesse (fiabilité) sur les conclusions obtenues lors de la détection et la localisation des pannes, on essaiera d'avoir suffisamment de RRAs afin d'avoir des signatures les plus différentes possible (notion de distance entre les signatures)
- Pour les mêmes raisons, si l'on a accès aux valeurs numériques des paramètres, on s'efforcera de choisir des RRAs ayant des coefficients de même ordre de grandeur, afin d'éviter que les variations sur les variables à petit coefficient soient cachées par la présence de variables avec de gros coefficients

- Si certaines parties du système sont connues pour être plus sujettes aux dysfonctionnements, on s'efforcera de générer plus de RRAs faisant intervenir les éléments de ces parties sensibles
- Pour des raisons de qualité et de fiabilité des RRAs, on s'efforcera de privilégier les chemins minimisant le nombre de dérivations (puissances de l'opérateur de Laplace s élevées en linéaire)

II - 3 - 3 - 2 Cas non linéaire

Le principe général de la démarche présentée dans le cas linéaire reste complètement valide dans le cas où le modèle comprend des éléments non linéaires.

En effet, on utilisera cette fois-ci le premier graphe causal généré non simplifié (correspondant à la figure II.19 dans notre exemple), qui ne fait apparaître que des chemins suivant fidèlement la causalité (c'est-à-dire sans simplifications de boucles), et les relations qui en sont déduites font donc toujours intervenir les éléments non linéaires en respectant le sens causal de leurs relations associées. Bien évidemment, si le modèle est mixte (éléments non linéaires cohabitant avec des éléments linéaires), il sera toujours possible de simplifier certaines boucles du graphe causal (correspondant à des factorisations dans les relations), la seule condition étant de vérifier que ces simplifications respectent la causalité des éléments non linéaires (c'est-à-dire qu'on s'interdit d'essayer d'inverser les fonctions non linéaires non inversibles).

Bien évidemment, comme la présence d'éléments non linéaires peut impliquer l'impossibilité de simplifier certaines des boucles du graphe causal, on sera en mesure de générer moins de RRAs qu'en linéaire (car on sera en présence de moins de chemins

causaux). Si d'autres RRAs s'avéraient nécessaires, il faudra alors ajouter des capteurs bien placés dans le système, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

II - 4 Surveillabilité et placement des capteurs

Il est possible de déterminer si les variables à surveiller vont pouvoir l'être avec les capteurs disponibles, et ce avant même la génération des Relations de Redondance Analytique et la déduction du tableau des signatures. C'est le but de l'analyse de la surveillabilité [12]. S'il apparaît que certaines variables ne pourront pas être surveillées, on va alors procéder à un nouveau placement des capteurs qui va permettre par la suite de générer suffisamment de RRAs afin de surveiller toutes les variables.

II - 4 - 1 Surveillabilité

II - 4 - 1 - 1 Notion de surveillabilité

La notion de surveillabilité d'un modèle bond-graph a été introduite dans [12] dans le cas linéaire.

Un modèle bond-graph est dit surveillable si toutes ses variables connues sont surveillables, c'est-à-dire si toute défaillance affectant un capteur ou une source peut être détectée et isolée.

La surveillabilité doit donc être vérifiée pour chaque capteur et chaque source.

Pour les capteurs, il a été montré qu'ils seront surveillables si leur nombre est supérieur ou égal à deux. En effet, à partir de la matrice de transfert, des RRAs indépendantes permettant d'isoler les fautes sur les capteurs sont directement trouvées. Il faut remarquer

cependant que les RRAs ainsi déterminées induisent le nombre maximal de dérivations des variables issues des capteurs (égal à l'ordre du modèle), ce qui peut poser des problèmes numériques graves en présence de bruits de mesure.

Afin de déterminer la surveillabilité des sources, le théorème suivant est utilisé :

Théorème [12] :

Soient p capteurs D_i , $i = 1 \dots p$, m sources S_j , $j = 1 \dots m$ et la matrice de transfert $M_T(s) = [m_{ij}]$, $i = 1..p$, $j = 1..m$. Une condition nécessaire et suffisante d'être en mesure de localiser une faute sur la source S_k est :

Pour tout k de $\{1, \dots, m\}$, le vecteur $[m_{1k} \dots m_{pk}]^T$ n'est pas proportionnel à un vecteur colonne $[m_{1j} \dots m_{pj}]$ de $M_T(s)$ ($j \neq k$).

Ce théorème, appliqué à la représentation bond-graph, mène à la proposition suivante :

Proposition [12] :

Il y a proportionnalité entre les colonnes $[m_{1k} \dots m_{pk}]^T$ et $[m_{1j} \dots m_{pj}]^T$ de la matrice de transfert si le chemin causal utilisé pour atteindre le capteur i , à partir de la source j , est inclus (en termes de jonctions et d'éléments) dans le chemin causal utilisé pour atteindre le même capteur, à partir de la source k , $\forall i = 1 \dots p, j \neq k$.

Exemple :

Illustrons cette proposition avec l'exemple de la figure II.22 :

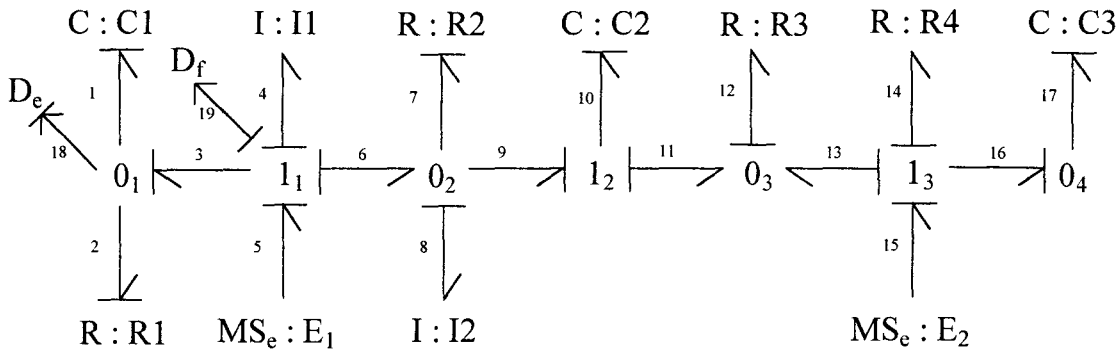


Figure II.22 : Bond-graph avec sources non surveillables

Lorsque les chemins causaux reliant la source E_2 et les capteurs (D_e et D_f) sont recherchés, il est constaté que tous les chemins traversent la jonction 1_1 où est située E_1 et tous incluent les chemins causaux reliant E_1 et les capteurs (D_e and D_f).

Par exemple, le chemin causal $E_1 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 18 \rightarrow D_e$ est inclus dans le chemin causal $E_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 13 \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 18 \rightarrow D_e$ et d'autre part le chemin causal $E_1 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow R1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 19 \rightarrow D_f$ est inclus dans le chemin causal $E_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 13 \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 19 \rightarrow D_f$.

On peut donc en conclure que les sources du bond-graph de la figure II.22 ne sont pas surveillables.

II - 4 - 1 - 2 Détermination de la surveillabilité à partir des graphes causaux

Reprenons le modèle bond-graph de la figure II.14. Puisque nous sommes dans le cas linéaire, nous savons d'ores et déjà que les capteurs du système seront surveillables, puisqu'il en existe plus de deux (D_{f1} , D_{f2} et D_{e1}). Il nous reste donc à traiter la surveillabilité des sources, qui est plus délicate à analyser.

Dans la figure II.22, nous avons pu constater que les Relations de Redondance Analytique que nous avons trouvées ne permettaient pas d'isoler les défaillances pouvant affecter V_1 ou F_2 (alors que F_1 est tout à fait surveillable). Seulement cela ne suffit pas à affirmer qu'il n'existe pas de RRA qui permette de différencier les signatures de V_1 et F_2 , et donc d'être capable d'isoler les pannes pouvant survenir sur V_1 ou F_2 .

La méthode que nous proposons consiste à construire un tableau de signatures généralisé ne faisant intervenir que les sources, généralisé car il n'est pas dépendant des RRAs choisies. Ce tableau exprime toutes les dépendances entre les sources, c'est à dire qu'il fournit la liste exhaustive des différents cas de figure qui vont pouvoir apparaître pour ce qui est de la présence ou non des sources dans les équations générées.

Afin de réaliser cela, on analyse tous les opérateurs $+$ du graphe causal : toutes les sources descendant (donc en suivant la causalité) directement (c'est à dire sans passer par un opérateur $=$) d'un même opérateur $+$ apparaîtront obligatoirement, du fait des propriétés des graphes causaux, dans toute relation faisant intervenir cet opérateur $+$.

En parcourant tous les opérateurs $+$ du graphe causal, on peut ainsi en déduire le tableau des signatures généralisé, ce qui donnera pour l'exemple de la figure II.13 :

V_1	F_2	F_1
1	1	1
		1
		1

Figure II.23 : Tableau des signatures généralisé construit à partir du graphe causal figure II.20

On peut vérifier que ces regroupements correspondent bien aux regroupements constatés dans le tableau des signatures de la figure II.21. Si l'on examine le tableau des signatures généralisé, on constate que F_1 sera surveillable mais qu'on ne sera pas en mesure d'isoler une défaillance intervenant sur V_1 ou F_2 . De plus, cette conclusion étant indépendante des RRAs choisies, on est sûr qu'il ne peut exister de RRA permettant d'isoler les défaillances au niveau de V_1 ou F_2 . Grâce à ces informations, nous savons donc comment orienter notre génération des RRAs et nous savons quels problèmes nous allons devoir résoudre si l'on veut améliorer le placement des capteurs au sein du système.

II - 4 - 1 - 3 Cas non linéaire

Dans le cas non linéaire, les résultats trouvés à propos des capteurs dans le cas linéaire ne sont plus valables. Par contre, la définition de surveillabilité des sources en termes d'inclusions de chemins ainsi que celle utilisant le tableau des signatures généralisé restent valides, puisque celles-ci ne font intervenir que les parcours causaux du modèle bond-graph, et ceux-ci respectent la causalité des éléments non linéaires.

La seule différence que l'on va avoir réside donc dans le traitement de la surveillabilité des capteurs, qui était triviale dans le cas linéaire.

Dans le cas non linéaire, il peut exister des dépendances entre les RRAs liées aux capteurs, tout comme il en existait déjà pour les RRAs liées aux sources dans le cas linéaire.

La encore, le graphe causal va nous donner toutes les informations nécessaires afin de déterminer ces dépendances, cette fois celles existant entre les capteurs.

Reprenons le modèle bond-graph de la figure II.13 mais cette fois-ci utilisons sa représentation sous forme de graphe causal non simplifié, valable également dans le cas non linéaire, de la figure II.19.

Dans un premier temps nous considérerons que tous les éléments sont non linéaires, et donc qu'aucun regroupement ne peut être effectué sur le graphe causal.

Examinons tout d'abord les boucles existant entre les opérateurs $=$ et eux-mêmes. On constate qu'il existe une boucle directe pour chaque opérateur $=$, c'est à dire ne faisant intervenir aucun autre opérateur $=$: pour celui associé à Df_1 , passant par h_1 , pour celui associé à Df_2 , passant par h_6 et pour celui associé à De_1 , passant par h_9 . On peut donc en déduire que chaque fois qu'on va passer par ces opérateurs $=$ pour déterminer les relations du système (et dans le cas présent les RRAs), on va ajouter un terme dépendant du capteur associé.

Dans le cas linéaire, on arrivait à exprimer chaque capteur en fonction uniquement des sources (et de lui-même) car il existait obligatoirement un chemin du graphe causal partant de l'opérateur $=$ associé à chacun des capteurs et revenant au même opérateur, n'entraînant des dépendances qu'avec les sources, puisque les boucles des opérateurs $=$ pouvaient être simplifiées. On peut donc en déduire le théorème suivant, qui n'a bien sûr d'intérêt qu'en non linéaire :

Théorème :

Un capteur D_i sera surveillable (c'est-à-dire qu'on sera en mesure de détecter et d'isoler une défaillance pouvant l'affecter) s'il existe une boucle dans le graphe causal partant de son opérateur $=$ associé et y revenant, cette boucle ne traversant aucun opérateur $=$ sur lequel il existe une boucle directe sur lui-même qui ne peut être simplifié sans violer la causalité d'éléments non linéaires.

Preuve :

En effet, l'existence d'une boucle (chemin fermé) au niveau de l'opérateur = d'un capteur signifie qu'on peut écrire une RRA faisant intervenir ce capteur (avec éventuellement des sources). Dans le cas où les autres opérateurs = traversés ne possèdent pas de boucles avec eux-mêmes ce là veut dire qu'on ne sera pas obligé de faire intervenir les autres valeurs mesurée par les autres capteurs.

Par contre, pour tout opérateur = traversé dont la boucle directe ne peut être simplifiée à cause de la présence d'un élément non linéaire dont la causalité ne peut être inversée, le capteur qui y est associé figurera dans la RRA.

Ainsi, dans le cas où il existe des dépendances entre des opérateurs = (donc entre les variables mesurées par leurs capteurs associés), nous pourrions en déduire les dépendances entre les RRAs liées aux capteurs, comme nous l'avons fait pour les sources.

Dans le cas non linéaire, on construira alors également un tableau des signatures généralisé, en y ajoutant cette fois-ci les dépendances entre les capteurs, qui nous permettra de visualiser les dépendances entre toutes les variables à surveiller du système, et entre autres on pourra en déduire la surveillabilité ou non du modèle, et nous donnera là encore des indications si l'on veut améliorer le placement des capteurs pour la surveillance du système.

Dans le cas où le modèle est mixte, c'est à dire qu'il possède des éléments linéaires et des éléments non linéaires, on pourra effectuer les simplifications ne faisant intervenir que les éléments linéaires, puis la même démarche et les mêmes conclusions que l'on vient de voir pourront être appliquées.

II - 4 - 2 Placement des capteurs pour la surveillance

II - 4 - 2 - 1 Principe général

La méthode de placement des capteurs proposée a deux objectifs.

Le premier est bien évidemment de déterminer les positions des capteurs engendrant la surveillabilité du système. Le deuxième consiste à choisir, parmi les positions retenues, celle qui va réduire au maximum le nombre de relations implicites dans le modèle, facilitant ainsi les calculs (cf. les parties II-2-2 et II-2-3 de ce chapitre).

Si les défaillances affectant deux sources ne peuvent être isolées, un placement de nouveaux capteurs permettant la surveillabilité de ces deux sources est proposé.

Afin de déterminer les positions convenables pour les nouveaux capteurs, les différents chemins causaux existant entre les deux sources et le reste du système peuvent être schématisés comme sur le graphique suivant :

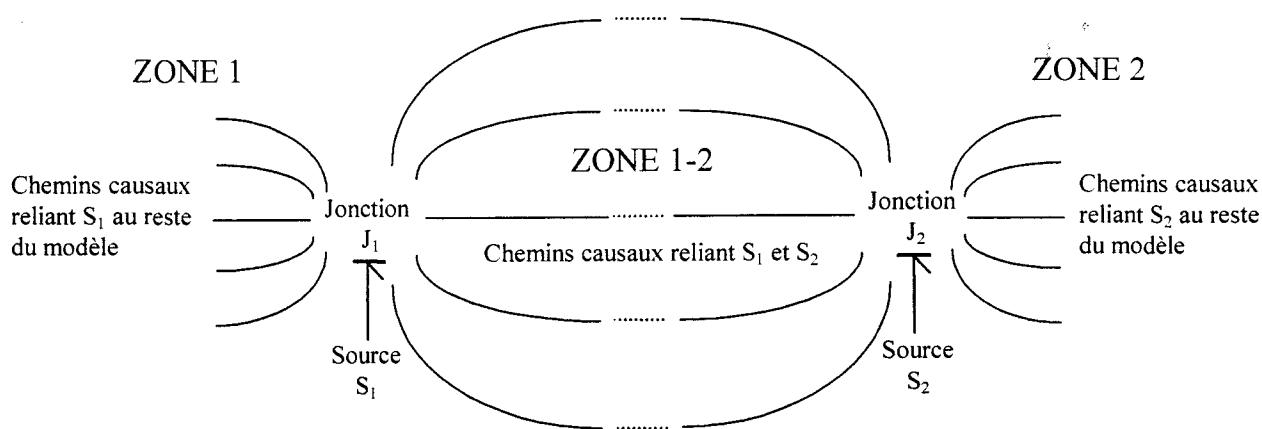


Figure II.24 : Différents chemins causaux entre les deux sources et le reste du modèle bond-graph

Dans le centre du graphique (zone 1-2), sont représentés tous les chemins causaux impliquant les deux sources S_1 et S_2 , alors que les chemins causaux existant entre chacune de ces deux sources et le reste du modèle bond-graph sont situés sur les parties gauche (zone 1) et droite (zone 2) du graphique.

Du fait de la structure causale des modèles bond-graph, on peut distinguer deux choix pour les placements des capteurs aboutissant à l'existence de chemins causaux non inclus entre les deux sources et les capteurs :

- option à deux capteurs : dans ce cas, les deux capteurs sont placés dans les zones 1 et 2. Deux capteurs sont nécessaires, sinon il y aurait inclusion des chemins causaux reliant les sources S_1 et S_2 aux capteurs. Il faut donc placer un capteur dans la zone 1 et un autre dans la zone 2.

- option à un capteur : si l'on veut placer un seul capteur supplémentaire, il faut le placer dans la zone 1-2, de telle manière qu'il existe au moins deux chemins non inclus l'un dans l'autre reliant chacune des sources au capteur.

Evidemment, afin de minimiser le nombre de capteurs le second choix sera préféré dans la mesure du possible.

Dans le cas où plus de deux sources n'étaient pas surveillables, le placement global le plus optimisé sera choisi. D'autre part, il est également souhaitable de proposer un placement des capteurs minimisant le nombre d'équations implicites lors des calculs.

La méthode générale suivante de placement des capteurs pour la surveillance des systèmes physiques modélisés par bond-graph est donc proposée :

Méthode générale de placement des capteurs :

- 1) Déterminer toutes les sources sur lesquelles les fautes ne peuvent être localisées par l'étude de la surveillabilité.
- 2) Pour chaque groupe de sources « dépendantes », recenser tous les placements des capteurs qui permettraient de « casser » les chemins causaux reliant les sources, les rendant ainsi surveillables.
- 3) Sélectionner, parmi les placements retenus, celui qui permettra de réduire le plus possible le nombre d'équations implicites existant entre les variables du modèle, c'est-à-dire les placements qui vont « casser » le plus possible de boucles causales entre les éléments ne passant pas par une jonction connectée à un capteur.

Remarques

Si le nombre de capteurs disponibles est limité, cette méthode proposera le placement de capteurs engendrant le plus possible de sources surveillables, mais il pourra dans ce cas bien évidemment subsister des variables non surveillables.

D'autre part, si l'on part d'un système possédant déjà des capteurs que l'on ne souhaite pas déplacer ou retirer, on se servira des informations fournies par ces capteurs et on en rajoutera d'autres si besoin est, mais le nombre global de capteurs ne sera pas forcément minimal, le placement des capteurs de départ n'étant pas forcément optimisé pour la surveillance.

Exemple :

Considérons le modèle bond-graph de la figure II.22 dans lequel tous les capteurs ont été retirés :

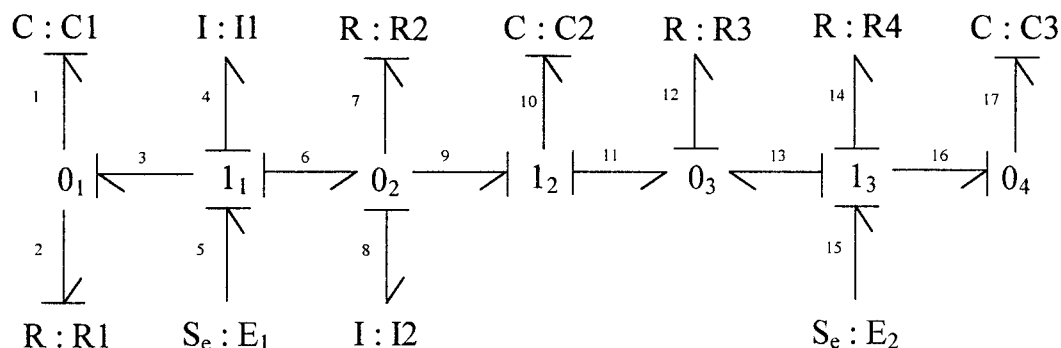


Figure II.25 Bond-graph sans capteurs

Dans ce bond-graph sont présentes deux sources E_1 et E_2 . Puisque aucun capteur n'a pour l'instant été placé, les deux sources ne sont pas surveillables. Un des objectifs étant de minimiser le nombre de capteurs, un seul capteur va être ajouté, sur une des jonctions situées strictement entre les jonctions 1_1 et 1_3 , c'est-à-dire sur la jonction 0_2 , 1_2 ou 0_3 .

Ce capteur doit également être placé afin de minimiser le nombre de relations implicites, c'est-à-dire le nombre de boucles causales entre éléments ne parcourant aucune jonction connectée à un capteur.

Si le capteur est placé sur la jonction 0_2 , 4 boucles de ce type seront « cassées » : $I2-R1$, $I2-C1$, $I2-R2$ et $I2-C2$.

Sur la jonction 1_2 , 2 boucles seraient « cassées » : $C2-I2$ et $C2-R3$.

Sur la jonction 0_3 , 2 boucles seraient « cassées » : $R3-C2$ et $R3-C3$.

Donc le choix retenu est de placer un capteur d'effort (puisque'il s'agit d'une jonction 0) sur la jonction 0_2 :

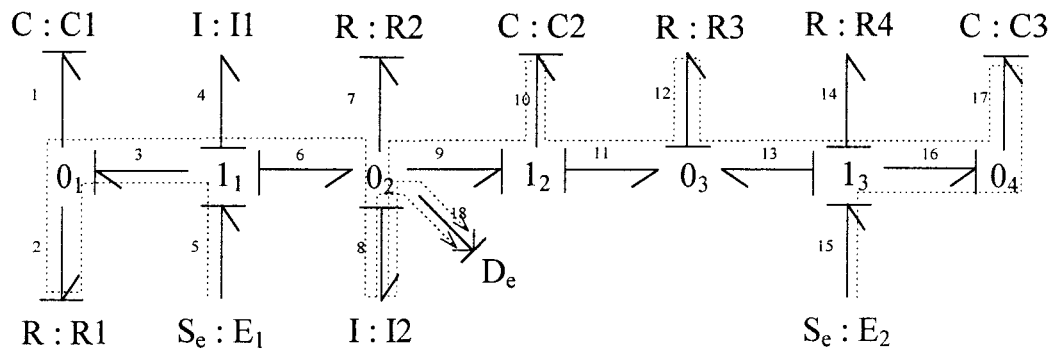


Figure II.26 - Bond-graph avec sources surveillables

Avec un capteur d'effort sur la jonction 0_2 , il y a maintenant un chemin causal reliant la source E_1 au capteur et un chemin causal reliant la source E_2 au capteur qui ne sont pas inclus entre eux.

De ce fait les deux sources E_1 et E_2 deviennent surveillables.

Dans cet exemple, nous avons explicité le placement des capteurs afin d'obtenir des sources surveillables. Bien évidemment, si l'on veut être en mesure de surveiller également les capteurs, au moins un autre capteur doit être ajouté, puisque il a été montré précédemment qu'une condition nécessaire et suffisante pour la surveillabilité des capteurs dans le cas linéaire est qu'il y en ai au moins deux. Quelle que soit la position de ce deuxième capteur, le modèle sera complètement surveillable, mais on s'efforcera tout de même de le placer afin de « casser » le plus possible d'autres boucles causales ne traversant aucune jonction avec capteur, ceci toujours afin de minimiser le nombre de relations implicites.

II - 4 - 2 - 2 Placement des capteurs pour la surveillabilité des sources

Dans la partie II-4-1-1, nous avons rappelé la définition de la surveillabilité des sources en termes d'inclusions de chemins causaux entre les sources et les capteurs, les capteurs étant placés dans le système.

A partir de cette définition, nous pouvons en déduire une condition nécessaire et suffisante nous permettant de déterminer si l'on va être en mesure de trouver un placement des capteurs dans un modèle bond-graph permettant d'assurer la surveillabilité des sources (et donc du système global si les capteurs ont déjà été déterminés comme étant surveillables, ce qui est toujours le cas en linéaire s'il en existe au moins deux).

Théorème :

Il existe un placement des capteurs permettant de résoudre le problème de la surveillabilité des sources d'un système modélisé par bond-graph si, pour chaque source S_k non surveillable, il existe une jonction J_k accessible à partir de S_k en arrivant par le flux (respectivement par l'effort) si celle-ci est une jonction 1 (respectivement 0) et que le chemin causal entre S_k et J_k n'est pas inclus dans un des autres chemins causaux source - jonction partant des autres sources non surveillables retenus pour assurer la surveillabilité des autres sources.

Preuve :

En fait, le théorème précédent se démontre directement à partir du théorème sur la surveillabilité des sources. En effet, les chemins partant des sources ne peuvent atteindre les capteurs que si ces chemins arrivent en suivant la même variable (effort ou flux) que le type du capteur, c'est-à-dire le flux pour les capteurs situés sur les jonctions 1 et l'effort pour les capteurs situés sur les jonctions 0. Le théorème précédent peut donc s'assimiler à un cas particulier du théorème sur la surveillabilité des sources en prenant comme hypothèse qu'il existe un capteur sur chaque jonction (de flux sur les jonctions 1 et d'effort sur les jonctions 0).

A partir de ce théorème, on peut en déduire une procédure de recherche des jonctions sur lesquelles l'ajout de capteurs engendrera la surveillabilité des sources.

Procédure de sélection des jonctions pour la surveillabilité des sources :

Pour chaque source S_k non surveillable, on parcourt le bond-graph afin de déterminer les jonction J_k vérifiant le théorème précédent. Lors du parcours du bond-graph, on retire donc tous les chemins causaux source S_k - jonctions éligibles passant par les jonctions où se situent les autres sources non surveillables arrivant par le même type de variable (effort ou flux) que le type des autres sources non surveillables qui y sont connectées. En pratique, on arrêtera de rechercher les chemins se poursuivant au delà de telles jonctions puisqu'ils seront forcément inclus dans d'autres chemins. Dans le cas où en appliquant cette procédure aucune jonction n'est trouvée pour la source S_k , on en déduira qu'une panne affectant celle-ci ne pourra pas être isolée. Cette procédure reste valable si aucun capteur n'est initialement présent dans le système, il suffira alors de considérer que toutes les sources sont non surveillables.

II - 4 - 2 - 3 Cas non linéaire

Dans le cas non linéaire, là encore la différence va se situer au niveau du traitement des capteurs. En effet, tout comme l'analyse de la surveillabilité des sources pouvait s'effectuer de la même manière en non linéaire qu'en linéaire, la méthode de détermination des positions des capteurs engendrant la surveillabilité des sources est identique en non linéaire. Par contre, il va maintenant falloir envisager le cas où tous les capteurs ne sont pas surveillables, et donc déterminer les placements des capteurs permettant de la surveillabilité des capteurs également.

Dans la partie II-4-1-3, nous avons proposé un théorème nous permettant de conclure à la surveillabilité des capteurs même dans le cas d'un modèle comportant des éléments non linéaires. En effet, il a été établi qu'un capteur D_i était surveillable s'il existe une boucle dans le graphe causal partant de son opérateur = associé et y revenant, cette boucle ne traversant aucun opérateur = sur lequel il existe une boucle directe sur lui-même qui ne peut être simplifiée à cause de la présence d'éléments non linéaires dont la causalité ne peut être inversée. Dans le cas où de tels opérateurs = étaient rencontrés, les capteurs y étant associés figureront systématiquement dans toute relation issue de l'opérateur = initial (associé au capteur D_i), nous permettant d'en déduire les dépendances entre les capteurs.

Ainsi, le problème provient de la présence de boucles au niveau de certains opérateurs = traversés lorsqu'on essaie de trouver une boucle reliant l'opérateur = associé à D_i à lui-même. La solution consiste donc à placer les nouveaux capteurs de telle sorte que ces boucles sur les opérateurs = traversés soient « cassées », de manière à retirer la dépendance vis-à-vis des capteurs associés à ces opérateurs. En d'autres termes, pour chacune de ces boucles posant problème, on va placer un capteur sur une des jonctions traversées par la boucle en question, la jonction étant éligible si elle est de même type que la variable suivie en traversant cette jonction (c'est-à-dire de type 1 si on suit le flux et de type 0 si on suit l'effort), le type du capteur étant fixé par la type de la jonction retenue (de flux sur une jonction 1 et d'effort sur une jonction 0).

II - 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux approches structurales différentes permettant de réaliser des systèmes de surveillance en utilisant la modélisation par bond-graphs.

La première approche, utilisant le parcours classique du modèle bond-graph, nous a permis de faire ressortir les différents problèmes pouvant survenir lors de la détermination du système de surveillance, et notamment les complications engendrées par la présence de relations implicites dans les équations associées au système.

La deuxième approche, se basant sur la construction d'un graphe causal déduit directement à partir du modèle bond-graph, nous a permis de proposer une démarche de conception et d'analyse plus efficace, facilitant notamment le traitement des bond-graphs comportant des éléments non linéaires.

La dernière partie de ce chapitre nous a permis de proposer des premières indications afin de placer au mieux les capteurs au sein du système, ici afin d'optimiser le traitement de la surveillance tout en minimisant le nombre de relations implicites.

CHAPITRE III

GESTION DE SOUS-MODELES

BOND-GRAPHS

Sommaire du chapitre III

III-1 Introduction.....	78
III-2 Définition des sous-modèles bond-graphs	79
III-3 Traitement des sous-modèles bond-graphs.....	100
III-4 Extension à la bicausalité	118
III-5 Conclusion	122

III - 1 Introduction

De nos jours, la phase de conception de systèmes physiques quels qu'ils soient repose bien souvent sur la réutilisation d'anciens systèmes que l'on améliore ou que l'on assemble. Bien qu'il apparaisse évident que cette démarche est préférable à celle consistant à reprendre l'analyse depuis le début, cette réutilisation de systèmes déjà existant et validés nécessite bien souvent un transfert de connaissances entre différentes personnes (d'autant plus que le projet est important et étalé dans le temps), et force est de constater que si une procédure rigoureuse n'est pas utilisée, ce transfert résulte bien souvent en un ralentissement de l'avancement du projet, voire à des problèmes de compréhension de l'acquis. Afin de faciliter cette étape cruciale, l'idéal est que chaque équipe de développement se constitue sa propre bibliothèque de modèles (avec leurs systèmes physiques associés), ceux-ci devant être décrits autant que possible d'une manière uniforme (i.e. en minimisant les langages et types de représentation utilisés) afin de faciliter aussi bien la compréhension des modèles que l'assemblage de ceux-ci.

Les modèles bond-graph ont la particularité d'être très proches dans leur représentation des systèmes physiques qu'ils modélisent, leur vocation multi-domaine n'est d'ailleurs plus à démontrer. D'autre part, de par leur nature causale, ceux-ci fournissent de nombreux outils d'analyse structurelle [15], [16], [4], [19] qui peuvent apporter une aide non négligeable lors de la phase de conception (comme nous le verrons dans le chapitre suivant) tout en constituant un tremplin vers l'écriture des différentes équations mathématiques qui se fait naturellement grâce à ce type de représentation. Lorsque cela est possible, l'utilisation de la modélisation par bond-graphs pour la description des systèmes physiques qui vont être regroupés dans des bibliothèques apparaît donc être un choix judicieux.

Dans ce chapitre, nous allons ainsi proposer un formalisme permettant de gérer l'utilisation de sous-modèles bond-graphs dans un logiciel tel qu'ARCHER, en précisant les différentes informations qui vont être déterminées pour chaque sous-modèle afin d'adapter les procédures existantes de calcul formel et d'analyse structurelle. En fait, nous irons plus loin en proposant, conjointement au traitement de sous-modèles issus de bibliothèques (qui seront désignés par la suite par « sous-modèles physiques »), une méthode de décomposition des bond-graphs en sous-modèles « algorithmiques » qui va nous permettre de faciliter les différents traitements existants. Enfin, nous montrerons que notre démarche peut être aisément adaptée afin de traiter des sous-modèles bicausaux.

III - 2 Définition des sous-modèles bond-graphs

III - 2 - 1 Sous-modèles issus de bibliothèques de modèles

III - 2 - 1 - 1 Choix d'un type de représentation

Dans l'absolu, un sous-modèle bond-graph aura la même structure qu'un bond-graph classique, avec en plus la présence de liens servant de connexions avec les autres sous-modèles.

Cependant, une question fondamentale est de savoir s'il est souhaitable de déterminer la causalité du sous-modèle avant de le stocker (avec éventuellement certaines informations structurelles).

Afin de répondre à cette question, répertorions les différentes raisons qui vont amener à utiliser des sous-modèles bond-graph :

- 1) Réutiliser et assembler des sous-systèmes connus et souvent déjà analysés

- 2) Faciliter la phase de conception (possibilité de changer certaines parties d'un système global en comparant les résultats)
- 3) Permettre l'utilisation d'une modélisation à plusieurs échelles, i.e. de modèles hiérarchisés
- 4) Simplifier les différents traitements de calcul formel et d'analyse structurelle

Les sous-systèmes ont bien souvent fait l'objet d'une analyse détaillée, pour certains à l'aide de la modélisation par bond-graphs qui facilite l'analyse structurelle. Pour ces modèles, ne pas garder ces informations structurelles et a fortiori la causalité obligerait le futur utilisateur à recommencer complètement (ou partiellement suivant ses besoins) ces traitements à chaque fois qu'il utilisera ces sous-systèmes, d'où une perte de temps considérable et inutile.

Par ailleurs, lors d'une démarche de conception de systèmes physiques, il est fréquent de devoir tester différentes technologies pour des organes différents afin de déterminer le système complet fournissant les meilleurs résultats. Lors de cette étape, il s'avère très vite fastidieux de recommencer tous les calculs (tant au niveau de l'affectation de la causalité qu'au niveau du calcul formel ou de l'analyse structurelle) pour l'ensemble du système global à chaque nouvel essai. De ce fait, une méthode de stockage des sous-modèles permettant de limiter le nombre de nouveaux calculs à effectuer lors de l'assemblage est la bienvenue.

De la même façon, l'utilisation de modèles hiérarchisés afin de pouvoir gérer différents niveaux de modélisation va requérir des outils performants de traitement et d'analyse afin de faire transiter au mieux les informations entre ces différents niveaux hiérarchiques. Dans le cadre d'une modélisation par bond-graphs, ces outils seront basés sur la causalité et les différentes informations causales (comme les chemins et boucles causales) du modèle. La connaissance préalable de ces informations est là encore souhaitable.

Enfin, les différentes simplifications que nous allons pouvoir apporter aux différentes procédures de calcul formel et d'analyse structurelle utilisant la décomposition en sous-modèles bond-graph (que nous présenterons tout au long de ce chapitre et du chapitre IV) sont d'autant plus effectives lorsque ces sous-modèles ont déjà été pré-analysés.

Pour toutes ces raisons, il nous apparaît préférable de stocker lorsque cela est possible la configuration causale (intégrale et dérivée) conjointement à certaines informations structurelles (comme les chemins causaux) des sous-modèles bond-graphs que l'on va mettre dans la bibliothèque de modèles. Bien sûr, cela n'est qu'une recommandation, le programme laissant le choix à l'utilisateur de stocker ses sous-modèles à un niveau de détails qui lui convient le mieux. Simplement, toutes les informations manquantes devront alors être systématiquement recalculées.

Remarque

Dans ce chapitre ainsi que le suivant, nous concentrons notre étude sur la gestion de sous-modèles décrits avec la représentation bond-graph et proposons différents outils d'analyse structurelle et d'aide à la conception utilisant cette représentation. Il est bien évident que pour une démarche globale de conception d'un modèle d'autres informations que celles liées aux sous-modèles bond-graphs vont être nécessaire, par exemple en utilisant plusieurs niveaux de conception comme dans l'approche ci-dessous [27] :

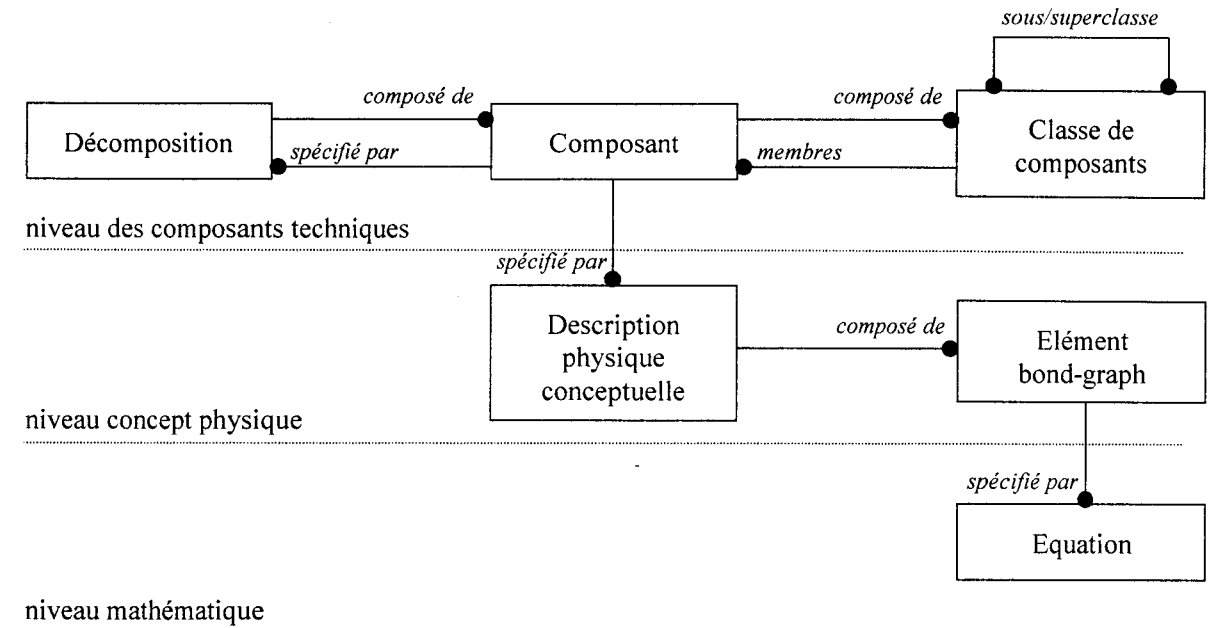


Fig. III.1 : Exemple d'une démarche de modélisation utilisant une représentation des modèles à plusieurs niveaux

Cette approche consiste à utiliser plusieurs niveaux de modélisation (dans ce cas trois) afin de faciliter la conception du modèle, suivant que l'on se trouve au niveau des composants techniques (niveau le plus bas), au niveau concept physique ou au niveau mathématique. Si l'on utilise une telle démarche de modélisation, à chaque sous-modèle doit donc correspondre une description à chacun des niveaux. Dans les travaux que nous allons présenter par la suite, nous allons proposer des outils de représentation, d'analyse et d'aide à la conception utilisant des sous-modèles bond-graphs, faisant intervenir essentiellement les niveaux concept physique et mathématique. Par contre, afin de résoudre les conflits au niveau du sens de parcours de l'énergie dans les sous-modèles bond-graph, nous verrons qu'il sera nécessaire d'utiliser également la description au niveau des composants techniques (et éventuellement dans certains cas également pour les conflits de causalité), mais nous n'aborderons pas en détail cette phase.

Tout comme dans l'esprit de la démarche présentée dans l'article mentionné ci-dessus, les sous-modèles bond-graph que nous définissons ici vont être stockés dans la bibliothèque

de modèle en retenant les modèles identiques au niveau de la structure de jonctions, mais possédant des configurations causales différentes, ceci afin de mémoriser les sous-modèles équivalents mais possédant des propriétés structurelles différentes (qui en conséquence aboutiront à une représentation mathématique différente) afin d'aider le concepteur à choisir le sous-modèle correspondant à ses besoins.

III - 2 - 1 - 2 Description du formalisme utilisé sur un exemple

Considérons les deux sous-systèmes électriques suivants :

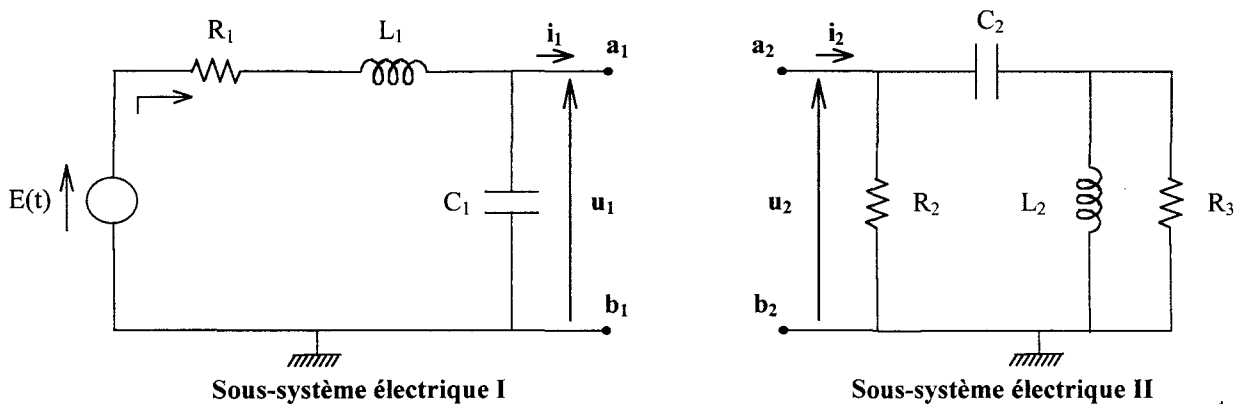


Fig. III.2 : Exemples de 2 sous-systèmes électriques

Les bornes a_1 et b_1 constituent les points de connexion du sous-système électrique I avec d'autres éventuels sous-systèmes électriques, les bornes a_2 et b_2 représentant ceux du sous-système électrique II.

Ainsi, pour le sous-système I (resp. le sous-système II) on aura comme variables de connexion la tension u_1 et le courant i_1 (resp. la tension u_2 et le courant i_2).

En tenant compte des conventions de signe effectuées sur les deux sous-systèmes électriques, leurs sous-modèles bond-graphs associés seront :

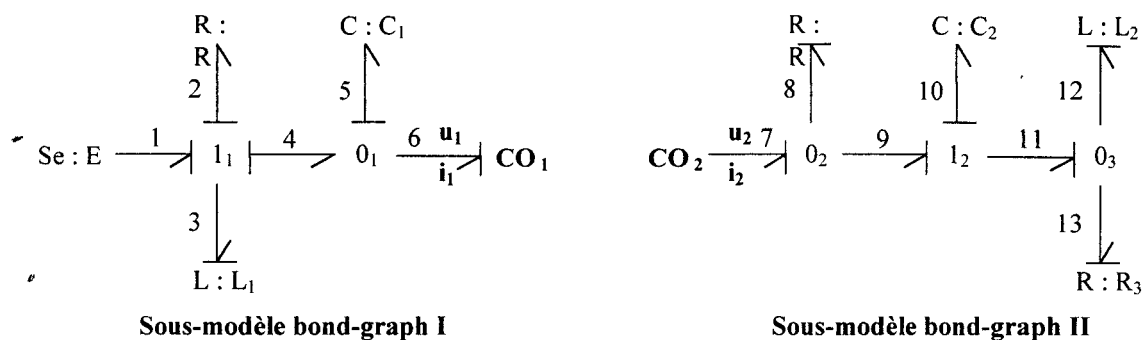


Fig. III.3 : Modèles bond-graphs associés (d'autres configurations causales sont possibles)

Convention d'écriture

CO₁ et CO₂ représentent les liens de connexion par lesquels d'autres sous-systèmes peuvent être connectés à chacun des deux sous-systèmes pris en exemple.

En connectant les sous-systèmes électriques I et II en reliant les bornes a₁ et a₂ ainsi que les bornes b₁ et b₂, le système électrique suivant est obtenu :

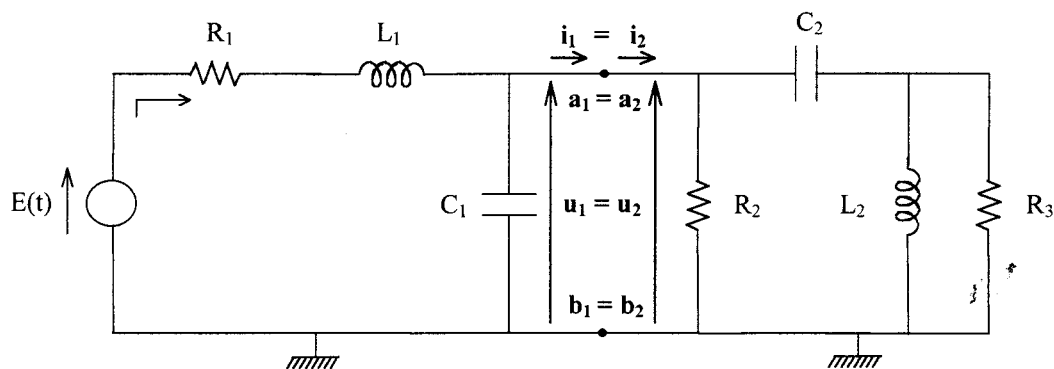


Fig. III.4 : Système électrique résultant de la connexion des sous-systèmes électriques I et II

A celui-ci va alors correspondre le modèle bond-graph de la figure III.5 :

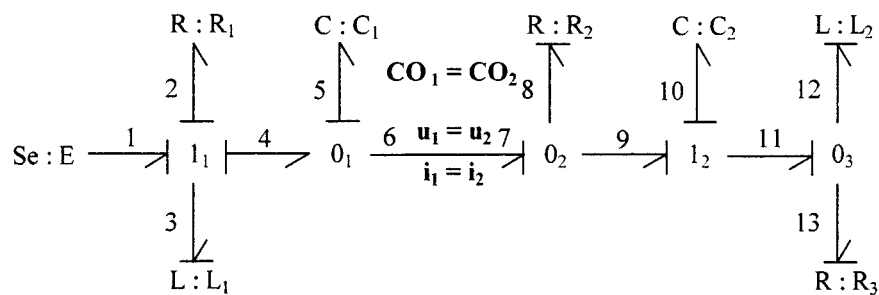


Fig. III.5 : Modèle bond-graph résultant

III - 2 - 1 - 3 Autres exemples

L'exemple de la figure III.2 constituait un exemple simple. Bien évidemment, les systèmes réels seront bien souvent plus complexes, aussi bien par leur taille que par leur structure.

Considérons cette fois-ci les 2 sous-systèmes électriques suivants :

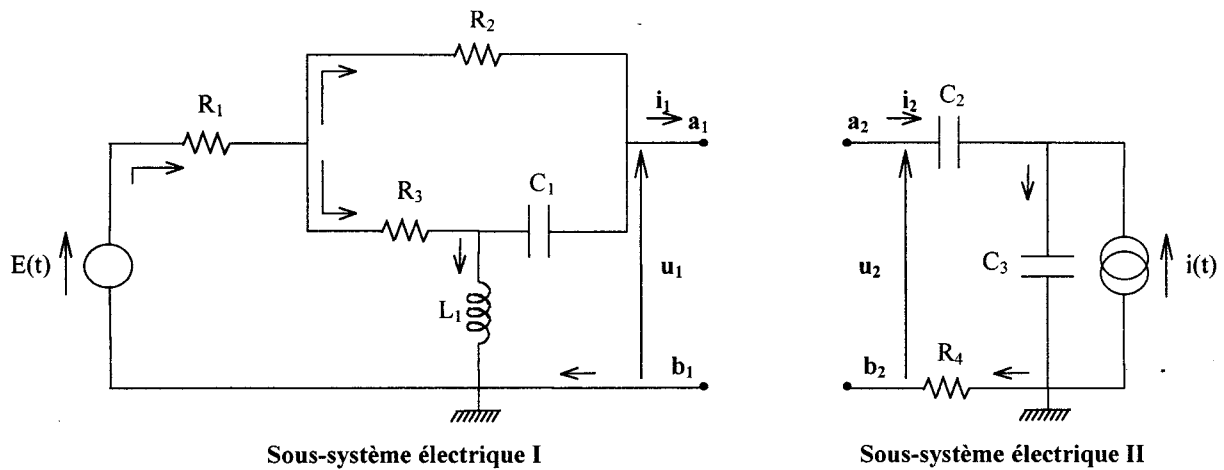


Fig. III.5 : Deux sous-systèmes électriques

Contrairement à l'exemple de la figure III.2, cette fois-ci nous ne désirons pas connecter les deux sous-systèmes directement mais en intercalant entre les deux un transformateur [17] :

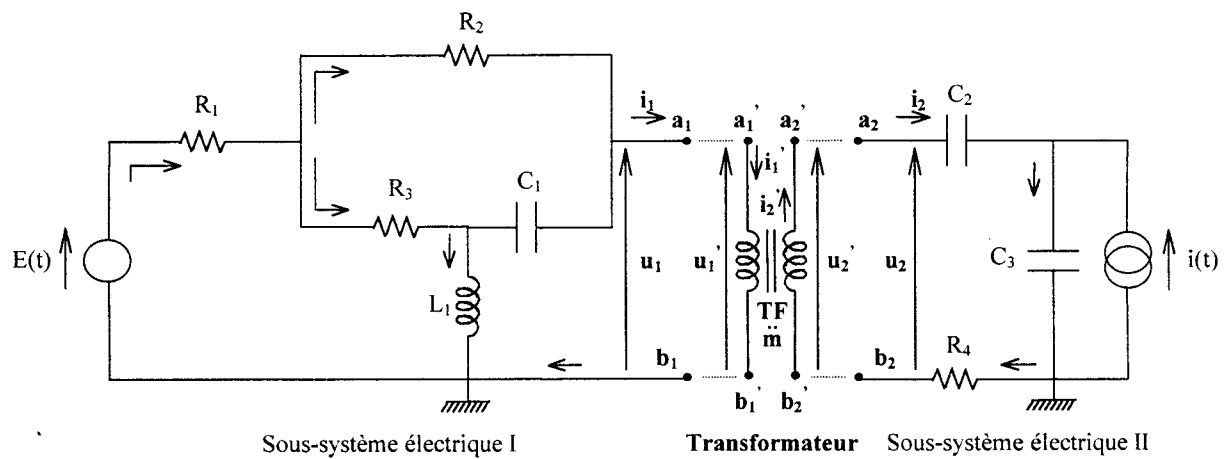


Fig. III.7 : Connexion de deux sous-systèmes par l'intermédiaire d'un sous-système de transition

Ce cas de figure se résout en fait assez facilement en décomposant le problème en deux : d'un côté la connexion du sous-système électrique I au primaire du transformateur, de l'autre la connexion du secondaire du transformateur au sous-système électrique II.

Le bond-graph résultant suivant est alors obtenu :

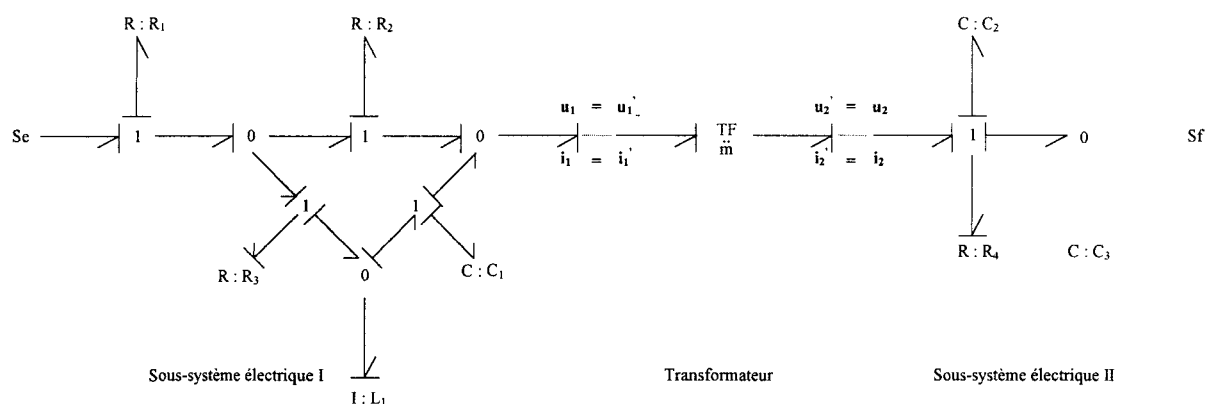


Fig. III.8 : Bond-graph obtenu en assemblant trois sous-modèles bond-graphs

On peut de cette façon assembler autant de sous-systèmes que l'on veut, éventuellement issus de domaines physiques différents, comme dans le cas du système électromécanique suivant :

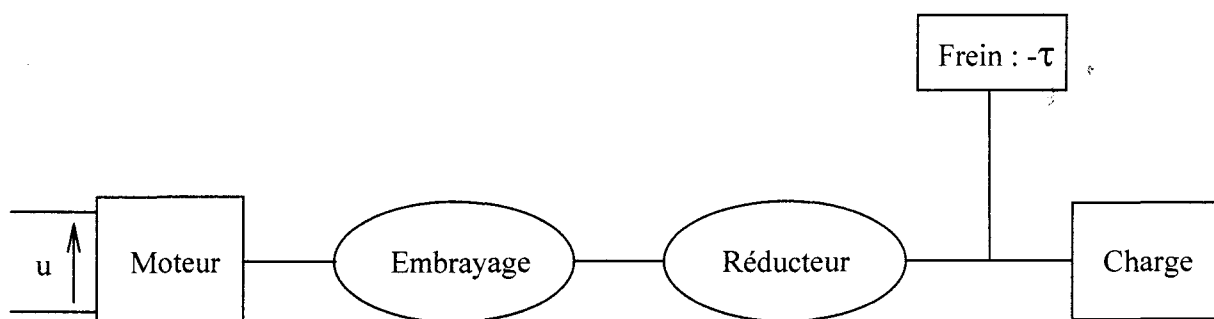


Fig. III.9 : Assemblage de sous-systèmes en un système électromécanique global

On obtient ainsi le bond-graph suivant :

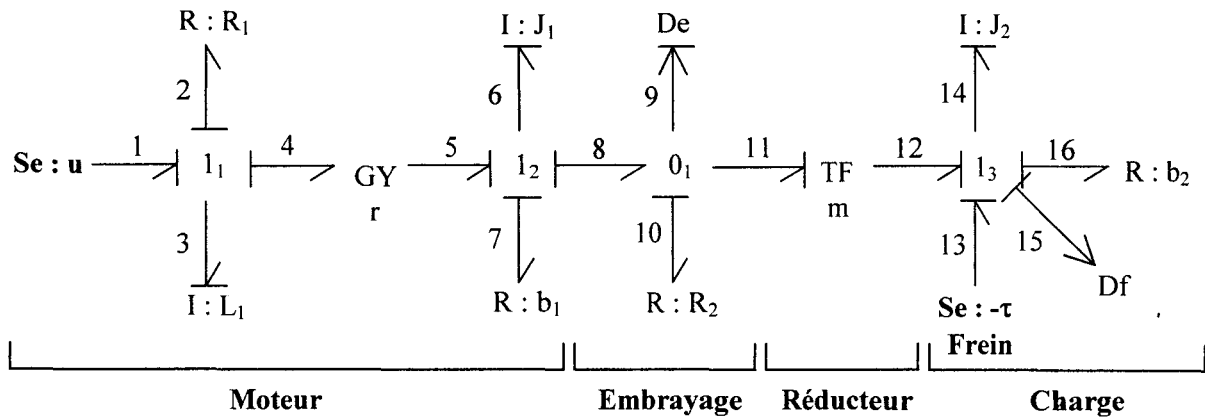


Fig. III.10 : Modèle bond-graph du système électromécanique

III - 2 - 1 - 4 Traitement des conflits pouvant survenir lors de la connexion

Dans les exemples qui ont été présentés jusqu'à maintenant, les connexions entre les différents sous-modèles bond-graphs se sont déroulées sans problème, c'est-à-dire qu'elles n'ont généré aucun conflit, aussi bien au niveau du sens de transfert de la puissance qu'au niveau de la causalité.

Reprenons l'exemple de la fig. III.2 mais en inversant le sens du courant i_2 :

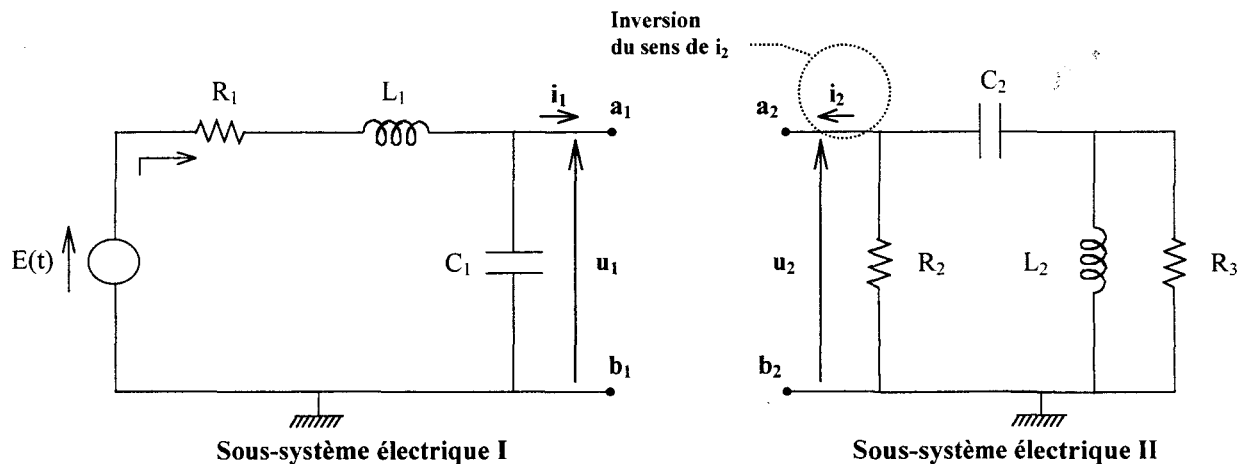


Fig. III.11 : Exemple de la fig. III.2 avec inversion du sens de i_2

Lors de l'assemblage des deux sous-modèles, on va se trouver en présence d'un conflit de signe entre i_1 et i_2 , qui doivent être identiques puisqu'ils vont correspondre au même lien dans le schéma bond-graph. En fait, ce genre de conflit se résout dans notre cas assez

facilement : les conventions de signe (ici au niveau des courants) n'étant en fait en général que des hypothèses arbitraires (bien que correspondant aussi parfois à des règles de bon sens), on peut modifier la convention de sens sur i_2 afin de se retrouver dans le cas de la figure III.1 et ainsi éliminer le problème. Dans d'autres cas (et notamment dans d'autres domaines physiques), les conflits au niveau du sens de transfert de la puissance peuvent être plus difficiles à résoudre.

Par ailleurs, des conflits de causalité peuvent également survenir. Reprenons encore une fois l'exemple précédant mais en choisissant cette fois-ci une causalité différente sur le sous-modèle II :

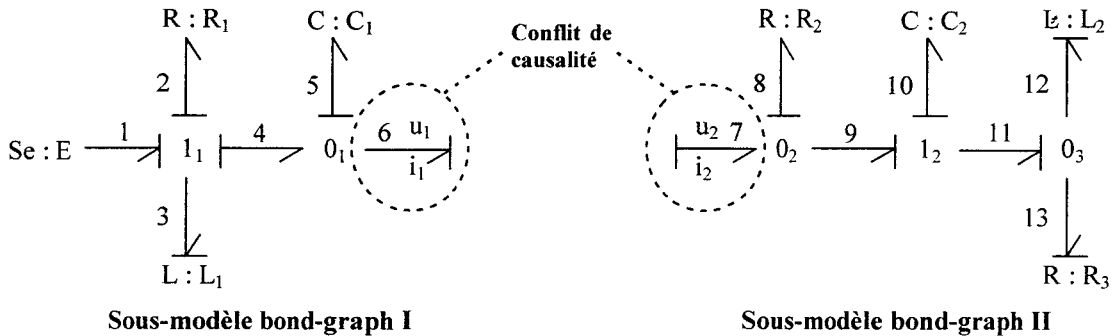


Fig. III.12 : Assemblage de deux sous-modèles bond-graphs causalement incompatibles

La causalité sur les liens 6 et 7 est différente, ce qui nous empêche d'assembler directement ces deux sous-modèles. Contrairement au cas du sens de transfert de la puissance, on ne peut inverser aveuglement la causalité sur le lien 7 car on se retrouve alors avec un conflit au niveau de la jonction 0_2 . Heureusement, la causalité sur l'élément R_2 (considéré comme linéaire) ayant été choisie arbitrairement, on peut l'inverser afin de se retrouver dans la configuration sans conflit suivante (on se retrouve en fait dans le cas de la figure III.3) :

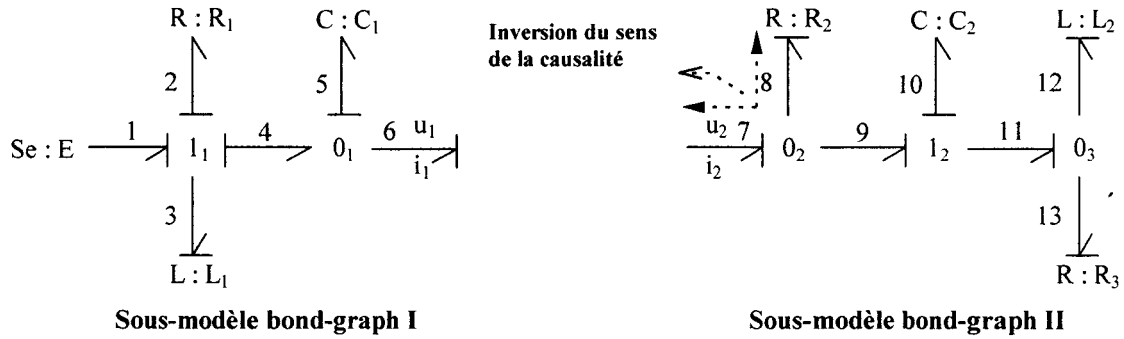


Fig. III.13 : Inversion de la causalité sur les liens 7 et 8

On aurait pu également à la place inverser la causalité de R_3 et répercuter l'inversion sur les liens 11, 9 et 7.

D'une manière générale, si un chemin causal direct existe entre un élément R linéaire et un lien de connexion, alors la causalité sur ce lien de connexion peut être inversée si on le désire.

Prenons maintenant l'hypothèse que le lien 7 n'aurait pas pu être inversé. Dans ce cas, il aurait alors fallu envisager l'inversion de l'autre lien de connexion, c'est-à-dire le lien 6 du sous-modèle bond-graph I. Cependant, cette fois-ci il n'existe aucun chemin causal direct entre le lien de connexion et un élément R . Il aurait alors fallu concéder à inverser par exemple la causalité de l'élément C , le mettant ainsi en causalité dérivée. Dans certains cas extrêmes, on pourrait imaginer se trouver dans l'impossibilité totale de trouver une configuration causale correcte. Cela signifierait que l'on ne pourrait affecter correctement la causalité sur le modèle global, résultant d'erreurs grossières lors de la modélisation et aboutissant à un modèle n'ayant pas de sens physique.

III - 2 - 2 Décomposition en sous-modèles pour faciliter les algorithmes

Dans la partie III-2-1, certains choix pour le stockage de sous-modèles bond-graphs dans l'objectif de constituer une bibliothèque de sous-modèles physiques ont été proposés.

En fait, même si un modèle bond-graph ne résulte pas de l'assemblage de sous-modèles physiques, il peut être utile de le décomposer tout de même en sous-modèles, afin de faciliter son traitement. Afin d'être en mesure de proposer un logiciel utilisant la représentation par bond-graphs suffisamment performant, il est nécessaire d'optimiser les algorithmes utilisés, afin de minimiser les temps de calcul.

Dans cette partie, nous proposons une méthode de décomposition des modèles bond-graphs permettant de faciliter les différents traitements tout en évitant la redondance d'opérations. Cette décomposition s'effectue à deux échelles : à l'échelle « micro » où le modèle bond-graph est découpé d'une manière systématique en petit sous-modèles facilement manipulables et à l'échelle « macro » qui permet de différencier les sous-modèles ayant des particularités structurelles (comme les boucle de causalité) ou physiques, et d'utiliser différents niveaux hiérarchiques.

III - 2 - 2 - 1 Décomposition systématique (en « micros » sous-modèles)

Prenons comme exemple le modèle bond-graph suivant :

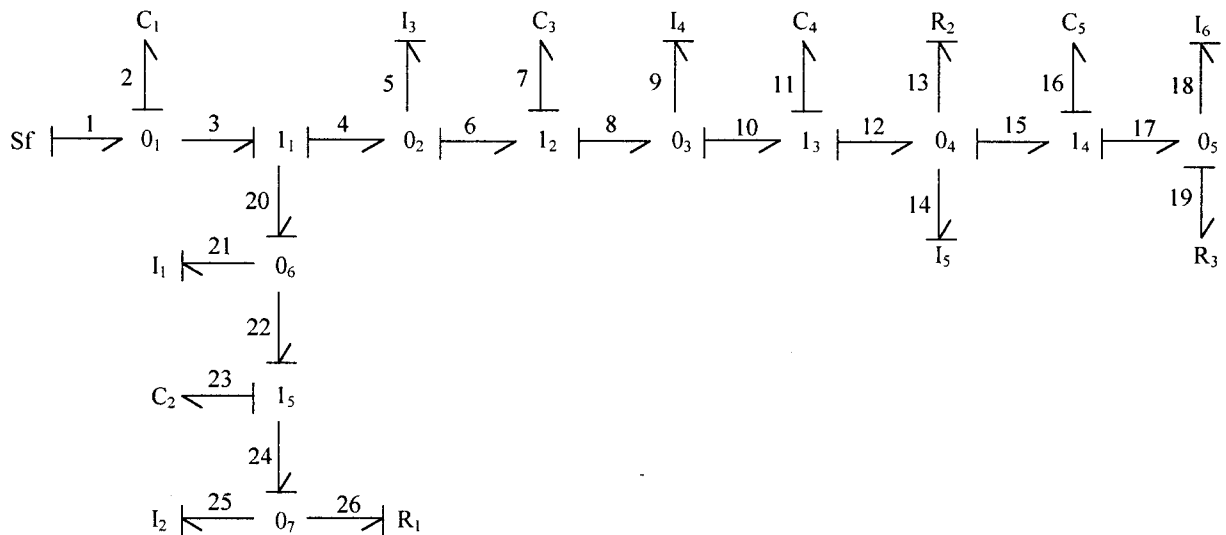


Fig. III.14 : Modèle bond-graph en causalité intégrale

Admettons que le problème à traiter soit de savoir si l'élément C_2 est commandable ou non. Nous avons vu dans le chapitre I, qu'un élément dynamique initialement en causalité intégrale est structurellement commandable s'il vérifie les deux conditions suivantes :

- il admet une causalité dérivée lorsque l'on met le bond-graph en causalité dérivée
- il possède un chemin causal direct ou indirect avec au moins une source

La première condition est ici facilement vérifiée, car en examinant les éléments autour de C_2 on se rend compte qu'il existe une boucle causale entre C_2 et R_1 , R_1 ayant une causalité arbitraire il suffira d'inverser la causalité sur celui-ci afin de pouvoir basculer C_2 en causalité dérivée lorsque l'on mettra le bond-graph en causalité dérivée.

Pour tester la seconde condition, il va nous falloir examiner les chemins causaux indirects (et directs) partant de C_2 et aboutissant à une source. Le chemin causal indirect unique pour la partie C_2 -23-24-25- I_2 -25-24-22-20 se prolonge par le lien 4 ou le lien 3. Si aucun traitement préalable n'a été effectué sur le modèle bond-graph, les deux directions vont devoir être testées.

Prenons une autre application en exemple : la détermination des différents chemins causaux directs et indirects (dont on pourra également déduire les boucles causales) existant dans un modèle bond-graph. Soient à déterminer par exemple dans le bond-graph de la figure

III.14 les différents chemins causaux directs liant C_1 et C_3 aux autres éléments. En parcourant d'une manière classique le bond-graph, on obtient à partir de C_1 les chemins causaux directs suivants :

- C_1 -2-3-20-21- I_1
- C_1 -2-3-20-22-24-25- I_2
- C_1 -2-3-20-22-24-26- R_1

A partir de C_3 , on va trouver :

- C_3 -7-6-5- I_3
- C_3 -7-6-4-20-21- I_1
- C_3 -7-6-4-20-22-24-25- I_2
- C_3 -7-6-4-20-22-24-26- R_1

On peut alors constater que la portion de chemin **20-22-24-25** avec ses éléments associés est parcourue à deux reprises, pour C_1 d'abord puis pour C_3 , ce qui constitue une redondance d'opérations.

Rappel

On désigne par **représentant causal** [21] le lien sur une jonction 0 (resp. 1) qui impose causalement son effort (resp. son flux) aux autres efforts (resp. flux) situés sur les autres liens de cette jonction, c'est à dire le lien sur lequel le trait causal est près de (resp. loin de) la jonction.

Considérons maintenant le principe de décomposition suivant :

Méthode de décomposition en sous-modèles bond-graphs algorithmiques

Pour chaque jonction possédant au moins deux liens de connexion en plus du lien représentant causal et des liens directement connectés à des éléments, on « coupe » le bond-graph au niveau de chacun de ces liens de connexion.

Définition

Par analogie avec la notion de lien représentant causal, on va définir par **sous-modèle représentant causal** le sous-modèle comprenant le lien représentant causal d'une jonction servant de connexion entre différents sous-modèles. Cette notion de sous-modèles représentants causaux va nous permettre de gérer les modèles bond-graphs à un niveau d'abstraction plus global (c'est à dire sans rentrer dans le détail des sous-modèles), nous permettant de simplifier les traitements tout en autorisant l'utilisation de sous-modèles hiérarchisés.

Appliquons maintenant cette méthode de décomposition au bond-graph de la fig.

III.14 :

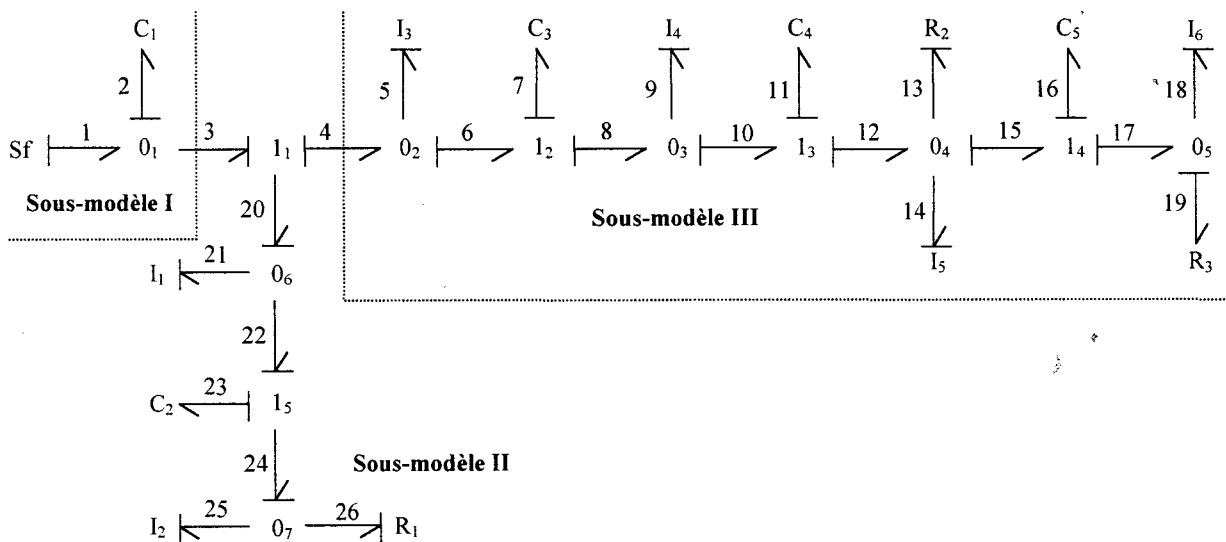


Fig. III.15 : Décomposition du bond-graph en sous-modèles algorithmiques

Revenons au problème de la commandabilité. Après une analyse rapide des sous-modèles impliqués, le bond-graph à mots équivalents suivant est obtenu :

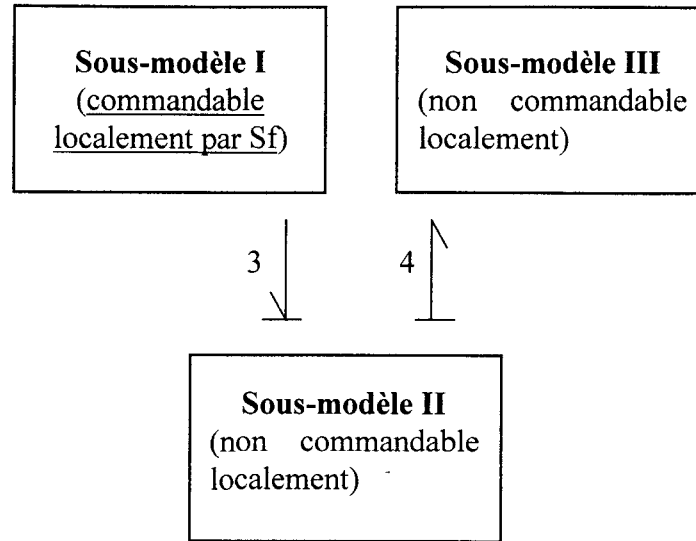


Fig. III.16 : Relations entre les différents sous-modèles

Pour ce qui est de la question de la commandabilité de C_2 , on peut constater que le lien 3 est connecté à un sous-modèle localement commandable (contenant la source S_f) alors que le lien 4 aboutit vers un sous-modèle non commandable. On peut en alors en déduire qu'il vaut mieux explorer le sous-modèle I car il aboutira plus rapidement et plus certainement à une source (voir le chapitre IV pour la méthode globale de détermination de la commandabilité d'un modèle bond-graph se servant de la décomposition en sous-modèles).

Nous constatons ainsi sur cet exemple que la décomposition en sous-modèles algorithmiques nous aide à mieux appréhender les relations causales existant dans un modèle global et facilite donc les traitements d'analyse structurelle.

Revenons maintenant à la recherche des chemins causaux sur ce même exemple. En observant les figures III.15 et III.16, il apparaît clairement que le sous-modèle II est le **représentant causal** (en terme de sous-modèles) de la jonction 1_1 , par rapport aux deux autres sous-modèles qui y sont connectés. On peut ainsi en déduire que toutes les portions de chemins (dans le sous-modèle II) commençant après le lien 3 (du sous-modèle I) seront identiques à celles commençant après le lien 4 (du sous-modèle III). De ce fait, après avoir

traité les chemins aboutissant dans le sous-modèle II lors de l'étude des chemins causaux partant de C_1 , il suffira de recopier ces chemins partiels (à partir du lien 20) déjà déterminés lorsque l'on voudra connaître les chemins prolongeant le lien 4 lors du traitement de C_3 , ce qui évitera tout traitement redondant. Nous verrons dans la partie III-3-3 une méthode générale de calcul des chemins causaux (directs et indirects) avec détermination des disjonctions existant entre ces chemins à l'aide de la décomposition en sous-modèles.

En appliquant cette méthode de décomposition algorithmique, on constate les propriétés suivantes :

Propriétés :

- La structure générale du modèle bond-graph d'origine est conservée, ce qui garantit la cohérence entre les résultats obtenus d'une manière globale au niveau des sous-modèles et ceux obtenus sans utiliser les sous-modèles.
- Cette décomposition nous permet également d'organiser les sous-modèles bond-graphs générés sous forme de sous-modèles représentants causaux ou non, ce qui nous apporte des facilités d'analyse conséquentes (voir chapitre IV).
- Comme nous pouvons le constater sur l'exemple, les sous-modèles ainsi générés sont constitués chacun d'une seule séquence de jonctions se suivant causalement. De ce fait, les différents traitements à effectuer sur ces sous-modèles en sont considérablement facilités, ne nécessitant qu'un seul parcours pour déterminer toutes les informations utiles.
- Toute jonction de connexion sera systématiquement rattachée à son lien représentant causal dans un même sous-modèle.
- Tout élément représentant causal introduit une cassure (c'est-à-dire un changement d'orientation au niveau de la causalité) des chemins causaux (sauf si celui-ci est

situé sur une jonction terminale). En conséquence, la jonction à laquelle il est rattaché représente, avec tous les autres éléments qui y sont éventuellement connectés, un sous-modèle à elle seule.

- De ce fait, l'inversion de la causalité sur des éléments R connectés causalement aura différentes conséquences suivant que ces éléments R sont des représentants causaux ou non :
 - l'inversion de la causalité sur deux éléments R représentants causaux connectés causalement retirera deux cassures causales, les deux sous-modèles associés aux deux R seront absorbés par un des sous-modèles adjacents, en permettant en plus dans certains cas l'unification des sous-modèles adjacents (s'il n'y en avait que deux).
 - au contraire, l'inversion de la causalité sur deux éléments R non représentants causaux les rendra représentants causaux et créera deux cassures causales avec des conséquences inverses à celles du cas précédent.
 - l'inversion de la causalité sur un élément R représentant causal et un élément R non représentant causal inversera la situation en déplaçant l'endroit de la cassure causale (le nombre des sous-modèles sera alors fonction de la position de ces éléments R, suivant qu'ils se situent sur des jonctions terminales ou non).
- Dans le cas où des éléments dynamiques restent en causalité dérivée lorsque la causalité intégrale est appliquée au modèle bond-graph, les mêmes résultats que pour les éléments R peuvent être appliqués avec les éléments dynamiques qui leur sont connectés causalement.
- Il est à souligner qu'un élément représentant causal choisi sur une jonction terminale permet de diminuer de deux le nombre de sous-modèles.

III - 2 - 2 - 2 Décomposition en « macros » sous-modèles

Dans le paragraphe précédent a été proposée une méthode permettant de simplifier considérablement les calculs en effectuant une décomposition systématique particulière en sous-modèles algorithmiques.

Cependant, dans certains cas, un découpage supplémentaire d'une manière plus globale (on parlera alors d'échelle « macro ») peut également faciliter les traitements, tant au niveau des performances que de la pertinence des analyses effectuées.

En effet, certaines particularités structurelles peuvent apparaître dans un modèle bond-graph, avec des répercussions sur l'efficacité voire la validité des algorithmes si ces particularités ne sont pas détectées et traitées indépendamment. Considérons le modèle bond-graph de la fig. III.17, dans lequel il existe un cycle formé des liens 9-13-12-11 :

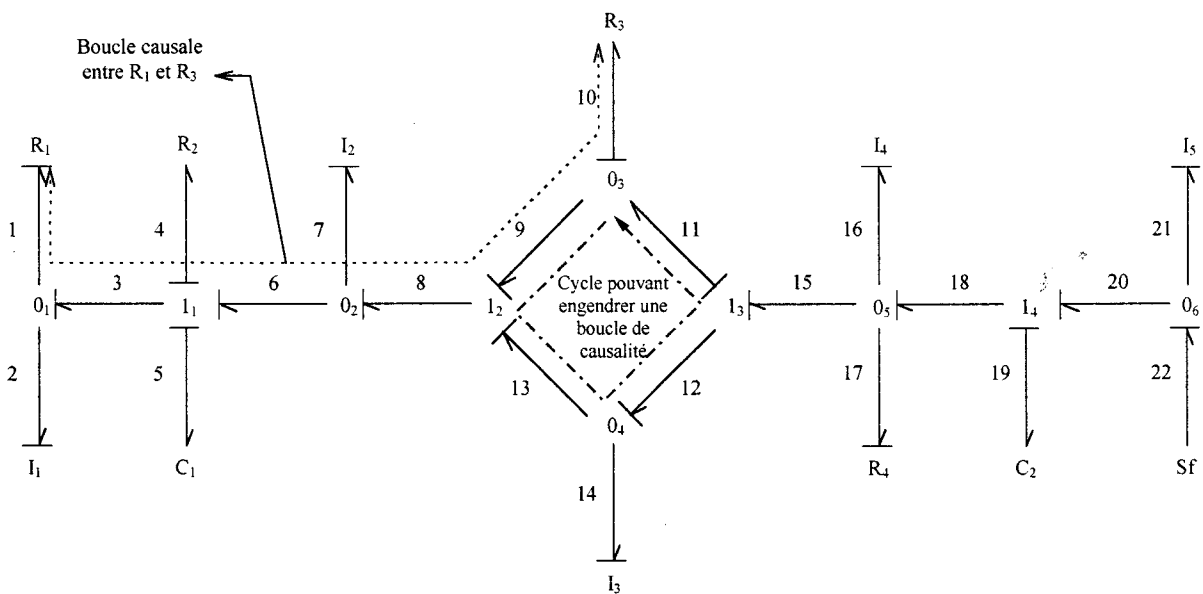


Fig. III.17 : Modèle bond-graph possédant un cycle de liens

Si l'on applique uniquement la méthode de décomposition algorithmique vue en III-2-2-1, on obtient :

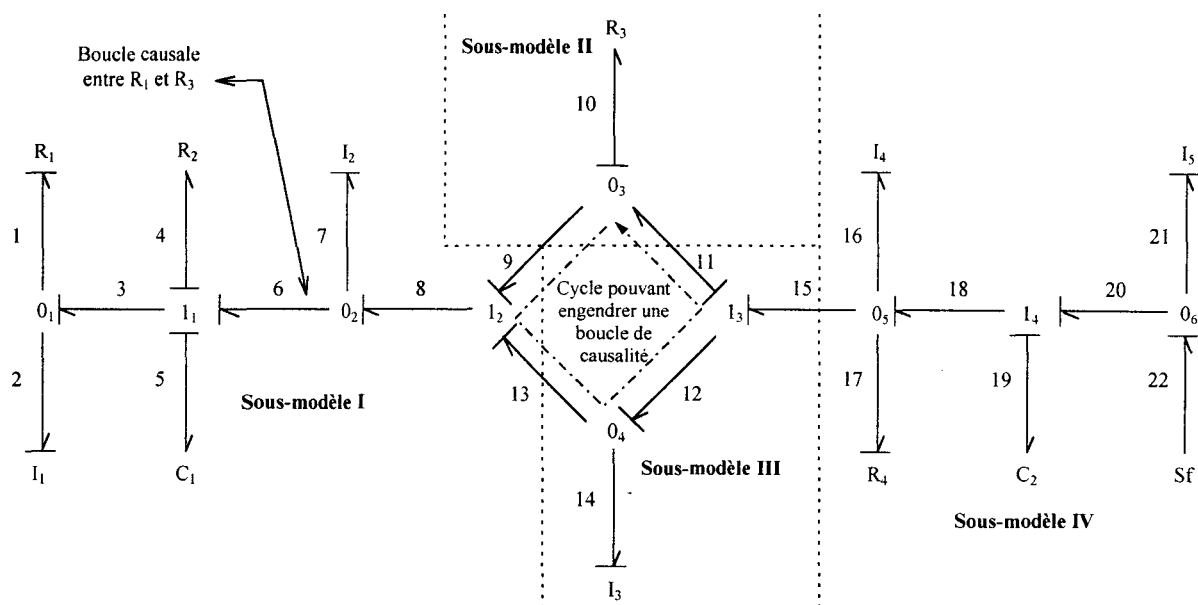


Fig. III.18 : Décomposition suivant la procédure vue en III-2-2-1

Sous cette forme de représentation, on constate que le cycle de liens 9-13-12-11 se retrouve éclaté entre les sous-modèles I, II et III, ce qui rendrait difficile la détection de la boucle de causalité qui pourrait apparaître. De ce fait, dans ce cas de figure, on utilisera plutôt la décomposition suivante :

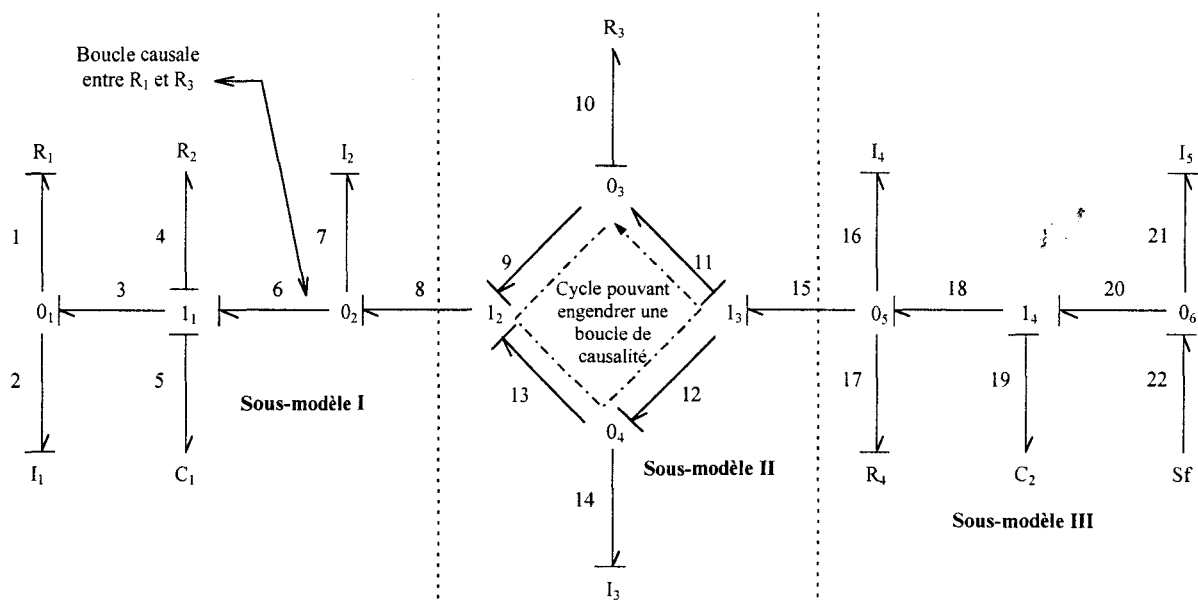


Fig. III.19 : Décomposition algorithmique prenant en compte la présence de cycles

De cette manière, le cycle n'intervenant que dans le sous-modèle II, sa gestion sera beaucoup plus facile.

Dans l'exemple que nous avons pris, le cycle ne faisait intervenir que peu de liens. Dans le cas où celui-ci serait d'une taille plus importante, le sous-modèle le contenant serait alors lui-même décomposé en sous-modèles algorithmiques afin de déléguer une partie de ses calculs, mais le traitement du cycle de liens continuerait de se faire au niveau de ce sous-modèle « macro », d'où l'intérêt d'une décomposition à plusieurs niveaux, en sous-modèles hiérarchisés (voir la partie III-3-2).

D'autre part, l'utilisateur lui-même peut décider, que son modèle bond-graph résulte d'un assemblage de sous-modèles préconçus ou non, d'imposer (en plus de la décomposition automatique) l'utilisation de sous-modèles qu'il définit. Différentes raisons peuvent le motiver à définir lui-même des sous-modèles. Citons :

- Désir de différencier les différents domaines physiques impliqués (se donnant ainsi la possibilité de dissocier les différents résultats suivant le domaine physique)
- Mise en valeur de zones importantes dans son système (il peut ainsi mieux surveiller le comportement des parties qu'il considère comme sensibles)
- Volonté de modéliser plus ou moins finement certaines parties du système physique (Outre le fait de pouvoir traiter et analyser son modèle à différents niveaux de détail, cela lui permet également de remplacer à loisir ces sous-modèles par d'autres plus (ou moins) finement modélisés en limitant les calculs devant être ré-effectués, l'aidant ainsi considérablement dans la phase de conception et de test/simulation)

Remarque

Une autre raison (que nous ne traiterons pas dans ce mémoire) qui peut nécessiter une décomposition en « macros » sous-modèles est lorsque le modèle global résulte de l'assemblage de sous-modèles décrits dans des langages de représentation différents (bond-graphs, schéma-blocs, graphes de fluences, équations mathématiques, etc.).

Afin que cette décomposition en « macros » sous-modèles puisse être réalisable, les algorithmes de traitement des sous-modèles doivent être capables de gérer l'utilisation de sous-modèles situés à un même niveau d'abstraction (comme c'est également le cas pour les « micros » sous-modèles algorithmiques générés automatiquement) mais aussi à différents niveaux d'abstractions, permettant ainsi d'organiser hiérarchiquement l'agencement des sous-modèles. Dans la partie III-3-2 nous présentons une méthode permettant de gérer un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles à plusieurs niveaux hiérarchiques.

III - 3 Traitement des sous-modèles bond-graphs

III - 3 - 1 Prétraitement individuel des sous-modèles

Dans la partie II, ont été présentés les différents types de sous-modèles qui vont être utilisés. Afin que la phase d'assemblage de ceux-ci s'effectue dans les meilleures conditions, et que l'on puisse profiter de l'intérêt de la décomposition en sous-modèles pour faciliter les procédures de calcul formel et d'analyse structurelle, différents traitements vont être effectués sur les sous-modèles, certains étant optionnels. Afin d'être en mesure de répondre à n'importe quel besoin de l'utilisateur futur, chaque sous-modèle stocké dans une bibliothèque aura une version en causalité intégrale et une version en causalité dérivée. Certains des traitements effectués sur les sous-modèles seront effectués sur les deux versions, d'autres uniquement sur un seul type de causalité.

Remarque

Pour les sous-modèles issus d'une bibliothèque de sous-modèles physiques, les traitements présentés ci-dessous sont effectués au moment de leur stockage dans la

bibliothèque, donc normalement bien avant la phase d'assemblage. Par contre, dans le cas des sous-modèles algorithmiques (ou dans le cas de sous-modèles issus de bibliothèques n'ayant pas fait l'objet d'un prétraitement), ils seront effectués alors que le modèle global est déjà défini. Cependant, étant donné que même dans ce dernier cas nous avons vu qu'il était préférable que chaque sous-modèle ait été préanalysé avant que toute opération sur le modèle global ne soit effectuée, les différents prétraitements vont être réalisés sur les deux types de sous-modèles (à l'exception de ceux destinés à prévenir les conflits lors de l'assemblage), seul le moment auquel ils seront effectués différera.

III - 3 - 1 - 1 Informations structurelles

Les différentes informations structurelles qui vont pouvoir être générées (suivant les traitements à effectuer) sont les suivantes :

Bond-graph en causalité intégrale

- tous les chemins causaux directs ou indirects (aller et retour) existant entre les éléments R, C, I, les sources de perturbation Se et Sf et les sources de commandes MSe et MSf , les capteurs De et Df et les détecteurs virtuels De^* et Df^* **mais aussi les liens de connections**

Options

- longueurs des chemins
- gains des chemins causaux

↳ utiles pour le calcul formel (par exemple pour la détermination de la fonction de transfert, de l'équation d'état, ou des matrices intervenant dans les lois de commande (rejet de perturbation, placement des pôles,

découplage entrée-sortie)) et de nombreuses procédures d'analyse structurelle

- disjonctions (ou non) entre ces chemins causaux
 - ↳ utiles pour le calcul formel et certaines procédures d'analyse structurelle (inversibilité, découplabilité)
- inclusions (ou non) de ces chemins causaux (résultant dans la proportionnalité des gains des chemins causaux inclus)
 - ↳ utiles pour certaines procédures d'analyse structurelle (surveillabilité)

Bond-graph en causalité dérivée

- tous les chemins causaux directs ou indirects (aller et retour) existant entre les éléments R, C, I, les sources de perturbation S_e et S_f et les sources de commandes M_{Se} et M_{Sf} , les capteurs D_e et D_f et les détecteurs virtuels D_e^* et D_f^* **mais aussi les liens de connections**

Options

- longueurs des chemins
- gains des chemins causaux
 - ↳ utiles pour certaines procédures de calcul formel (calcul des relations de redondance analytique en surveillance)
- disjonctions (ou non) entre ces chemins causaux
 - ↳ utiles pour certaines procédures d'analyse structurelle
- inclusions (ou non) de ces chemins causaux (résultant dans la proportionnalité des gains des chemins causaux inclus)
 - ↳ utiles pour certaines procédures d'analyse structurelle (surveillabilité)

- tous les chemins causaux directs ou indirects existant entre les jonctions 0 (resp. 1) arrivant par l'effort (resp. le flux) **et aussi avec les liens de connexion**, ainsi qu'entre les jonctions 0 (resp. 1) en partant par le flux (resp. l'effort) **et les liens de connexion**
 - ↳ utiles pour la détermination des placements des capteurs éligibles pour assurer la surveillabilité du système
- tous les chemins causaux directs existant entre les éléments dynamiques restant en causalité intégrale et les jonctions 0 (resp. 1) en partant par le flux (resp. l'effort) **et aussi les liens de connexion**
 - ↳ utiles pour la détermination des placements des capteurs et des actionneurs éligibles pour assurer l'observabilité et la commandabilité du système

Remarques

- *Une différence majeure par rapport aux types de chemins causaux habituellement calculés sur un modèle bond-graph non décomposé en sous-modèles est la détermination de ces chemins non seulement vis-à-vis des éléments et jonctions, mais aussi vis-à-vis des éléments de connexion, ce qui va nous permettre de faire les liens entre les différents sous-modèles sans calculs supplémentaires*
- La détermination de ces informations structurelles va nous permettre à la fois de générer facilement les équations formelles associées au modèle tout en procédant à l'analyse des différentes propriétés structurelles de celui-ci.
- Pour les sous-modèles issus d'une bibliothèque de sous-modèles physiques, dans la mesure du possible (et suivant le choix de l'utilisateur), l'ensemble des informations présentées ci-dessus sera déterminé, nous faisant ainsi gagner du

temps lors des traitements futurs. Par contre, dans le cas de sous-modèles algorithmiques créés ponctuellement pour un besoin précis, seules les opérations nécessaires seront effectuées

- la génération de ces différentes informations pour les « micros » sous-modèles algorithmiques se fait très aisément. En effet, chacun des sous-modèles de ce type étant constitué soit d'une simple jonction, soit d'une seule suite de jonctions connectées causalement, la procédure consiste à partir d'une des deux jonctions extrémités et à suivre la causalité (qui est alors toujours dans le même sens) vers l'autre jonction extrémité en analysant toutes les jonctions traversées avec les éventuels éléments et connexions avec d'autres sous-modèles rattachés à ces jonctions

III - 3 - 1 - 2 Préanalyse des sous-modèles

Une fois que les informations structurelles ci-dessus sont générées, il nous est possible d'effectuer sur le sous-modèle les procédures classiques de calcul formel et aussi d'analyse structurelle telles que la détermination de la commandabilité, de l'observabilité, de la surveillabilité, etc.

Afin d'adapter ces méthodes au traitement de modèles bond-graphs décomposés en sous-modèles, on va en fait décomposer tous les traitements en deux domaines d'application : en local, c'est-à-dire ne concernant que les éléments et jonctions du sous-modèle courant, et avec l'extérieur, c'est-à-dire comment anticiper le résultat de ces traitements lorsque le sous-modèle sera connecté à d'autres sous-modèles.

Pour les traitement en local, les procédures vont être identiques à celles s'appliquant à des bond-graphs sans sous-modèles.

Par contre, afin de pouvoir facilement et rapidement étendre ces procédures au futur bond-graph global correspondant à un assemblage de sous-modèles, **aux liens (et éventuellement aux jonctions) servant de connexions entre les sous-modèles va être associé tout un ensemble d'informations structurelles qui seront mises en commun entre ces liens de connexion lors de l'assemblage afin de regrouper les informations structurelles pour le modèle global** (voir la partie III-3-4 pour l'aspect informatique et le chapitre IV pour la présentation de certaines procédures d'analyse structurelle utilisant le traitement global des sous-modèles).

Les différentes propriétés structurelles suivantes vont alors être étudiées sur chacun des sous-modèles, à la fois par rapport aux éléments locaux **mais aussi en prenant en compte les différents éléments, sources et capteurs qui pourraient être connectés via les liens de connexion** (liste non exhaustive) :

- rang
- commandabilité
- observabilité
- surveillabilité
- inversibilité
- découplabilité
- rejet de perturbation

III - 3 - 1 - 3 Prévention des conflits lors de l'assemblage

Comme nous l'avons vu dans la partie III-2-1-4, pour les sous-modèles issus de bibliothèques, la causalité des liens de connexion étant déterminée à l'avance, il se peut qu'on doive ajuster la causalité des sous-modèles physiques lors de la connexion avec les autres sous-modèles. D'où la nécessité de déterminer les éléments R et les éléments dynamiques en causalité dérivée (lorsque le bond-graph est en causalité intégrale) ayant un chemin causal direct avec une ou plusieurs connexions.

L'idéal est de rechercher une affectation causale pour chaque configuration possible de causalité sur les liens de connexion, et d'effectuer les divers traitements vus ci-dessus pour chacun des cas. De cette manière, quelle que soit la configuration causale choisie au niveau du modèle global, on n'aura pas à refaire de calculs localement au niveau des sous-modèles.

Cependant, cette méthode peut s'avérer assez lourde en pratique, d'autant plus si le modèle est de grande taille. Aussi cette méthode sera appliquée en option, suivant que l'utilisateur décide d'avoir suffisamment de temps pour attendre les résultats sur toutes les configurations possibles, et aussi suffisamment de place mémoire sur son outil de stockage. Dans le cas contraire, on se contentera de mémoriser les différentes configurations causales possibles, n'effectuant de nouveaux calculs que si la configuration causale initialement choisie se révèle inadaptée lors de l'assemblage des sous-modèles. Dans cette optique, afin d'éviter d'effectuer tous les traitements pour chacune des configurations possibles, nous présentons au chapitre IV des algorithmes permettant, en fonction du type de différences existant entre la configuration causale initialement choisie et celle imposée par l'assemblage des sous-modèles, de déduire à partir des informations structurelles déjà calculées sur la configuration initiale, les modifications à apporter à ces informations structurelles afin d'aboutir aux informations correspondant à la nouvelle configuration, et ce sans recommencer systématiquement tous les calculs.

III - 3 - 2 Gestion globale des sous-modèles

De l'analyse que nous avons faite des sous-modèles dans les parties précédentes, nous pouvons dégager une procédure générale d'assemblage de sous-modèles bond-graphs.

Procédure générale d'assemblage de sous-modèles bond-graphs

Phase 1 : Connexion des sous-modèles

- Tout d'abord, harmoniser le sens de parcours de la puissance au niveau des liens de connexion, afin d'obtenir un ensemble cohérent.
- Ensuite, déterminer les différentes configurations causales d'ensemble évitant les conflits de causalité. Cette opération nécessite de déterminer les éléments R et les éléments dynamiques en causalité dérivée (lorsque le bond-graph est en causalité intégrale) ayant un chemin causal direct avec les connexions sur lesquelles des conflits causaux apparaissent. Celle-ci se déroule donc d'autant plus rapidement lorsque ces informations ont déjà été stockées au niveau de chaque sous-modèle. Parmi les configurations causales possibles, une d'entre elles est choisie, en premier lieu minimisant le nombre d'éléments dynamiques en causalité dérivée (lorsque le bond-graph est en causalité intégrale), et si certaines informations structurelles sont déjà connues, en fonction de celles-ci également. Dans le cas où plusieurs choix restent alors possibles, une solution arbitraire est alors choisie, en accord avec l'utilisateur.

Phase 2 : Synthèse des informations au niveau du modèle global obtenu

- Pour les sous-modèles dont les informations et propriétés structurelles n'auraient pas été préalablement calculées, les déterminer (celles utiles pour l'application en cours, ou en fonction des choix de l'utilisateur)

- Ensuite, par l'intermédiaire des liens de connexion entre les différents sous-modèles, synthétiser les différentes informations et propriétés structurelles recueillies individuellement au niveau de chacun des sous-modèles afin d'en déduire les informations et propriétés structurelles du modèle global.

Remarque

Comme nous l'avons vu dans la partie III-2-2-2, l'utilisation de sous-modèles issus de bibliothèques eux-mêmes décomposés en autres sous-modèles (également issus de bibliothèques ou algorithmiques) ainsi que celle de « macros » sous-modèles qui sont souvent eux aussi décomposés en autres sous-modèles (issus de bibliothèques ou algorithmiques), *résulte dans l'obligation pour l'algorithme d'être capable de gérer différents niveaux d'abstractions aux niveaux des sous-modèles, permettant l'utilisation de sous-modèles à différents niveaux hiérarchiques*, comme dans l'exemple du système de la fig. III.20.

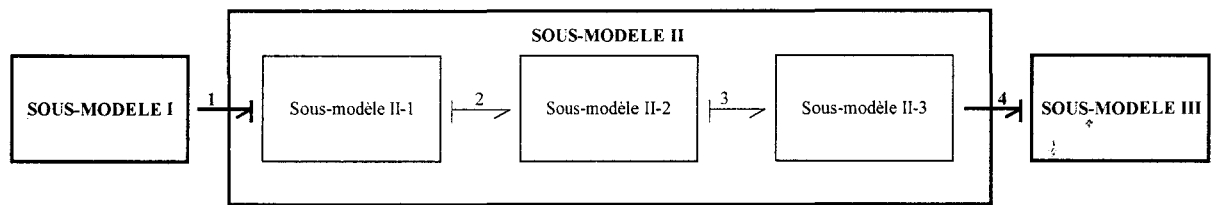


Fig. III.20 : Présence de différents niveaux d'abstraction dans l'agencement des sous-modèles

Dans ce genre de cas de figure, les algorithmes de traitement des sous-modèles bond-graphs doivent être adaptés afin de pouvoir prendre en compte ces différents niveaux hiérarchiques.

Ainsi, la démarche suivante va être utilisée :

Principe de la méthode permettant la gestion de sous-modèles à différents niveaux hiérarchiques

Phase 1 : Traitement du niveau hiérarchique le plus élevé

- Les différentes procédures ne prennent tout d'abord en considération que les sous-modèles de niveau d'abstraction les plus élevés (dans notre exemple, les sous-modèles I, II et III).

Phase 2 : Prise en compte des niveaux hiérarchiques inférieurs

- Ensuite, chaque sous-modèle lui-même fragmenté en plusieurs sous-modèles internes effectue récursivement les mêmes procédures sur ses propres sous-modèles
- Ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on atteigne le niveau hiérarchique le plus bas

Phase 3 : Remontée des informations vers les niveaux hiérarchiques supérieurs

- Tous les sous-modèles de niveaux hiérarchiques les plus bas ayant été traités, ceux-ci communiquent leurs résultats au niveau supérieur
- Ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on revienne au niveau hiérarchique le plus élevé, nous permettant de conclure sur le modèle global

L'utilisation d'une modélisation à plusieurs niveaux peut se révéler très utile dans de nombreux cas, par exemple afin de pouvoir remplacer un sous-modèle défini trop grossièrement par un autre plus détaillé, tout cela en minimisant les calculs à refaire. Cette pratique est d'ailleurs impérative lors de l'étude de systèmes physiques de très grande taille : cela permet ainsi de commencer par une étude grossière du modèle, en améliorant les résultats de celle-ci en affinant au fur et à mesure le niveau de détail des sous-modèles. Non seulement cette pratique permet d'aborder l'étude du système physique d'une manière structurée, mais elle permet également de faciliter la recherche des parties du système qui sont déterminantes pour l'étude en cours et sur lesquelles les traitements doivent être approfondis, minimisant

ainsi les pertes de temps, d'énergie et d'argent, facilitant ainsi la tâche des services Qualité des entreprises. Nous verrons au chapitre IV quelques exemples de traitements effectués ainsi à plusieurs niveaux d'abstraction.

III - 3 - 3 Exemple d'application : détermination des boucles causales et de leurs disjonctions mutuelles

Afin d'illustrer comment les informations structurelles au niveau des sous-modèles vont être synthétisées par le modèle global, prenons l'exemple de la détermination des boucles causales au sein d'un modèle bond-graph ainsi que des disjonctions (ou non) existant entre elles, étape fondamentale notamment pour l'utilisation de la règle de Mason lors des différentes opérations de calcul formel.

Nous prendrons comme exemple d'application le modèle bond-graph suivant décomposé en trois sous-modèles algorithmiques afin de faciliter les traitements :

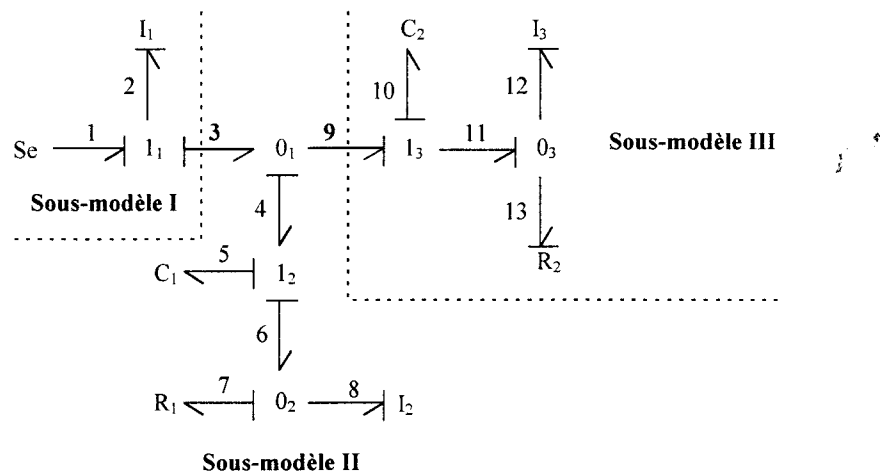


Fig. III.21 : Modèle bond-graph décomposé en sous-modèles algorithmiques

Les liens 3 et 9 assurent respectivement la connexion entre les sous-modèles I et II et les sous-modèles II et III.

Notation

Pour simplifier l'écriture, afin de représenter les différentes boucles causales qui vont exister entre un élément E et les éléments descendant causalement d'un lien de connexion CO , on désignera la partie commune par la notation '**Boucle générique $E-CO$** '. Par exemple, les boucles existant entre l'élément I_3 et les éléments descendant du lien de connexion 9 auront la 'Boucle générique I_3-9 ' en commun.

Remarque

Dans le cas où plusieurs connexions existent au sein d'un même sous-modèle, on trouvera également des boucles génériques du type CO_i-CO_j .

Algorithmes de détermination des boucles causales (avec l'information sur les disjonctions) d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

- Chaque sous-modèle est parcouru en répertoriant toutes les boucles causales existant dans celui-ci ainsi que les boucles causales génériques, en mémorisant l'information sur les disjonctions (ainsi que les gains si demandés).

Phase 2 : Synthèse des résultats obtenus pour le modèle global en recoupant les informations au niveau des liens de connexion

- Ensuite, les informations obtenues au niveau de chaque sous-modèle sont recoupées (grâce à l'utilisation des boucles génériques faisant intervenir les liens de connexion) afin de déterminer les boucles causales complètes du modèle global.

Appliquons cette procédure à l'exemple de la fig. III.21 :

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Sous-modèle I :

Jonction I_1 :

Boucles issues de la boucle générique I_1-3 : non disjointes entre elles

Remarque

Toutes les boucles causales étant issues d'une même boucle générique sont forcément non disjointes entre elles. De ce fait, afin de ne pas surcharger l'écriture, on évitera par la suite de l'écrire.

Sous-modèle II :

Jonction O_1 :

Boucles génériques $3-4$: non disjointes avec les boucles génériques $9-4$

Boucles génériques $9-4$: non disjointes avec les boucles génériques $3-4$

Jonction I_2 :

Boucles génériques $3-C_1$, Boucles génériques $9-C_1$, Boucles génériques $3-6$, Boucles génériques $9-6$:

Ces quatre boucles génériques sont non disjointes entre elles

Jonction O_2 :

Boucles génériques $3-R_1$, Boucles génériques $9-R_1$

Boucle $I_2-R_1 \Rightarrow$ Boucle locale

Ces trois boucles sont non disjointes entre elles

I_2-R_1 étant une boucle locale au sous-modèle II, celle-ci est classée définitivement comme étant disjointe à toutes les autres boucles (sauf les boucles génériques $3-R_1$ et $9-R_1$ évidemment)

Sous-modèle III :

Jonction I_3 :

Boucles génériques 9-11, Boucle C_2 -11 : non disjointes entre elles

Jonction O_3 :

Boucles génériques 9- I_3 , Boucles génériques 9- R_2

Boucle C_2 - I_3 , Boucle C_2 - R_2 $\Rightarrow$ Boucles locales

Elles sont non disjointes entre elles

C_2 - I_3 et C_2 - R_2 étant des boucles locales au sous-modèle III, celles-ci sont classées définitivement comme étant disjointes à toutes les autres boucles (sauf entre elles et avec les boucles génériques 9- I_3 et 9- R_2)

Phase 2 : Synthèse des résultats obtenus pour le modèle global en recoupant les informations au niveau des liens de connexion

Boucle I_1 -3- C_1 $\nrightarrow$ non disjointe avec la boucle I_1 -3- R_1

Boucle I_1 -3- R_1 $\nrightarrow$ non disjointe avec la boucle I_1 -3- C_1 et la boucle I_2 - R_1

Boucle I_2 - R_1 $\nrightarrow$ non disjointe avec les boucles I_1 -3- R_1 , C_1 -9- I_3 et R_1 -9- R_2

Boucle C_1 -9- I_3 $\nrightarrow$ non disjointe avec les boucles I_2 - R_1 , R_1 -9- R_2 , C_2 - I_3 et C_2 - R_2

Boucle R_1 -9- R_2 $\nrightarrow$ non disjointe avec les boucles I_2 - R_1 , C_1 -9- I_3 , C_2 - I_3 et C_2 - R_2

Boucle C_2 - I_3 $\nrightarrow$ non disjointe avec les boucles C_1 -9- I_3 , R_1 -9- R_2 et C_2 - R_2

Boucle C_2 - R_2 $\nrightarrow$ non disjointe avec les boucles C_1 -9- I_3 , R_1 -9- R_2 et C_2 - I_3

Ainsi, comme on a pu le constater sur cet exemple simple, la détermination des boucles causales avec les disjonctions entre elles gagne ainsi beaucoup en rapidité par rapport au traitement effectué sur le bond-graph global, d'abord par l'utilisation de la décomposition en sous-modèles d'une manière générale mais aussi par la nature structurelle très simple des

sous-modèles algorithmiques. Ce qui est vrai sur cet exemple simple le sera d'autant plus pour des systèmes de grande taille.

III - 3 - 4 Aspect informatique et implantation dans ARCHER

III - 3 - 4 - 1 Avantages d'une approche informatisée

Comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre et tout particulièrement lors de l'application sur les différents exemples, les procédures de décomposition en sous-modèles bond-graphs et de gestion des modèles globaux résultant de l'assemblage de sous-modèles à plusieurs niveaux d'abstraction, deviennent très vite lourdes à utiliser « à la main ». En fait, vu la complexité des traitements qui allaient devoir être effectués, les différentes procédures qui ont été développées dans ce chapitre l'ont été avec l'idée sous-jacente d'être implantées à terme dans un logiciel informatique permettant la modélisation par bond-graphs, dans notre cas le logiciel ARCHER, celui-ci fournissant déjà de nombreux outils de calcul formel et d'analyse structurelle.

Lorsqu'on analyse les différents algorithmes proposés dans ce chapitre en gardant en mémoire que c'est un programme informatique qui va les réaliser, on comprend mieux à quel point l'utilisation d'une décomposition en sous-modèles va permettre de faciliter et d'accélérer le traitement du modèle bond-graph global, nous permettant en prime de travailler à différentes échelles de modélisation. Par exemple, lors de l'assemblage des sous-modèles bond-graphs, la phase de synthèse des informations au niveau du modèle global obtenu est réalisée très facilement, les différentes informations structurelles étant regroupées quasiment instantanément en identifiant les pointeurs (au sens informatique) correspondants aux liens de connexion, la synthèse des propriétés structurelles quant à elle ne demandant que peu de d'analyse supplémentaire.

III - 3 - 4 - 2 Choix d'une structure de données adaptée

Outre la faculté d'automatisation des traitements qu'apporte un logiciel informatique, l'application à la gestion des sous-modèles, qui plus est à différents niveaux d'abstraction, n'aurait pu être réalisée d'une manière aussi simple et naturelle autrement que par l'utilisation d'une structure des données et de procédures issues de la Programmation Orientée Objets [28] [29]. De plus, l'utilisation de la programmation par événement telle qu'on la trouve dans les langages de programmation sous Windows, nous permet d'atteindre une dimension supérieure au niveau de la gestion des sous-modèles, rendant possible l'utilisation de sous-modèles « intelligents » et autonomes, capables de communiquer avec les autres sous-modèles tout en prenant en charge localement un certain nombre de traitements, et donnant un sens à l'utilisation des sous-modèles à différents niveaux d'abstraction (comme nous l'avons vu dans les paragraphes III-2-2-2 et III-3-2), permettant également entre autre chose de fournir des outils d'aide à la conception uniques, comme nous le verrons dans le chapitre IV. C'est l'une des raisons pour lesquelles les langages qui ont servis à réaliser la version actuelle d'ARCHER sous Windows sont le Visual Basic et le Visual C, ceux-ci permettant tous les deux d'utiliser la Programmation Orientée Objet et la gestion des événements Windows, tout en fournissant des outils d'interfaçage conviviaux et puissants.

III - 3 - 4 - 3 Implémentation de notre démarche utilisant la description

UML

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la représentation par objets est la plus adaptée à la résolution de notre problème. Afin de rendre notre approche la plus souple possible, il est préférable de choisir un type de représentation suffisamment répandu afin de faciliter la compatibilité avec d'autres approches. Nous avons ainsi choisi la méthode UML

[54], qui nous permet de représenter aussi bien les objets eux-mêmes que les traitements effectués avec ceux-ci. De plus, cet outil permet en plus dans une certaine mesure de générer directement le code correspondant dans un certain nombre de langages de programmation.

Par rapport à la structure de données d'un modèle bond-graph classique, l'utilisation de sous-modèles va nous donner la représentation suivante en UML :

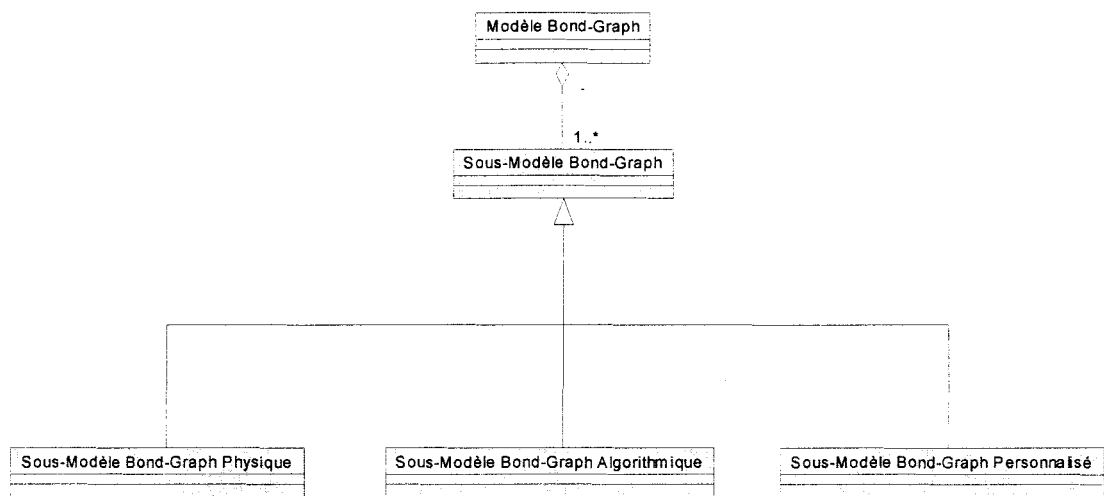


Fig. III.22 : Structure d'u modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Ainsi, tout modèle bond-graph va être constitué de l'assemblage de différents sous-modèles bond-graphs, ceux-ci pouvant être issus d'une bibliothèque de modèles (sous-modèles physiques), définis par l'utilisateur (sous-modèles personnalisés) ou issus d'une décomposition systématique afin de faciliter les traitements (sous-modèles algorithmiques).

D'autre part, la structure des sous-modèles bond-graphs sera similaire à celle des bond-graphs classiques, avec cependant l'apparition des éléments de connections parmi les éléments possibles :

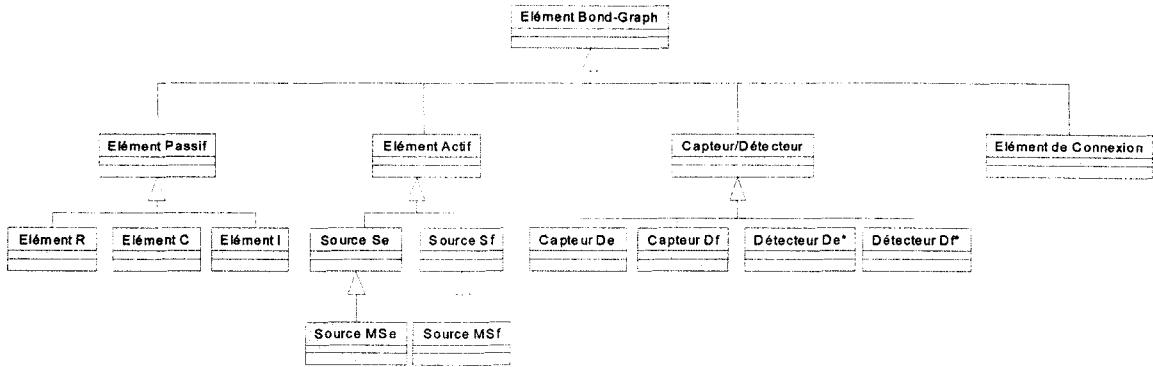


Fig. III.23 : Eléments composant les sous-modèles bond-graph

Au niveau des attributs et méthodes de la classe sous-modèles bond-graphs, les attributs vont être constitués des différentes informations structurelles liées aux sous-modèles et les propriétés vont réunir les différents outils de construction de ces sous-modèles ainsi que les différentes propriétés structurelles que l'on va analyser.

Ainsi, un sous-modèle bond-graph aura les attributs et méthodes suivantes :

Sous-Modèle Bond-Graph
• ListeJonctions
• ListeEléments
• ListeSous-ModèlesFils
• ListeContraintes
• CausalitéIntégrale
• CausalitéDérivée
• CheminsCausauxCI
• CheminsCausauxCD
• BouclesCI
• Rang
• Observabilité
• Commandabilité
• Surveillabilité
• Inversibilité
• Découplabilité
◆ AjouterElément()
◆ AjouterJonction()
◆ SupprimerElément()
◆ SupprimerJonction()
◆ DéplacerElément()
◆ DéplacerJonction()
◆ DéterminerCI()
◆ DéterminerCD()
◆ AffecterCI()
◆ AffecterCD()
◆ DéterminerCheminsCausauxCI()
◆ DéterminerCheminsCausauxCD()
◆ DéterminerBouclesCausalesCI()
◆ ConnecterAuSous-Modèle()
◆ DéconnecterSous-Modèles()
◆ DéterminerRang()
◆ DéterminerObservabilité()
◆ DéterminerCommandabilité()
◆ DéterminerSurveillabilité()
◆ DéterminerInversibilité()
◆ DéterminerDécouplabilité()

Fig. III.24 : Attributs et méthodes de l'objet sous-modèle

Remarque :

La propriété 'Liste sous-modèles fils' est utilisée dans le cas où un sous-modèle est lui-même décomposé en différents sous-modèles. Dans ce cas, les méthodes réalisées au niveau d'un sous-modèle père feront appel à ces sous-modèles fils afin de propager les traitements au niveau des sous-modèles fils.

III - 4 Extension à la bicausalité

La notion de bicausalité définie par P.J. Gawthrop [4] que nous avons présentée dans le chapitre I peut apporter beaucoup à certains traitements, dont l'identification des paramètres [4], la prise en compte de l'état initial [4], l'inversion de systèmes [4] et [18] et l'étude de l'effet des variations de paramètres [19]. La démarche de traitement de sous-modèles bond-graphs que nous avons présentée ici ne serait pas complète si elle ne permettait pas de décrire les sous-modèles bond-graphs suivant différents formalismes tels que les pseudo bond-graphs ou les bond-graphs bicausaux. L'objectif de cette partie est de décrire les différentes répercussions que l'utilisation de liens bicausaux va avoir sur notre démarche.

III - 4 - 1 Différences avec la représentation classique

Dans le cas général (sauf par exemple pour l'application à l'identification des paramètres où la causalité au niveau des éléments pourra changer elle aussi), l'utilisation de liens bicausaux dans la description des sous-modèles bond-graphs va résulter en deux différences majeures :

- Tout d'abord, alors que pour la causalité opératoire le sens de parcours causal de la variable effort était systématiquement exactement inverse à celui de la variable de

flux, avec les liens bicausaux l'évolution causale des variables effort et flux sera dissociée.

- Au niveau des jonctions 0 et 1, la notion de représentant causal existe toujours (une seule variable d'entrée d'effort sur une jonction 0, de flux sur une jonction 1), et l'autre variable (de flux pour une jonction 0, d'effort pour une jonction 1) doit toujours vérifier qu'elle ne sort que par un seul lien, mais à la différence de la causalité classique les deux liens incriminés ne sont plus systématiquement confondus, comme nous pouvons le constater sur l'exemple de la jonction 0 ci-dessous :

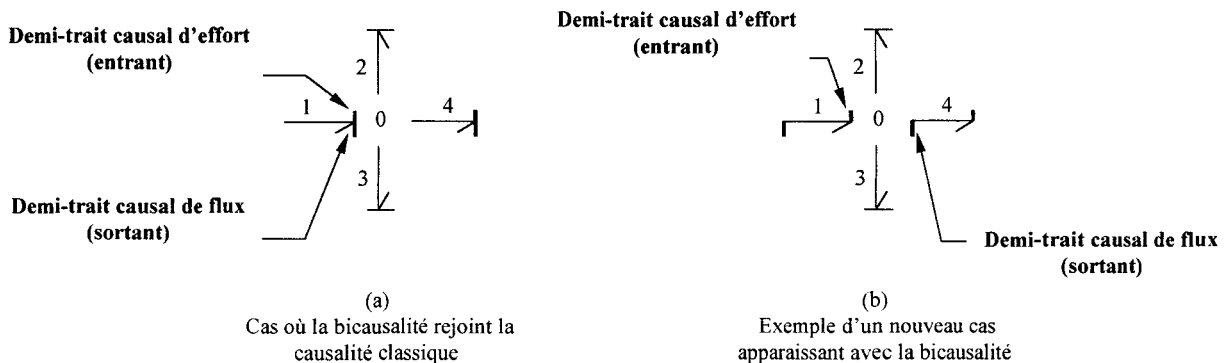


Fig. III.25 : Effet de la bicausalité sur une jonction 0

III - 4 - 2 Répercussions sur la décomposition en sous-modèles

Reprenons les différentes étapes de la gestion des sous-modèles bond-graphs et voyons les répercussions que l'apparition des cas de figure vus en III-4-1 va avoir.

Remarque :

Dans le cas de bond-graphs bicausaux, on trouve des liens des deux types : suivant la causalité classique ou bicausaux. Les modifications ci-dessous ne s'appliquent évidemment que dans le cas où les liens étudiés sont bicausaux.

III - 4 - 2 - 1 Décomposition en micro sous-modèles algorithmiques

En terme de chemins causaux, il y a toujours un représentant causal (pour l'effort sur une jonction 0 et le flux pour une jonction 1) au niveau de chaque jonction (traitement de la variable correspondante inchangé). Par contre, l'autre variable (flux pour une jonction 0 et effort pour une jonction 1) peut avoir maintenant sa variable de sortie sur un autre lien, comme nous l'avons vu sur la figure III.25.

Définition

Par analogie avec le terme de lien représentant causal, ce lien de sortie sera appelé « **lien conséquent causal** » (différent du représentant causal pour les bond-graphs bicausaux et donc confondu avec le représentant causal pour les bond-graphs classiques), pas aussi important que le représentant causal pour la détermination des variables inconnues en fonctions des paramètres connus (entrées et sorties) mais aussi important lors de la détermination des chemins causaux.

Ainsi, si la méthode faite de décomposition en micro sous-modèles bond-graphs algorithmiques reste identique, elle fait apparaître des sous-modèles que l'on appellera « **sous-modèles conséquents causaux** », étant aux sous-modèles représentant causaux ce que les **liens conséquents causaux** sont aux liens représentants causaux.

Il est à noter que la simplicité des sous-modèles micros est conservée (simplement les deux sens des variables effort et flux sont inversés mais ils restent constants).

III - 4 - 2 - 2 Décomposition en « macros » sous-modèles algorithmiques

Au niveau de la décomposition en « macros » sous-modèles algorithmiques, la présence de liens bicausaux au sein du sous-modèle bond-graph ne changera rien au fait que celui-ci pourra avoir des particularités structurelles telles que les cycles causaux. D'autre part, l'utilisateur doit toujours pouvoir définir une décomposition en sous-modèles choisie par lui, tout comme il doit toujours être possible d'organiser le modèle global en sous-modèles hiérarchiques. De ce fait, l'utilisation de liens bicausaux n'aura aucune répercussion supplémentaire directe sur la décomposition en « macros » sous-modèles bond-graphs, hiérarchiques ou non.

III - 4 - 2 - 3 Informations structurelles générées pour les sous-modèles bond-graphs

Pour ce qui est des informations structurelles générées pour les sous-modèles bond-graphs, la détermination des chemins causaux entre les éléments R, C, I, les sources et les capteurs (notons au passage l'apparition de sources-capteurs 'SS') et aussi les liens de connexion avec leurs gains, disjonctions et inclusions sera toujours aussi utile, tout comme la génération des chemins causaux avec les jonctions 0 et 1 (servant pour aider à placer les capteurs et les actionneurs).

III - 4 - 2 - 4 Propriétés structurelles déduites

Au niveau de la transposition des propriétés structurelles, la bicausalité s'appliquant par nature pour l'étude des propriétés liant les entrées et les sorties du modèle, seules les propriétés d'inversibilité et de découplabilité seront étudiées au niveau des sous-modèles bicausaux.

III - 4 - 2 - 5 Connexion des sous-modèles et synthèse des résultats

Lorsque des modèles bicausaux vont être connectés, il suffira simplement de vérifier que la bicausalité des liens de connexion est compatible (la seule conséquence étant qu'on aura plus de cas de figure possibles).

Pour ce qui est de la synthèse des résultats obtenus au niveau des sous-modèles, la seule différence évidente que l'on peut signaler est l'utilisation, en plus des sous-modèles représentants causaux, de sous-modèles « **conséquents causaux** » (cf partie III-4-2-2), *ce qui différenciera les traitements suivant que l'on étudie le parcours du flux ou de l'effort.*

III - 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un formalisme permettant de gérer l'utilisation de sous-modèles bond-graphs dans un logiciel tel qu'ARCHER, ces sous-modèles pouvant être issus, soit d'une bibliothèque de sous-modèles bond-graphs, soit être la conséquence de la décomposition d'un modèle bond-graph global ayant pour but d'en faciliter et d'en accélérer le traitement et l'analyse.

Nous avons également montré quelles informations structurales mémoriser au niveau de chacun de ces sous-modèles bond-graphs afin que leur connexion résultant en un modèle bond-graph global et la détermination des propriétés structurales de celui-ci s'effectuent le plus aisément possible.

Enfin, nous avons indiqué quelles modifications apporter à notre démarche afin de pouvoir traiter des sous-modèles bond-graphs bicausaux.

CHAPITRE IV

OUTILS POUR L'AIDE A LA CONCEPTION INTEGREE

Sommaire du chapitre IV

IV-1 Introduction.....	125
IV-2 Méthode générale.....	125
IV-3 Méthode utilisant la décomposition en sous-modèles bond-graphs	141
IV-4 Gestion des modifications structurelles	164
IV-5 Conclusion	166

IV - 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer deux démarches permettant d'aider le concepteur à **construire un modèle du système physique étudié possédant les propriétés structurelles qu'il désire**. La première démarche que nous allons présenter, reposant sur un modèle bond-graph décrit en un bloc (c'est-à-dire non décomposé en sous-modèles), va nous permettre d'établir le principe de l'approche proposée. En s'appuyant sur ces premiers résultats et sur la décomposition d'un modèle bond-graph en sous-modèles vue au chapitre III, nous étendrons ceux-ci afin de proposer dans la partie suivante des méthodes d'analyse structurelle et d'aide à la conception de systèmes physiques modélisés par un bond-graph décomposé en sous-modèles. Enfin, dans une dernière partie, nous présenterons différents algorithmes permettant d'étendre à un modèle bond-graph modifié les informations structurelles déjà calculées (chemins causaux, boucles causales, propriétés structurelles) sur une version antérieure.

IV - 2 Méthode générale

IV - 2 - 1 Démarche

La démarche que nous présentons ici est basée sur le principe suivant : dans un premier temps l'utilisateur choisit, parmi une liste de propriétés proposées par le logiciel, quelles sont celles qu'il veut que son modèle vérifie. Ensuite il lance la procédure d'aide à la conception qui va analyser sur le modèle les différentes propriétés choisies en proposant éventuellement des modifications structurelles à apporter (causalité, placement des actionneurs, des capteurs, éventuellement ajout de composants (de type R pour ne pas modifier l'ordre du modèle)) si celles-ci ne sont pas vérifiées. Pour chacune des propriétés

désirées, le logiciel va imposer au modèle des contraintes particulières associées à ces propriétés : si ces contraintes n'engendrent pas de conflits, cela signifie que le modèle peut vérifier les propriétés en question.

Le logiciel va donc suivre l'algorithme suivant :

Démarche

Phase 1 : Détermination des contraintes (avec ordres de priorité) que l'on va imposer au modèle bond-graph

Phase 2 : Propagation intelligente des contraintes définies en phase 1, en analysant les éventuelles répercussions sur la causalité et le placement des capteurs et des actionneurs

Phase 3 : Proposition d'un ou de plusieurs choix de placement des capteurs, des actionneurs et d'affectation de la causalité respectant les contraintes imposées ou le cas échéant au moins une partie de celles-ci, sans modifier la structure fondamentale du modèle

Phase 4 : Eventuellement proposer une révision plus importante du modèle de départ (éléments, structure) permettant de respecter les contraintes de départ si ce n'était pas réalisé

Remarque

Comme nous allons le voir dans la partie III-2-2-1, les propriétés et contraintes vont pouvoir être de natures diverses et liées à des domaines tels que l'automatique, la physique, l'algorithmique, le calcul numérique, etc.). Des exemples de contraintes issues du domaine de l'automatique sont données en Annexe B.

IV - 2 - 2 Description des différentes étapes

IV - 2 - 2 - 1 Phase 1 : Détermination des contraintes (avec ordres de priorité) que l'on va imposer sur le modèle bond-graph

Les contraintes qui vont être appliquées sur le modèle bond-graph peuvent être répertoriées en neuf catégories principales :

1. Les contraintes fixées par les règles de la méthodologie bond-graph

Ces contraintes sont essentiellement liées à la causalité et à la procédure utilisée pour l'affecter aux éléments du bond-graph. Ainsi, citons :

- La procédure SCAP (Sequential Causality Assignment Procedure)

Exemple :

- un seul représentant causal par jonction

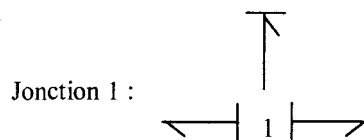


Fig. IV.1 : Contraintes de causalité sur une jonction 1

- La procédure RCAP (Relaxed Causality Assignment Procedure)

Dans ce cas on peut avoir par exemple 2 représentants causaux par jonction.

- La procédure LCAP (Lagrangian Causality Assignment Procedure)

Permet de générer les équations de Lagrange et le modèle dynamique du système en coordonnées généralisées.

- La bicausalité

Dans ce cas l'évolution des variables d'effort et de flux sur les liens bond-graph n'est plus symétrique.

2. Les contraintes liés à des propriétés relevant du domaine de l'automatique que l'on désire obtenir pour le modèle bond-graph

Ainsi citons par exemple le nombre de capteurs ou d'actionneurs pour que le modèle soit structurellement observable ou commandable.

3. Les contraintes associées au domaine physique dans lequel on travaille

Chaque domaine physique peut apporter son lot de contraintes tant sur la structure du modèle que sur les éléments eux-mêmes. Citons par exemple l'imposition de la causalité sur un élément afin de respecter la réalité physique (élément R non linéaire, ...).

4. Les contraintes énergétiques

L'utilisateur peut désirer un comportement énergétique particulier pour son système physique. Ainsi, en traduisant qualitativement ou quantitativement (en passant au numérique) les échanges d'énergie au sein du système, cela va permettre à celui-ci de définir des contraintes énergétiques directement sur le modèle bond-graph. Ces contraintes, si elles ne sont pas respectées, pourront conduire à reconsidérer le modèle bond-graph, par exemple au niveau des parties où très peu d'énergie circule.

5. Les contraintes liées à la simulation

Les besoins de la simulation influencent très souvent le choix du modèle. Ainsi, on pourra par exemple envisager des simplifications du modèle afin de rendre la simulation possible suivant les moyens calculatoires dont on dispose, ou au contraire affiner le modèle afin d'éliminer des problèmes numériques. De même, les phénomènes parasites (inductance de fil, élasticité ou frottement dans une liaison mécanique, ...) peuvent amener à des choix de pas de calcul très petits.

6. Les contraintes relatives à la simplification de modèles (variables lentes/rapides, regroupement d'éléments pour faciliter le traitement, etc ...)

Comme on l'a vu précédemment, la simulation peut nécessiter l'utilisation d'un modèle simplifié. C'est également le cas dans le processus de surveillance où le choix d'un modèle plus simple propre à la surveillance peut faciliter les calculs (comme nous l'avons vu dans la partie II-2 du deuxième chapitre).

7. Les contraintes numériques (sur l'énergie par exemple)

Bien que la plupart des contraintes soient d'ordre qualitatif, des contraintes numériques peuvent également être envisagées, d'autant plus que celles-ci peuvent amener dans certains cas à reconsidérer le modèle lui-même. Ces contraintes numériques peuvent porter par exemple sur l'énergie, sur la valeur des composants (afin d'éviter les boucles algébriques ou les boucles de causalité non solvables comprenant des transformateurs ou des gyrateurs par exemple), etc ...

8. Les contraintes informatiques permettant d'optimiser les algorithmes

Le traitement par ARCHER des différentes opérations qu'il propose nécessite des calculs très importants, a fortiori si le modèle est complexe. La simplification de ceux-ci est donc plus que bienvenue, et peut conduire à des contraintes sur le modèle bond-graph, par exemple sur des choix de chemins lors des parcours causaux ou directement sur la simplification du modèle.

9. Les contraintes diverses pouvant être demandées par l'utilisateur.

On peut citer par exemple le choix de favoriser le passage par tels ou tels éléments plus fiables que les autres dans le cas d'un fonctionnement en mode dégradé (dysfonctionnements de certains éléments du système) par exemple.

Afin de faciliter la tâche de l'utilisateur dans l'écriture de contraintes aussi particulières, des macros, utilisées également en interne par les algorithmes d'ARCHER, lui sont proposées, à partir desquelles il peut également en définir des nouvelles.

IV - 2 - 2 - 2 Phase 2 : Propagation intelligente des contraintes définies en phase 1, en analysant les éventuelles répercussions sur la causalité et le placement des capteurs et des actionneurs

Une fois que toutes les contraintes ont été fixées, elles sont répercutées sur le modèle bond-graph, en commençant tout d'abord par les contraintes pouvant avoir des conséquences sur le placement des capteurs et des actionneurs, puis celles pouvant remettre en cause l'affectation de la causalité.

IV - 2 - 2 - 3 Phase 3 : Proposition d'un ou de plusieurs choix de placement des capteurs, des actionneurs et d'affectation de la causalité respectant les contraintes imposées ou le cas échéant au moins une partie de celles-ci, sans modifier la structure fondamentale du système

Une fois que les contraintes ont été répercutées sur le modèle bond-graph, trois cas peuvent alors se présenter :

- *Toutes les contraintes ont été respectées et un seul choix de placement des capteurs, des actionneurs et d'affectation de la causalité est possible.*

Dans ce cas, tout va bien.

- *Toutes les contraintes ont été respectées et plusieurs choix de placement des capteurs, des actionneurs et d'affectation de la causalité restent possibles.*

Deux choix se proposent alors à l'utilisateur : soit il choisit arbitrairement une solution, soit il affine la recherche en ajoutant d'autres contraintes à celles de départ.

- *Toutes les contraintes ne sont pas respectées. Dans ce cas, le programme propose la solution respectant au mieux les contraintes prioritaires, celles liés aux règles de la méthodologie bond-graph en premier lieu, puis les ordres de priorité choisis par l'utilisateur.*

Dans ce cas, l'utilisateur a trois options :

- choisir la solution retenue
- laisser le programme proposer des modifications du modèle permettant d'obtenir les contraintes sélectionnées
- reconsidérer les contraintes de départ

IV - 2 - 2 - 4 Phase 4 : Eventuellement proposer une révision plus importante du modèle de départ (éléments, structure) permettant de respecter les contraintes de départ si ce n'était pas réalisé

Cette étape n'est utilisée que lorsque toutes les contraintes ne peuvent être vérifiées simultanément et que l'utilisateur a choisi de laisser le programme lui suggérer interactivement des modifications sur le modèle de départ afin d'obtenir les propriétés qu'il désire. Dans ce cas, des modifications portant sur les éléments eux-mêmes et sur la structure de jonction vont être considérées, en fonction des propriétés à obtenir.

IV - 2 - 3 Application : Placement des capteurs et des actionneurs pour la commandabilité et l'observabilité, évitant la présence de boucles de causalité

Comme exemple d'application de la démarche d'aide à la conception utilisant la notion de contraintes vue dans la partie précédente, nous proposons une méthode de placement des capteurs et des actionneurs qui permette d'obtenir les propriétés de commandabilité et d'observabilité pour le modèle, tout en évitant de générer des boucles de causalité non solvables.

IV - 2 - 3 - 1 Principe de la méthode

Notation

On notera MSe et MSf respectivement les sources d'effort et de flux modulés par la variable de commande. Celles-ci constituent les actionneurs, et peuvent donc être déplacées si besoin est, à l'inverse des sources correspondant aux entrées de perturbation ou d'alimentation. Il faut bien sûr vérifier les contraintes d'ordre technologique et de coût.

Méthode de placement des capteurs et des actionneurs pour la commandabilité et l'observabilité

Phase 1 : Détermination du nombre d'éléments dynamiques non commandables/observables

Dans un premier temps, pour un modèle bond-graph initialement en causalité intégrale, on passe en causalité dérivée.

Soit $(n_i)_d$ le nombre d'éléments dynamiques (initialement en causalité intégrale) restant en causalité intégrale afin de respecter les lois de l'affectation de la causalité, tout en évitant les boucles de causalité.

Phase 2 : Détermination du nombre d'actionneurs et de capteurs nécessaires

On peut alors en déduire [15] qu'au moins $(n_i)_d$ sources (resp. capteurs) seront nécessaires pour commander (resp. observer) le système. Si $(n_i)_d = 0$, alors une seule source (resp. un seul capteur) suffit, et seule la contrainte d'atteignabilité de tous les éléments dynamiques à partir de la source et du capteur doit être satisfaite. Par contre, si $(n_i)_d > 0$, alors le système nécessite au moins $(n_i)_d$ commandes (resp. $(n_i)_d$ capteurs) et les sources correspondantes doivent être placées judicieusement au sein du système.

Phase 3 : Recherche des placements d'actionneurs et de capteurs éligibles

Pour chaque élément dynamique initialement en causalité intégrale et qui garde cette causalité lorsque le modèle bond-graph est mis en causalité dérivée, on va déterminer la liste des jonctions du modèle bond-graph sur lesquelles l'adjonction d'une source (resp. d'un capteur) va permettre de commander (resp. d'observer) cet élément après dualisation.

Ainsi, en fonction du type de l'élément dynamique que l'on veut rendre commandable (ou observable), de la jonction sur lequel il est placé et du nombre de jonctions GY ou MGY traversées, la sélection des jonctions où placer l'actionneur (ou le capteur) s'effectue de la manière suivante :

- Si l'élément est de type I, placé sur une jonction 0_I , nous cherchons l'existence de liaisons causales (chemins) entre la jonction 0_I et les jonctions de type 1, possédant un nombre pair de GY ou MGY.
- Par contre, toujours si l'élément est de type I, placé sur une jonction 0_I , dans le cas où le nombre de GY ou de MGY traversés dans les chemins causaux issus de la jonction 0_I est impair, on s'arrêtera sur les jonctions 0.
- Si l'élément est de type I, placé cette fois-ci sur une jonction 1_I , nous cherchons l'existence de liaisons causales entre la jonction 1_I et les jonctions de type 1, possédant un nombre pair de GY ou MGY.
- Par contre, toujours pour un élément de type I, placé sur une jonction 1_I , dans le cas où le nombre de GY ou de MGY traversés dans les chemins causaux issus de la jonction 1_I est impair, on s'arrêtera sur les jonctions 0.
- Si l'élément est de type C, placé sur une jonction 0_I , nous cherchons l'existence de liaisons causales (chemins) entre la jonction 0_I et les jonctions de type 0, possédant un nombre pair de GY ou MGY.
- Par contre, toujours si l'élément est de type C, placé sur une jonction 0_I , dans le cas où le nombre de GY ou de MGY traversés dans les chemins causaux issus de la jonction 0_I est impair, on s'arrêtera sur les jonctions 1.
- Si l'élément est de type C, placé cette fois-ci sur une jonction 1_I , nous cherchons l'existence de liaisons causales entre la jonction 1_I et les jonctions de type 0, possédant un nombre pair de GY ou MGY.
- Par contre, toujours pour un élément de type C, placé sur une jonction 1_I , dans le cas où le nombre de GY ou de MGY traversés dans les chemins causaux issus de la jonction 1_I est impair, on s'arrêtera sur les jonctions 1.

Dans tous les cas, on vérifie que la solution retenue n'engendre pas de boucle de causalité non solvable.

Remarque

Afin de ne pas violer la causalité déjà établie (et de minimiser les problèmes de causalité), sur les jonctions 0 (resp. 1) on choisira de placer de préférence des capteurs d'effort (resp. de flux) et des sources de flux (resp. d'effort).

Phase 4 : Sélection du placement final

Une fois la liste des positions convenables établie, le choix final est effectué soit par l'utilisateur, soit suivant d'autres contraintes (s'il y en a), le cas échéant sous forme arbitraire.

IV - 2 - 3 - 2 Traitement des boucles de causalité non solvables (dans le cadre de l'analyse structurelle)

Rappel

Le traitement effectué ici utilise le modèle bond-graph en causalité dérivée.

Notation

Les notations suivantes vont être utilisées :

- El_d représente un élément dynamique en causalité dérivée
- El_i correspond à un élément dynamique en causalité intégrale
- R correspond à un élément R

D'autre part, on désignera par Elément1-Elément2 tout chemin causal liant l'élément 1 à l'élément 2.

Lorsque pendant l'algorithme, une ou plusieurs boucles de causalité non solvables apparaissent, un traitement particulier est effectué.

Algorithme de traitement des boucles de causalités non solvables

Phase 1 : Détermination des couples d'éléments reliés causalement sur lesquels l'inversion de la causalité éliminerait la présence de la boucle de causalité

Dans un premier temps, on essaie de modifier la causalité des éléments intervenants dans la boucle de causalité, afin de « casser » celle-ci.

La modification de la causalité au niveau d'un élément entraînant l'inversion de la causalité d'un des éléments causalement lié à celui-ci, plusieurs cas de couples d'éléments vont se présenter, certaines modifications étant préférables à d'autres.

Dans la procédure générale, le but de l'algorithme étant d'obtenir un modèle commandable et observable, on va ainsi s'efforcer de maximiser le rang du système, et donc de réduire autant que possible le nombre d'éléments restant en causalité intégrale.

Plusieurs cas vont alors se présenter :

- On va tout d'abord rechercher la présence éventuelle de chemins El_i-El_i ou El_i-R intervenant dans la boucle de causalité, auquel cas l'inversion de la causalité au niveau de ces éléments réduira le nombre d'éléments en causalité intégrale tout en éliminant la boucle de causalité non solvable.
- Ensuite, si aucun de ces types de chemins n'existe, on va regarder si des chemins $R-R$ ou El_d-El_i existent au niveau de la boucle. Dans ce cas on inverse la causalité sur un de ces couples. Ce type de modification est neutre, vu que dans le premier cas, il ne modifie en rien la configuration au niveau des éléments dynamiques restant en causalité intégrale, et dans le deuxième cas, le nombre d'éléments

dynamiques restant en causalité intégrale est inchangé, simplement un élément initialement en causalité dérivée revient en causalité intégrale et à l'inverse un élément restant en causalité intégrale passe en causalité dérivée.

- Enfin, si aucun de ces choix n'est disponible, on envisagera d'inverser la causalité sur des couples d'éléments El_d-R ou El_d-El_d , mais dans ce cas, il sera peut-être préférable de reconsidérer le modèle en ajoutant des éléments ou en modifiant la structure, car l'inversion de la causalité sur ces éléments entraînerait l'apparition de nouveaux éléments en causalité intégrale, ce qui n'est pas souhaitable, car comme nous l'avons vu précédemment, les éléments restant en causalité intégrale réduisent le rang du système et introduisent des problèmes au niveau de la commandabilité et de l'observabilité, en augmentant le nombre de sources de commande et de capteurs nécessaires.

Phase 2 : Synthèse des résultats obtenus pour toutes les boucles de causalité présentes dans le modèle bond-graph

Dans le cas où plusieurs boucles de causalité non solvables sont simultanément présentes, une gestion globale est effectuée : on cherche la solution minimisant le nombre d'inversions de causalité qui permette d'éliminer l'ensemble des boucles de causalité.

Exemple de résolution du cas de plusieurs boucles de causalité

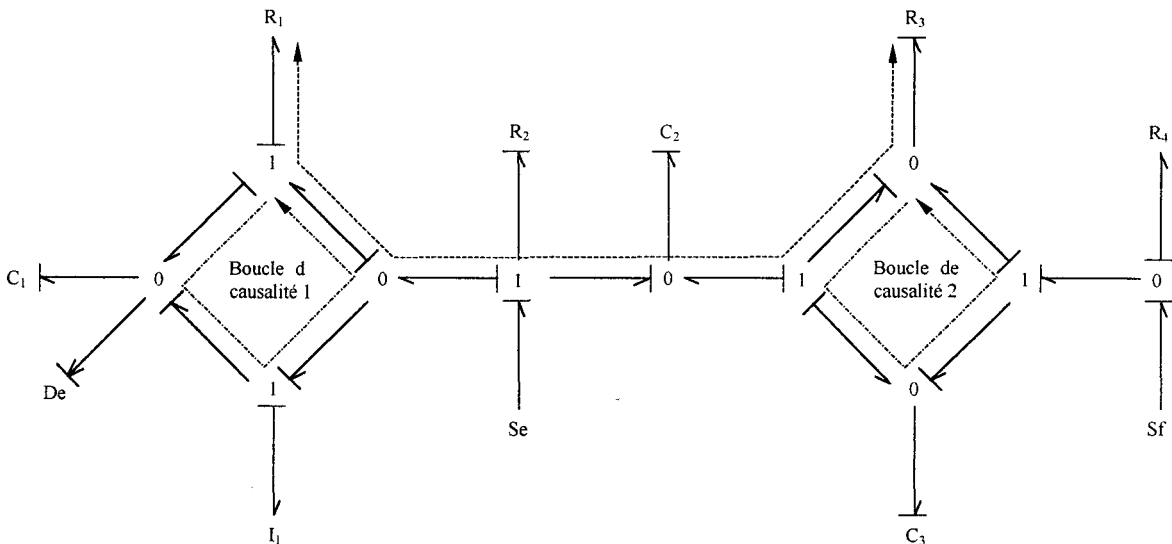


Fig. IV.2 : Modèle bond-graph en causalité dérivée comportant deux boucles de causalité non solvables

Dans cet exemple, on choisira d'inverser la causalité sur le chemin liant R_1 à R_3 , puisque cette solution permet en une action de casser les deux boucles de causalité non solvables.

Remarques

- Dans le cadre du placement des actionneurs et des capteurs, lorsqu'un choix de placement entraîne une boucle de causalité non solvable, une autre possibilité est d'éliminer la position retenue de la liste des positions convenables.
- La procédure décrite ici est réalisée dans le cadre du placement des capteurs et des actionneurs (avec le bond-graph en causalité dérivée préférentielle), mais ses principes restent valables dans le cas général.

IV - 2 - 3 - 3 Exemple

Soit le modèle bond-graph suivant :

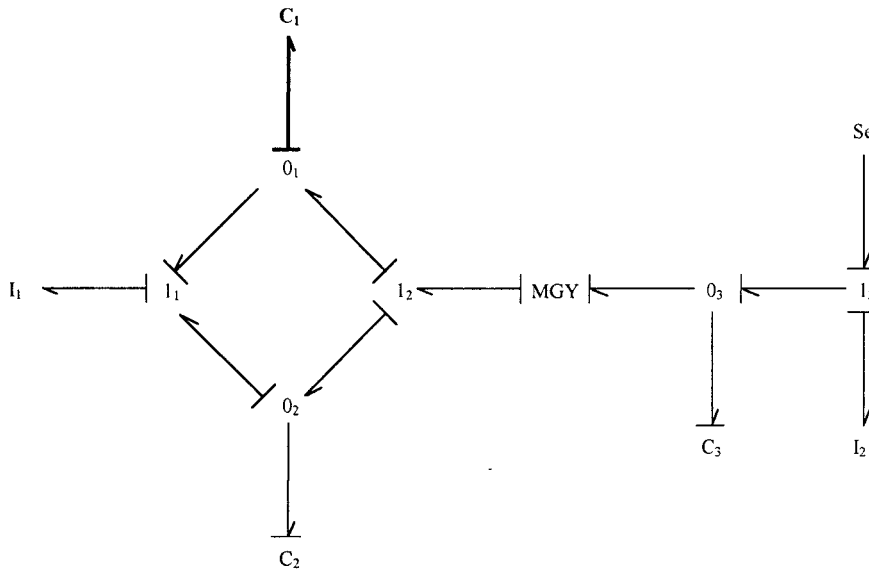


Fig. IV.3 : Exemple de modèle bond-graph en causalité dérivée

Dans cet exemple, on peut remarquer que l'élément C_1 reste en causalité intégrale alors que la causalité dérivée est affectée globalement au modèle.

On en déduit d'une part que le rang du modèle est réduit de un donc égal à quatre (tous les éléments dynamiques pouvant être mis en causalité intégrale sur le bond-graph en causalité intégrale), d'autre part qu'une source et un capteur seront nécessaires pour commander et observer le modèle, et que ceux-ci devront être placés judicieusement.

Lorsqu'on applique l'algorithme de détermination des positions adéquates pour les actionneurs et les capteurs vu au paragraphe IV-2-3-1, en remarquant que l'élément en causalité dérivée est un élément de type C placé sur une jonction 0, on retient les jonctions suivantes pour le placement du capteur et de l'actionneur :

- La jonction 0_1 est celle où se situe l'élément dynamique restant en causalité intégrale, elle est donc automatiquement retenue (pour un éventuel capteur d'effort / source de flux).

- La jonction 0_2 possède une connexion causale directe avec la jonction 0_1 , ne traversant aucun élément GY ou MGY. Elle est donc retenue aussi (pour un éventuel capteur d'effort / source de flux).
- La jonction 1_3 possède une connexion causale directe avec la jonction 0_1 , traversant un élément GY. Elle est donc a priori également valable (pour un éventuel capteur de flux / source d'effort).

Cependant, si on choisit la jonction 1_3 pour placer le capteur et la source et qu'on effectue une dualisation, on constate qu'une boucle de causalité non solvable apparaît. On élimine donc le choix de la jonction 1_3 dans la liste des jonctions pouvant accueillir le capteur et l'actionneur en vue de pouvoir observer et commander le système.

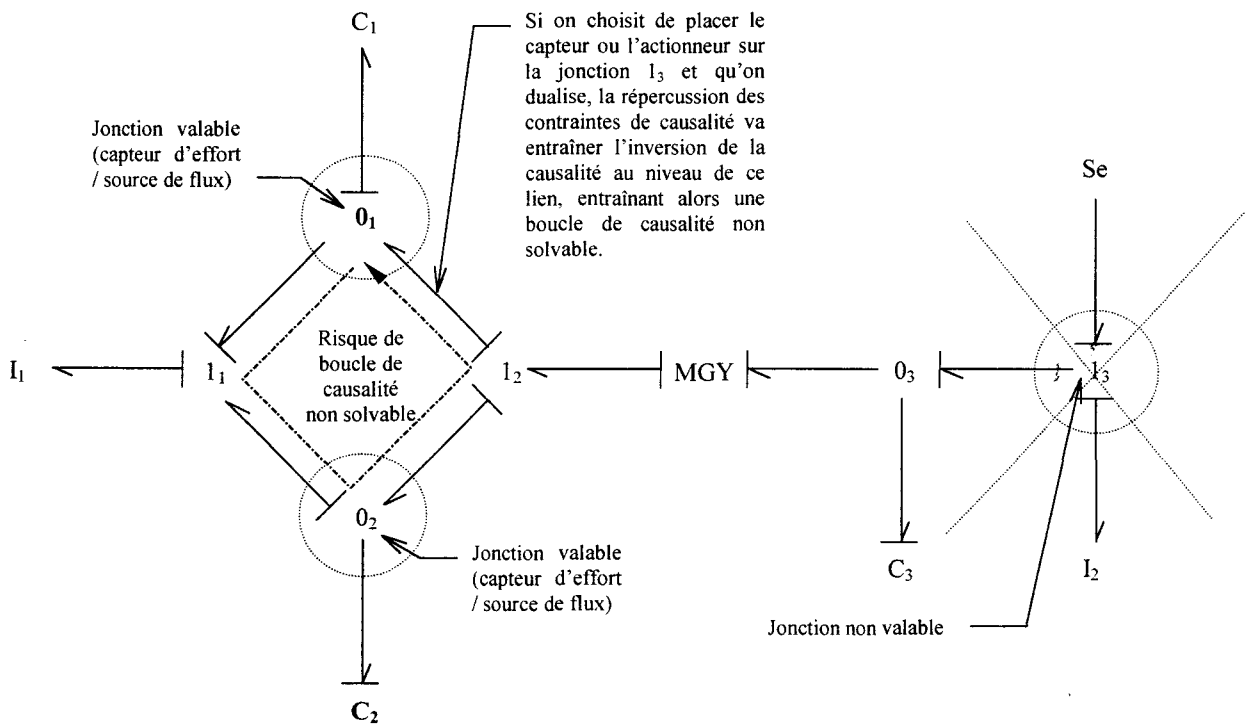


Fig. IV.4 : Jonctions pouvant recevoir une source et un capteur pour la commandabilité et l'observabilité

IV - 3 Méthode utilisant la décomposition en sous-modèles bond-graphs

IV - 3 - 1 Introduction

Nous venons de voir dans la partie IV-2 une démarche d'aide à la conception basée sur un modèle bond-graph décrit « en un bloc ». Dans cette partie, nous allons voir comment utiliser le fait qu'un modèle bond-graph soit décomposé en sous-modèles afin d'aider le concepteur à analyser et à concevoir son système.

Ainsi, dans un premier temps nous allons montrer comment adapter les procédures classiques d'analyse structurelle pour des bond-graphs décomposés en sous-modèles. Ensuite, nous proposerons des algorithmes permettant d'aider le concepteur à placer les actionneurs et les capteurs au sein de son modèle. Enfin, nous montrerons comment ces même algorithmes peuvent l'aider à choisir les sous-modèles qu'il va connecter.

Remarque

Tous les algorithmes que nous présentons ci-dessous peuvent gérer sans problème l'utilisation de sous-modèles hiérarchisés que nous avons évoqués dans le chapitre III. Il suffit pour cela d'appliquer conjointement l'algorithme de gestion de sous-modèles à différents niveaux hiérarchiques présenté dans la partie III-3-2. Pour des raisons de clarté, nous ne l'avons pas reproduit systématiquement dans les algorithmes présentés ci-après.

IV - 3 - 2 Adaptation des procédures d'analyse structurelle afin d'utiliser la décomposition en sous-modèles

Toutes les procédures classiques d'analyse structurelle peuvent être adaptées afin de pouvoir être utilisées sur des bond-graphs décomposés en sous-modèles, ceci afin de faciliter et accélérer les opérations et de faciliter la réutilisation de sous-modèles stockés dans des bibliothèques de modèles.

Les algorithmes présentés ci-dessous sont ainsi tous scindés en 2 phases :

- la première phase correspond au traitement individuel effectué sur chacun des sous-modèles bond-graph
- la seconde phase correspond à la synthèse des résultats obtenus lors de la phase 1 et à la conclusion sur la propriété à analyser

IV - 3 - 2 - 1 Algorithme de détermination du rang-bg d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme de détermination du rang-bond-graph de la matrice d'état d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

- a) Déterminer les ensembles non connexes causalement
- b) Pour chaque sous-ensemble causalement non connexe, déterminer les éléments (R linéaires) permettant de basculer la causalité des éléments dynamiques (pour l'instant en causalité intégrale) en causalité dérivée.

c) Pour les éventuels éléments dynamiques ne pouvant être basculés en causalité dérivée par les éléments locaux, déterminer les éventuelles connexions par lesquelles ils pourraient être basculés.

A l'inverse, s'il reste des éléments R dont la causalité peut être changée, indiquer quelles connexions ils vont pouvoir inverser.

d) Si demandé, faire les premières conclusions sur le rang-bg du sous-modèle

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

a) Pour les éléments dynamiques ne pouvant être basculés localement en causalité dérivée, déterminer ceux pouvant être basculés par l'intermédiaire d'éléments extérieurs.

Faire les choix optima permettant d'obtenir le minimum global d'éléments dynamiques restant en causalité intégrale.

b) En déduire le rang-bg du modèle global

Remarques

- En analysant uniquement les résultats de la phase 1 appliquée à chaque sous-modèle, on peut en tirer les premières conclusions suivantes :

Soit N le nombre total initial d'éléments en causalité intégrale.

Soit N_I le nombre total (pour tous les sous-modèles) d'éléments dynamiques initialement en causalité intégrale ne pouvant être basculés en causalité dérivée par l'intermédiaire d'éléments locaux.

Si la causalité sur les liens de connexion a déjà été déterminée afin que le modèle global ne possède pas de conflits causaux alors nous pouvons en déduire que le rang résultant de l'assemblage des sous-modèles sera au moins égal à $N - N_I$.

- En général, le **nombre réel est très souvent supérieur** grâce à la possibilité d'inverser la causalité d'un certain nombre de liens de connexion, permettant de faire passer plus d'éléments en causalité dérivée.

Illustration sur un exemple

Soit le modèle bond-graph suivant, décomposé en sous-modèles algorithmiques :

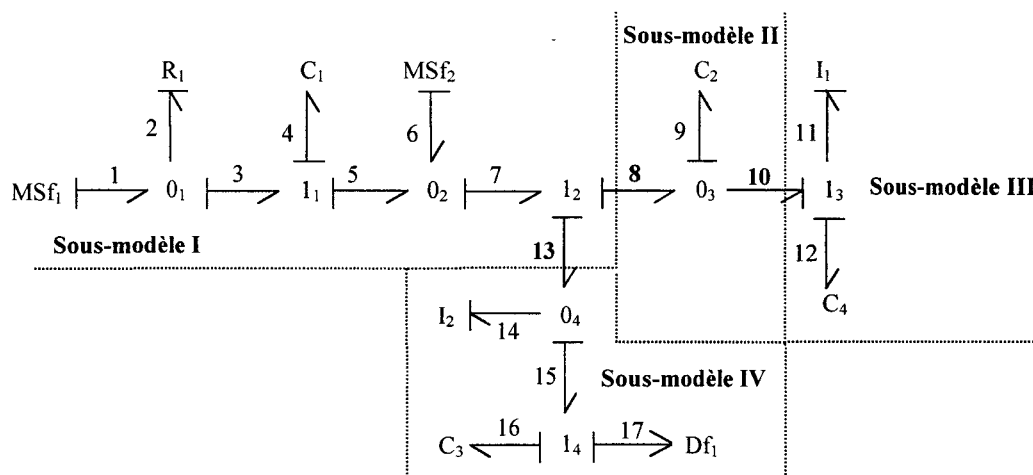


Fig. IV.5 : Modèle bond-graph décomposé en sous-modèles algorithmiques

Appliquons sur cet exemple l'algorithme de détermination du rang d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles :

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Sous-modèle I :

- L'élément dynamique C_1 peut être mis en causalité dérivée en inversant la causalité de R_1
- Préanalyse du sous-modèle I (non connecté) : $\text{Rang-bg}_1 = 1$ (max)

Sous-modèle II :

- L'élément dynamique C_2 peut être mis en causalité dérivée en inversant la causalité du lien de connexion 8 ou 10

- Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : $\text{Rang-bg}_I = 0$ (=1 si le lien de connexion 8 ou le lien de connexion 10 est causalement inversé)

Sous-modèle III :

- Les éléments dynamiques I_1 et C_4 peuvent être mis en causalité dérivée en inversant leur causalité
- Préanalyse du sous-modèle III (non connecté) : $\text{Rang-bg}_I = 2$ (max)

Sous-modèle IV :

- Les éléments dynamiques I_2 et C_3 peuvent être mis en causalité dérivée en inversant leur causalité
- Préanalyse du sous-modèle IV (non connecté) : $\text{Rang-bg}_I = 2$ (max)

A l'issue de la phase 1, on peut déjà conclure que le rang-bg minimum du système global est de 5 mais peut devenir maximum (donc égal à 6) si la causalité sur le lien de connexion 8 ou le lien de connexion 10 peut être inversée.

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

On peut remarquer que le sous-modèle I ne permet pas d'inverser le lien de connexion 8, et que le sous-modèle III ne permet pas d'inverser le lien de connexion 10.

On en déduit que le rang-bg du modèle global est donc seulement de 5.

IV - 3 - 2 - 2 Algorithme de détermination de la commandabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme de détermination de la commandabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 : Traitement de la première condition de commandabilité

- a) Déterminer les ensembles non connexes causalement
- b) Pour chaque sous-ensemble causalement non connexe, déterminer les sous-ensembles atteignables localement par une source de commande et potentiellement atteignables par une source de l'environnement extérieur.

Phase 1.2 : Traitement de la seconde condition de commandabilité

- a) Déterminer les éléments (R linéaires) et les sources permettant de basculer la causalité des éléments dynamiques (pour l'instant en causalité intégrale) en causalité dérivée.
- b) Pour les éventuels éléments dynamiques ne pouvant être basculés en causalité dérivée par les éléments/sources locaux, déterminer les éventuelles connexions par lesquelles ils pourraient être basculés.

A l'inverse, s'il reste des éléments/sources pouvant être basculés et restant disponibles, indiquer quelles connexions ils vont pouvoir inverser.

Phase 1.3 : Si demandé, faire les premières conclusions sur la commandabilité du sous-modèle

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 : Traitement de la première condition de commandabilité

- a) Pour les éléments dynamiques non atteignables localement par une source, regarder s'ils peuvent l'être par une source extérieure.
- b) En déduire les éléments non atteignables.

Phase 2.2 : Traitement de la seconde condition de commandabilité

a) Pour les éléments dynamiques ne pouvant être basculés localement en causalité dérivée, déterminer ceux pouvant être basculés par l'intermédiaire d'éléments/sources extérieurs.

Faire les choix optimaux permettant d'obtenir le minimum global d'éléments dynamiques restant en causalité intégrale.

b) En déduire les ensembles d'éléments non commandables (éléments dynamiques couplés causalement, dont certains sont en intégrale et les autres en dérivée)

Remarque

Tout comme nous l'avons indiqué pour la détermination du rang, les résultats seront meilleurs sur le modèle assemblé que sur l'ensemble des sous-modèles pris séparément.

Bien évidemment, cette remarque n'est valable que si la causalité des liens de connexions est telle qu'elle n'engendre pas de conflits lors de l'assemblage (c'est à dire dans le cas d'un modèle global décomposé volontairement en sous-modèles ou dans le cas de l'assemblage de sous-modèles issus de bibliothèques dont la causalité a été harmonisée).

Dans le cas où le choix de la causalité sur les liens de connexion n'a pas encore été décidé, cette remarque n'est plus valable. **Par contre, dans ce cas on pourra s'appuyer sur l'analyse de la commandabilité des sous-modèles pour proposer une affectation de la causalité sur les liens de connexion optimisant directement le nombre d'éléments commandables.**

Illustration sur un exemple

Appliquons maintenant sur l'exemple de la fig. IV.5 l'algorithme de détermination de la commandabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles (on considérera que l'analyse du rang-bg a déjà été effectuée) :

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Sous-modèle I :

- Préanalyse du sous-modèle I (non connecté) : Rang-bg maximal donc il faut une source pour que le sous-modèle I soit commandable mais peu importe sa place
- D'autre part la source MSf_2 peut être utilisée (par dualisation) pour inverser la causalité du lien de connexion 8 ou 13 et elle peut atteindre causalement les sous-modèles qui y sont connectés

Sous-modèle II :

- Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : le sous-modèle II n'est pas commandable (C_2 non commandable) (mais peut le devenir si le lien de connexion 8 ou 10 est causalement inversé et qu'un de ces deux liens est atteignable par une source)

Sous-modèle III :

- Préanalyse du sous-modèle III (non connecté) : le sous-modèle III n'est pas commandable (I_1 et C_4 non commandables) mais peut le devenir facilement si une source atteint causalement le lien de connexion 10

Sous-modèle IV :

- Préanalyse du sous-modèle IV (non connecté) : le sous-modèle IV n'est pas commandable (I_2 et C_1 non commandables) mais peut le devenir facilement si une source atteint causalement le lien de connexion 13

A l'issue de la phase 1, on peut déjà conclure que le sous-modèle I (élément C_1) est commandable, que les sous-modèle III et IV le seront s'ils sont connectés à un modèle atteignable par une source et que le sous-modèle II sera commandable s'il est connecté à au moins un sous-modèle atteignable par une source et que la causalité sur le lien de connexion 8 ou 10 peut être inversée.

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

On constate que le sous-modèle I est commandable, que le sous-modèle IV est connecté au sous-modèle I qui est atteignable par au moins une source, donc il est commandable également. De même pour le sous-modèle III qui est atteignable (via le sous-modèle II) par une des sources du sous-modèle I et est donc commandable. Le sous-modèle II est lui aussi atteignable par une source, de plus en dualisant la source MSf_2 on peut inverser la causalité du lien de connexion 8 et donc passer l'élément C_2 en causalité dérivée, donc il est lui aussi commandable (par la source MSf_2).

On en déduit que le système global est commandable (C_2 l'étant par l'intermédiaire de la source MSf_2)

IV - 3 - 2 - 3 Algorithme de détermination de l'observabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme de détermination de l'observabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Cet algorithme est dual de celui pour la détermination de la commandabilité en remplaçant les termes de commandabilité et de source respectivement par les termes d'observabilité et de capteur.

Illustration sur un exemple

Appliquons ensuite sur notre exemple l'algorithme de détermination de l'observabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles (en considérant que l'analyse du rang-bg a déjà été effectuée) :

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Sous-modèle I :

- Préanalyse du sous-modèle I (non connecté) : le sous-modèle I n'est pas observable (C_1 non observable) mais peut le devenir facilement si un capteur atteint causalement le lien de connexion 8 ou 13

Sous-modèle II :

- Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : le sous-modèle II n'est pas observable (C_2 non observable) (mais peut le devenir si le lien de connexion 8 ou 10 est causalement inversé et qu'un de ces deux liens est atteignable par un capteur)

Sous-modèle III :

- Préanalyse du sous-modèle III (non connecté) : le sous-modèle III n'est pas observable (I_1 et C_4 non observables) mais peut le devenir facilement si un capteur atteint causalement le lien de connexion 10

Sous-modèle IV :

- I_2 et C_3 sont causalement connectés au capteur Df_1
- Le capteur Df_1 peut atteindre les éléments dynamiques situés au delà du lien de connexion 13 mais par contre il ne peut pas être utilisé (par dualisation) pour inverser la causalité du lien de connexion 13 car cela empêcherait les éléments dynamiques I_2 et C_3 de passer en causalité dérivée
- Préanalyse du sous-modèle IV (non connecté) : le sous-modèle IV est observable (I_2 et C_1 observables)

A l'issue de la phase 1, on peut déjà conclure que le sous-modèle IV (éléments I_2 et C_3) est observable, que les sous-modèle I et III le seront s'ils sont connectés à un modèle atteignable par un capteur et que le sous-modèle II sera observable s'il est

connecté à au moins un sous-modèle atteignable par un capteur et que la causalité sur le lien de connexion 8 ou 10 peut être inversée.

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

On constate que le sous-modèle IV est observable, que le sous-modèle I est connecté au sous-modèle IV qui est atteignable par un capteur, donc il est lui aussi observable. De même, le sous-modèle III est atteignable (via le sous-modèle II) par le capteur du sous-modèle IV. Le sous-modèle II est lui aussi atteignable par un capteur, mais malheureusement aucun capteur ne permet (en étant dualisé) d'inverser la causalité ni du lien de connexion 8 ni du lien de connexion 10 et l'élément C_2 ne peut donc pas être mis en causalité dérivée.

On en déduit que le système global n'est pas observable (C_1 , C_3 , C_4 , I_1 et I_2 sont observables mais pas C_2).

IV - 3 - 2 - 4 Algorithme de détermination de la surveillabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme de détermination de la surveillabilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 : Recenser le nombre de capteurs : en linéaire, s'il existe au moins 2 capteurs alors on peut en conclure qu'on va être en mesure de détecter et d'isoler les pannes pouvant les affecter

Phase 1.2 : Recherche de tous les chemins causaux directs ou indirects des types suivants :

- Sources -> Capteurs
- Sources -> Liens de connexion
- Liens de connexion -> Capteurs
- Liens de connexion -> Liens de connexion

Phase 1.3 : Recensement des inclusions de chemins

Phase 1.4 : Si demandé, faire les premières conclusions sur la surveillabilité du sous-modèle

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 : Dédire de la phase 1 les chemins Sources->Capteurs existant dans le modèle global ainsi que les inclusions mutuelles entre ces chemins

Phase 2.2 : En déduire les sources sur lesquelles des pannes vont pouvoir être détectées et isolées

Même remarque que pour la commandabilité

IV - 3 - 2 - 5 Algorithme de détermination de l'inversibilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

De la condition d'inversibilité structurelle d'un modèle bond-graph présentée en [19], nous pouvons en déduire l'algorithme suivant pour son application à un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles :

Algorithme de détermination de l'inversibilité d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles à l'aide de la bicausalité

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 : Recherche de tous les chemins causaux directs ou indirects des types suivants :

- Sources -> Capteurs ou Détecteurs si les variables de sortie ne sont pas mesurables
- Sources -> Liens de connexion
- Liens de connexion -> Capteurs ou Détecteurs
- Liens de connexion -> Liens de connexion

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 : Déduire de la phase 1.1 tous les chemins causaux directs ou indirects

Entrée de commande -> Sortie à commander du modèle global

Phase 2.2 : En déduire l'ensemble ξ des ensembles bijectifs S de m (m étant le nombre d'entrées et de sorties) chemins causaux Entrée->Sortie disjoints

- Si $\xi = \emptyset$, alors le système n'est pas inversible
- Sinon déterminer un ensemble S_0 tel que l'ordre $l(S_0) = \min_{S \in \xi} \{l(S)\}$

Phase 2.3 : Remplacer les sources et les détecteurs associés aux variables de commande et de sortie par des éléments SS

Phase 2.4 : Pour tous les chemins p_i ($i = 1$ à m) de S_0 , faire :

- Affecter la causalité source d'effort / source de flux à son élément SS de sortie et propager cette bicausalité en direction de son élément SS d'entrée le long du chemin p_i . Cette propagation doit atteindre et imposer la causalité détecteur d'effort

/ détecteur de flux à l'élément SS d'entrée. En déduire toutes les implications causales possibles au niveau de la structure de jonctions.

- Si des conflits de causalité ou des boucles de causalité non solvables apparaissent à ce niveau de la procédure, alors le système n'est pas inversible et la procédure s'arrête.

Phase 2.5 : Si la phase 2.4 s'est déroulée sans problème alors le système est inversible

Remarque

A partir de la phase 2, des liens et des éléments de nature bicausale apparaissent. Ainsi, bien que le logiciel traitant les sous-modèles séparément n'ait pas besoin d'autoriser cette notation lors de la phase 1 (qui peut donc être réalisée sans problème avant le stockage éventuel du sous-modèle), la phase 2 requiert que le logiciel supporte la notation de bicausalité.

IV - 3 - 2 - 6 Extension à d'autres procédures d'analyse structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

De la même manière que nous avons traité les propriétés structurelles de rang-bg, de commandabilité, d'observabilité, de surveillabilité et d'inversibilité, d'autres propriétés structurelles peuvent être de la même façon adaptées afin d'être optimisées pour des modèles bond-graphs décomposés en sous-modèles. C'est par exemple le cas pour la découplabilité entrée-sortie, la disjonction entre chemins causaux entrées-sorties ainsi que l'inclusion mutuelle de ceux-ci (résultant dans la proportionnalité des gains des chemins causaux inclus) faisant partie des informations structurelles pouvant être déterminées au niveau des sous-modèles.

De même, l'étude de propriétés structurelles pour la commande peut être faite de la même façon : structure finie et infinie, zéros invariants, etc. Certaines de ces propriétés s'appuient sur le modèle bond-graph en causalité dérivée [Article Christophe et Ahmed].

IV - 3 - 3 Procédures d'aide au placement des actionneurs et des capteurs utilisant la décomposition en sous-modèles

De la même manière que nous venons de le voir pour les procédures classiques d'analyse structurelle, la plupart des résultats obtenus sur l'aide au placement des actionneurs et des capteurs peuvent également être adaptés afin de pouvoir être utilisées sur des bond-graphs décomposés en sous-modèles.

Les algorithmes présentés ci-dessous seront pareillement scindés en 2 phases :

- la première phase correspond au traitement individuel effectué sur chacun des sous-modèles bond-graph
- la seconde phase correspond à la synthèse des résultats obtenus lors de la phase 1 et à la conclusion sur les placements d'actionneurs et/ou de capteurs que l'on va proposer.

La majorité de ces algorithmes complétant les procédures présentées ci-dessus pour le traitement des propriétés structurelles, nous avons indiqué en gras les modifications spécifiques au placement des actionneurs et des capteurs que nous avons apportées.

IV - 3 - 3 - 1 Algorithme d'aide au placement des actionneurs dans le but d'obtenir la commandabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme d'aide au placement des actionneurs dans le but d'obtenir la commandabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 : Traitement de la première condition de commandabilité

- a) et b) cf. l'algorithme de détermination de la commandabilité (IV-3-2-2)
- c) Pour chaque sous-ensemble causalement non connexe ne possédant pas de source locale :
- s'il n'existe pas de connexion avec d'autres sous-modèles, mémoriser qu'un actionneur est nécessaire sur une des jonctions de ce sous-ensemble
 - sinon mémoriser qu'il faut un actionneur soit dans ce sous-modèle, soit dans l'un des sous-modèles connectés

Phase 1.2 : Traitement de la seconde condition de commandabilité

- a) et b) cf. l'algorithme de détermination de la commandabilité (IV-3-2-2)
- c) Pour les éléments dynamiques ne pouvant être basculés en causalité dérivée par les éléments/sources locaux, déterminer également les éventuelles jonctions locales sur lesquelles l'ajout d'un actionneur pourrait les basculer (par dualisation de l'actionneur)

De même, mémoriser sur quelles jonctions on pourrait ajouter un actionneur qui permettrait (par dualisation) d'inverser la causalité des liens de connexion

Phase 1.3 : Si demandé, faire les premières conclusions sur le placement des actionneurs

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 : Traitement de la première condition de commandabilité

- a) et b) cf. l'algorithme de détermination de la commandabilité (IV-3-2-2)
- c) Dédire de la phase 1.1.c les placements des actionneurs permettant d'obtenir la première condition de commandabilité

Phase 2.2 : Traitement de la seconde condition de commandabilité

- a) et b) cf. l'algorithme de détermination de la commandabilité (IV-3-2-2)
- c) Dédire de la phase 1.2.c les placements des actionneurs permettant d'obtenir la seconde condition de commandabilité

IV - 3 - 3 - 2 Algorithme d'aide au placement des capteurs dans le but d'obtenir l'observabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme d'aide au placement des capteurs dans le but d'obtenir l'observabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 : Traitement de la première condition d'observabilité

- a) et b) cf. l'algorithme de détermination de l'observabilité (IV-3-2-3)
- c) Pour chaque sous-ensemble causalement non connexe ne possédant pas de capteur local :
 - s'il n'existe pas de connexion avec d'autres sous-modèles, mémoriser qu'un capteur est nécessaire sur une des jonctions de ce sous-ensemble

- sinon mémoriser qu'il faut un capteur soit dans ce sous-modèle, soit dans l'un des sous-modèles connectés

Phase 1.2 : Traitement de la seconde condition d'observabilité

a) et b) cf. l'algorithme de détermination de l'observabilité (IV-3-2-3)

c) Pour les éléments dynamiques ne pouvant être basculés en causalité dérivée par les éléments/capteurs locaux, déterminer également les éventuelles jonctions locales sur lesquelles l'ajout d'un capteur pourrait les basculer (par dualisation du capteur)

De même, mémoriser sur quelles jonctions on pourrait ajouter un capteur qui permettrait (par dualisation) d'inverser la causalité des liens de connexion

Phase 1.3 : Si demandé, faire les premières conclusions sur le placement des capteurs

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 : Traitement de la première condition d'observabilité

a) et b) cf. l'algorithme de détermination de l'observabilité (IV-3-2-3)

c) Dédire de la phase 1.1.c les placements des capteurs permettant d'obtenir la première condition d'observabilité

Phase 2.2 : Traitement de la seconde condition d'observabilité

a) et b) cf. l'algorithme de détermination de l'observabilité (IV-3-2-3)

c) Dédire de la phase 1.2.c les placements des capteurs permettant d'obtenir la seconde condition d'observabilité

Illustration sur un exemple

Appliquons sur l'exemple de la fig. IV.5 l'algorithme d'aide au placement des capteurs dans le but d'obtenir l'observabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles :

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Sous-modèle I :

- Préanalyse du sous-modèle I (non connecté) : le sous-modèle I n'est pas observable (C_1 non observable) mais peut le devenir facilement si un capteur atteint causalement le lien de connexion 8 ou 13 ou si on ajoute un capteur sur une des jonctions $0_1, 1_1, 0_2, 1_2$.

Sous-modèle II :

- Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : le sous-modèle II n'est pas observable (C_2 non observable) mais peut le devenir si le lien de connexion 8 ou 10 est causalement inversé et qu'un de ces deux liens est atteignable par un capteur ou si on place un nouveau capteur sur la jonction 0_3 .

Sous-modèle III :

- Préanalyse du sous-modèle III (non connecté) : le sous-modèle III n'est pas observable (I_1 et C_4 non observables) mais peut le devenir facilement si un capteur atteint causalement le lien de connexion 10 ou si on place un nouveau capteur sur la jonction 1_3

Sous-modèle IV :

- I_2 et C_3 sont causalement connectés au capteur Df_1
- Le capteur Df_1 peut atteindre les éléments dynamiques situés au delà du lien de connexion 13 mais par contre il ne peut pas être utilisé (par dualisation) pour inverser la causalité du lien de connexion 13 car cela empêcherait les éléments dynamiques I_2 et C_3 de passer en causalité dérivée
- Préanalyse du sous-modèle IV (non connecté) : le sous-modèle IV est observable (I_2 et C_1 observables)

A l'issue de la phase 1, on peut déjà conclure que le sous-modèle IV (éléments I_2 et C_3) est observable, que les sous-modèle I et III le seront s'ils sont connectés à un modèle atteignable par un capteur et que le sous-modèle II sera observable s'il est connecté à au moins un sous-modèle atteignable par un capteur et que la causalité sur le lien de connexion 8 ou 10 peut être inversée.

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Le système global n'est pas observable (C_1 , C_3 , C_4 , I_1 et I_2 sont observables mais pas C_2).

Afin d'être en mesure d'observer l'élément C_2 , il faut placer un capteur soit sur la jonction 0_3 , soit sur la jonction 0_2 afin de pouvoir passer l'élément C_2 en causalité dérivée en dualisant le capteur, comme le montre la figure IV.6 suivante :

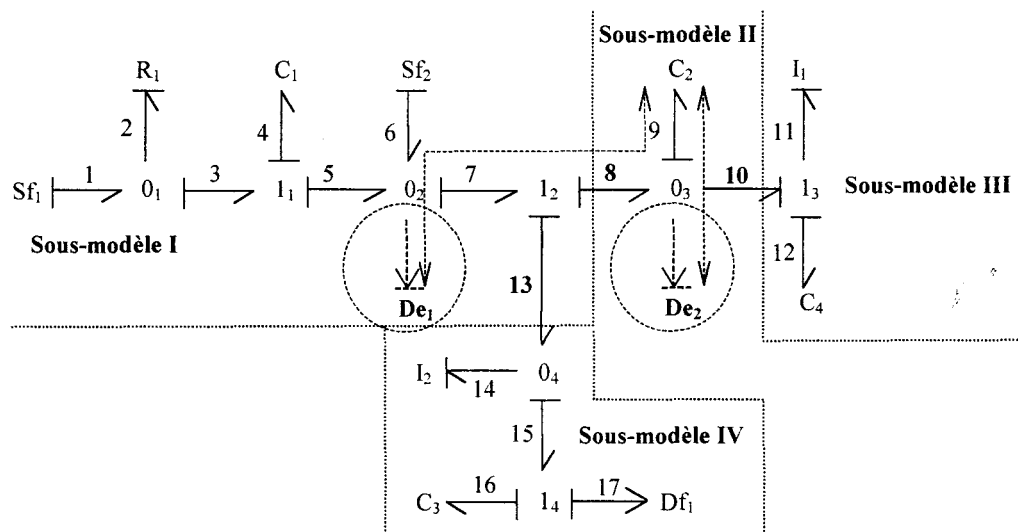


Fig. IV.6 : Modèle bond-graph rendu observable par l'ajout d'un capteur

IV - 3 - 3 - 3 Algorithme d'aide au placement des capteurs dans le but d'obtenir la surveillabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Algorithme d'aide au placement des capteurs dans le but d'obtenir la surveillabilité structurelle d'un modèle bond-graph décomposé en sous-modèles

Phase 1 : Traitement individuel des sous-modèles

Phase 1.1 à 1.4 : cf. l'algorithme de détermination de la surveillabilité (IV-3-2-4)

Phase 1.5 : Pour tous les chemins inclus trouvés, mémoriser les jonctions sur lesquelles l'ajout d'un capteur pourrait éliminer ces inclusions

Phase 1.6 : Si demandé, faire les premières conclusions sur le placement des nouveaux capteurs à ajouter pour la surveillabilité du sous-modèle

Phase 2 : Traitement du modèle global décomposé en sous-modèles

Phase 2.1 et 2.2 : cf. l'algorithme de détermination de la surveillabilité (IV-3-2-4)

Phase 2.3 : Conclure sur le placement des nouveaux capteurs à ajouter pour la surveillabilité du modèle complet

IV - 3 - 3 - 4 Extensions

De la même manière que nous l'avons fait pour la commandabilité, l'observabilité et la surveillabilité, d'autres propriétés structurelles (comme l'inversibilité ou la découplabilité) peuvent être de la même façon utilisées afin de proposer des indications sur le placement des capteurs et des actionneurs utilisant des modèles bond-graphs décomposés en sous-modèles.

IV - 3 - 4 Aide à la conception lors du choix de sous-modèles à connecter

Nous venons de voir dans la partie IV-3-3 des algorithmes permettant d'aider le concepteur à placer les actionneurs et les capteurs au sein de son modèle bond-graph décomposés en sous-modèles.

Il est cependant à noter *que ces algorithmes peuvent également aider le concepteur à choisir les sous-modèles qu'il va connecter*, l'aidant encore plus dans sa démarche de conception. En effet, ceux-ci peuvent être utilisés afin de faire ressortir *les conditions que doivent respecter les sous-modèles que l'on va connecter à un sous-modèle donné afin que celui-ci vérifie des propriétés structurelles particulières.*

En effet, revenons par exemple au traitement du modèle bond-graph de la fig. IV.5, sur lequel nous avons analysé sur chacun de ses sous-modèles le rang, la commandabilité structurelle et l'observabilité structurelle. Nous avons alors considéré que le modèle global était déjà fixé comme correspondant à l'assemblage des sous-modèles I, II, III et IV. Prenons maintenant le problème à l'envers et considérons que l'on cherche à choisir quels sous-modèles on va connecter par exemple au sous-modèle II.

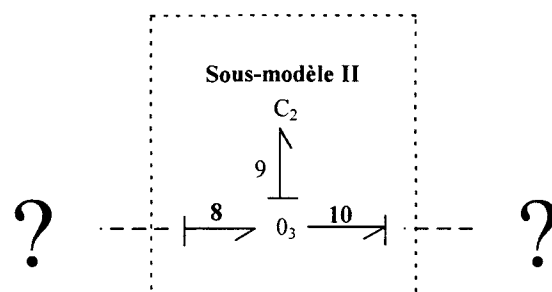


Fig. IV.7 : Sous-modèle II sans sous-modèles connectés

De par l'analyse préalablement effectuée sur ce sous-modèle, nous pouvons en déduire les conditions suivantes pour les sous-modèles potentiels que l'on va y connecter :

- Si l'on désire avoir un rang maximal :

- ◊ Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : $\text{Rang}_I = 0$
- ◊ *Le rang du sous-modèle II deviendra égal à 1 (donc maximal) si le lien de connexion 8 ou le lien de connexion 10 peut être causalement inversé par l'inversion d'un élément R linéaire ou un élément dynamique initialement en causalité dérivée (sur le bond-graph en causalité intégrale) situé dans un des 2 sous-modèles que l'on va connecter*

- Afin d'obtenir la commandabilité de ce sous-modèle :

- ◊ Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : le sous-modèle II n'est pas commandable (C_2 non commandable)
- ◊ *Le sous-modèle II sera commandable (C_2 commandable) si (au choix) :*
 - *le lien de connexion 8 ou 10 peut être causalement inversé par un élément R linéaire ou un élément dynamique restant en causalité intégrale (sur le bond-graph en causalité dérivée) et qu'un de ces deux liens est atteignable par un actionneur*
 - *le lien de connexion 8 ou 10 peut être causalement inversé par la dualisation d'un actionneur situé dans un des 2 sous-modèles que l'on va connecter*
 - *si on place un nouvel actionneur (de flux) sur la jonction 0_3*

- Afin d'obtenir l'observabilité de ce sous-modèle :

- ◊ Préanalyse du sous-modèle II (non connecté) : le sous-modèle II n'est pas observable (C_2 non observable)
- ◊ *Le sous-modèle II sera observable (C_2 observable) si (au choix) :*
 - *le lien de connexion 8 ou 10 peut être causalement inversé par un élément R linéaire ou un élément dynamique restant en causalité*

intégrale (sur le bond-graph en causalité dérivée) et qu'un de ces deux liens est atteignable par un capteur

- *le lien de connexion 8 ou 10 peut être causalement inversé par la dualisation d'un capteur situé dans un des 2 sous-modèles que l'on va connecter*
- *si on place un nouveau capteur (d'effort) sur la jonction 0_3*

IV - 4 Gestion des modifications structurelles

Différentes modifications structurelles peuvent intervenir sur un modèle bond-graph. Dans cette partie, en fonction de certains types de modifications structurelles que nous énumérons, nous présentons les modifications que l'on va devoir apporter aux informations structurelles déjà déterminées sur le bond-graph initial, sans devoir recalculer celles-ci sur le modèle modifié.

Par ailleurs, comme nous l'avions annoncé dans le chapitre III, cette approche nous permet de ne stocker dans la bibliothèque de sous-modèles que ces informations structurelles pour une configuration unique de la causalité sur les liens de connexion, les informations structurelles correspondant aux autres configurations possibles de la causalité sur les liens de connexion étant de cette manière facilement recalculées.

IV - 4 - 1 Inversion de la causalité sur une boucle entre 2 éléments

Principe de l'algorithme

Corriger les chemins causaux et boucles causales faisant intervenir les liens et éléments dont la causalité a été inversée.

IV - 4 - 2 Ajout d'un élément

Principe de l'algorithme

Ajouter les chemins causaux et boucles causales correspondant à l'ajout de cet élément.

Remarque

De nouveaux chemins causaux et de nouvelles boucles causales vont apparaître, mais tout ce qui avait déjà été déterminé reste valable.

IV - 4 - 3 Suppression d'un élément

Principe de l'algorithme

Supprimer tous les chemins et boucles associées à cet élément.

Dans le cas où la suppression de l'élément entraînerait un regroupement de jonctions, raccourcir les chemins concernés.

IV - 4 - 4 Remplacement d'un élément

Principe de l'algorithme

Si l'élément est de même nature (linéaire ou non linéaire) que l'ancien élément, remplacer l'élément et son gain correspondant.

Remarque

Dans le cas d'une implémentation informatique sous forme d'objet, le remplacement se fera d'autant plus naturellement.

Si, par contre, le nouvel élément est non linéaire alors que l'ancien ne l'était pas (ou l'inverse), alors supprimer les chemins causaux qui ne sont plus valides (dans le cas où l'élément non linéaire n'admet qu'une seule causalité possible). Dans le cas inverse (passage élément non linéaire → élément linéaire) ajouter les chemins causaux retours.

IV - 4 - 5 Suppression d'une partie du bond-graph

Principe de l'algorithme

Éliminer les éléments et jonctions concernés

Raccourcir ou éliminer les chemins causaux impliqués dans la partie supprimée.

IV - 4 - 6 Ajout d'une partie du bond-graph

Principe de l'algorithme

Rajouter les nouveaux éléments et jonctions dans la base de données

Ajouter les nouveaux chemins causaux et boucles causales de la partie ajoutée

Allonger les chemins causaux aboutissant à la partie rajoutée

IV - 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux démarches permettant d'aider le concepteur à déterminer le système physique possédant les propriétés structurelles qu'il désire. La première démarche que nous avons présentée, reposant sur un modèle bond-graph décrit en un bloc (c'est-à-dire non décomposé en sous-modèles), nous a permis d'établir le

principe de notre approche, tout en proposant un algorithme de placement des actionneurs et des capteurs permettant d'éviter la présence de boucles de causalité non solvables.

En s'appuyant sur ces premiers résultats ainsi obtenus et sur le principe de décomposition d'un modèle bond-graph en sous-modèles vu au chapitre III, nous avons proposé dans la deuxième partie des méthodes d'analyse structurelle et d'aide à la conception de systèmes physiques modélisés par un bond-graph décomposé en sous-modèles.

Enfin, dans la dernière partie, nous avons proposé les bases d'algorithmes permettant, à partir d'un modèle bond-graph sur lequel les informations structurelles ont déjà été calculées (chemins causaux, boucles causales, propriétés structurelles), de déterminer les nouvelles informations structurelles correspondant à ce modèle sur lequel on a effectué des modifications mineures, et ce sans recommencer tous les calculs.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de la représentation des systèmes physiques par bond-graphs s'est révélée très intéressante pour l'analyse et la conception de modèles de systèmes physiques.

En effet, tout d'abord les deux approches structurelles permettant de réaliser des systèmes de surveillance que nous avons proposées, ont su tirer parti de la structure causale des bond-graphs afin dans un premier temps d'en faire ressortir les différents problèmes pouvant survenir lors de la détermination du système de surveillance. Dans une deuxième étape, nous en avons déduit une représentation sous forme de graphe causal qui nous a permis de proposer une démarche de conception et d'analyse plus efficace, nous donnant un meilleur contrôle sur la génération des Relations de Redondance Analytique et facilitant également le traitement des bond-graphs comportant des éléments non linéaires, tout en fournissant des indications afin de placer au mieux les capteurs au sein du système.

D'autre part, l'utilisation de la modélisation par bond-graphs afin de représenter des sous-modèles destinés à être stockés dans une bibliothèque s'est révélée judicieuse. En effet, outre leur représentation très proche des systèmes physiques qui nous permet de décrire avec précision le sous-modèle stocké, leur structure fondamentalement causale nous a permis de faciliter le traitement et l'analyse des sous-modèles.

Enfin, l'utilisation de la représentation par bond-graphs conjointement à la description d'un modèle en sous-modèles nous a permis de proposer des outils inédits d'aide à la conception des systèmes physiques, en tirant profit des propriétés structurelles déduites de ces sous-modèles.

Nous pensons à étendre notre recherche afin de développer les points suivants :

- Au niveau de l'étude de la surveillance de systèmes physiques, nous aimerions développer nos résultats obtenus avec les graphes causaux, notamment en prenant en compte la surveillance des composants, par l'intermédiaire de l'ajout d'un opérateur "*" qui nous permettra de faire apparaître dans le graphe causal les termes correspondant à des produits dans les équations.
- Etendre notre démarche d'analyse de modèles bond-graphs décomposés en sous-modèles à d'autres propriétés structurelles (telle que la structure finie et infinie, les zéros invariants, ...).
- Approfondir notre méthode d'aide à la conception notamment en faisant intervenir d'autres propriétés structurelles.

ANNEXES

ANNEXE A

MODELISATION PAR BOND-GRAPHS

A - 1 Représentation des transferts de puissance

La représentation par bond-graphs (ou graphes à liens) [Livre bond-graph] est une technique de modélisation basée sur les échanges de puissance entre systèmes. L'idée de départ est que la puissance instantanée d'un système peut-être calculée à partir de deux variables qui sont l'effort et le flux telles que :

$$P(t) = e(t) f(t)$$

où : $P(t)$ est la puissance instantanée.

$e(t)$ et $f(t)$ sont respectivement l'effort et le flux à l'instant t .

Ces deux variables sont représentées implicitement sur le bond-graph par une demi-flèche indiquant le sens supposé de l'échange de puissance. Par exemple, pour un sous-système A fournissant de la puissance à un sous-système B, on écrira :

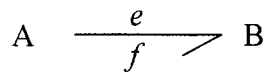


Figure A.1 : Représentation de l'échange d'énergie

Aux variables de puissance e et f sont associées les variables d'énergie p moment généralisé et q déplacement généralisé, obtenu par :

$$p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad p(0) \text{ supposée nulle,}$$

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad q(0) \text{ supposée nulle}$$

Le tableau suivant indique la signification des variables généralisées pour différents domaines de la physique :

	effort e(t)	flux f(t)	moment p(t)	déplacement q(t)
translation	force F (N)	vitesse V (m/s)	impulsion p (N.s)	déplacement x (m)
rotation	couple τ (N.m)	vitesse ang. ω (rad/s)	impuls. ang. h (N.m.s)	angle θ (rad)
hydraulique	pression P (N/m ²)	débit vol. Q (m ³ /s)	impuls. press. Γ (N.s/m ²)	volume V (m ³)
acoustique	pression P (N/m ²)	vitesse vol. ϕ_v (m ³ /s)	impulsion Γ (N.s/m ²)	volume V (m ³)
électrique	tension u (V)	intensité i (A)	impuls. tension Φ (V.s)	charge q (Cb)
magnétique	force magnétomot. λ (A)	dérivée du flux magn. $\dot{\Phi}$ (wb/s)		flux magn. Φ (wb)
chimique	pot. Chim. μ (J/mole)	flux molaire $\dot{N}$ (mol/s)		masse mol. N (mol)
thermodynamique	température T (K)	flux d'entropie $\dot{S}$ (wb/K)		entropie S (J/K)

Figure A.2 : Correspondances physiques des variables généralisées

Pour le moment $p(t)$, alors que par exemple en mécanique de translation on aura $p(t) = \int_0^t F(\tau) d\tau$, on peut remarquer que dans les domaines magnétique, chimique et thermodynamique la notion de moment n'est pas définie.

A - 2 Variables mises en jeu

Les éléments bond-graphs peuvent se classifier de la façon suivante :

- *éléments passifs* (reçoivent de la puissance) : R : dissipation d'énergie
 C, I : stockage d'énergie
- *éléments actifs* (fournissent la puissance) : Se, Sf (sources)

- *éléments de jonction multi-ports* : $0, 1, TF, GY$ (conservatifs de puissance)

A - 3 Notions de causalité

Les bond-graphs représentent l’architecture du système, où apparaissent les échanges de puissance entre éléments. Ils permettent également de définir la structure de calcul avec mise en évidence des relations de cause à effet au sein du système.

Ainsi, lorsque deux sous-systèmes A et B sont couplés, tels que A transmet à B la puissance $P = ef$, nous avons deux situations possibles :

- A applique à B un "effort" e , qui réagit en envoyant à A un "flux" f ;
- A envoie à B un "flux" f , qui répond par un "effort" e .

Ces deux cas conduisent à deux schémas-blocs différents :

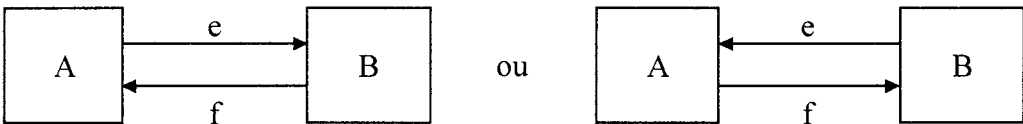
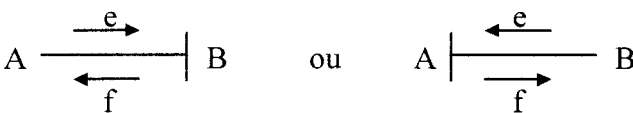


Figure A.3 : Deux situations de causalité

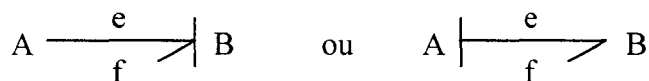
Pour prendre en compte ces relations de cause à effet et les représenter sur le modèle bond-graph, nous introduisons le *trait causal*.

Le trait causal est placé perpendiculairement au lien, il indique par convention le sens dans lequel l’effort est connu, le flux étant toujours considéré comme connu dans le sens opposé au trait causal.



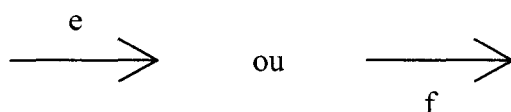
La position du trait causal est tout à fait indépendante du sens de la demi-flèche.

Ainsi, si on reprend l'exemple précédent, le transfert de puissance de A vers B conduit à deux positions du trait causal.



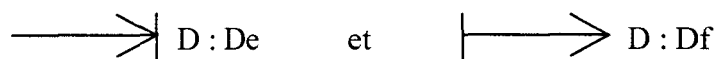
A - 4 Notions de signal

Lorsqu'une des deux variables effort ou flux est très faible, la puissance transmise est négligeable, et la représentation classique d'un signal peut être utilisée :



Le lien est alors un lien d'information et non plus un lien de puissance.

Ce type de lien permet de faire apparaître dans le modèle bond-graph les capteurs et les instruments de mesure (supposés idéaux), les opérateurs de calcul tels que les intégrateurs, les sommateurs ou les comparateurs, et tout réseau correcteur délivrant un signal de commande issu d'un calcul effectué à partir d'une mesure. Ainsi on notera :



les détecteurs d'effort et de flux, ce qui utilise la représentation signal, affectée de la causalité. Le bond-graph n'est donc pas un outil graphique dissocié des outils graphiques tels

que les graphes de fluence ou même les réseaux de Pétri. Il intervient au contraire pour représenter de façon plus complète les phénomènes physiques apparaissant dans un système, et s'inclut parfaitement comme modèle de connaissance, lors d'une simulation dans une structure classique de régulation telle que celle présentée figure A.5.

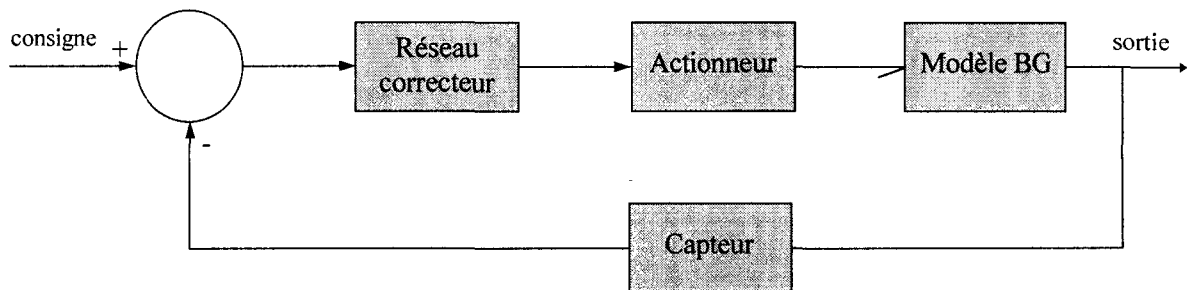


Figure A.4 : Modèle bond-graph dans un schéma-bloc

A - 5 Chemin causal - Boucle causale

A - 5 - 1 Définitions

1. Un **chemin causal** dans une structure de jonction bond-graph (figure A.5) est une alternance de liens et de noeuds telle que :
 - a) Pour le bond-graph acausal, la séquence forme une simple chaîne.
 - b) Tous les noeuds dans la séquence ont une causalité complète et correcte.
 - c) Deux liens du chemin causal ont en un même noeud des orientations causales opposées (sauf en présence d'un *GY*).
2. Deux ports P_1 et P_2 sont connectés causalement si la variable d'entrée de P_1 est influencée par la variable de sortie de P_2 (et vice versa).
3. Un **chemin causal** est **simple** s'il peut être parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc toujours deux chemins, en suivant soit l'effort soit le flux, comme présenté figure A.5.

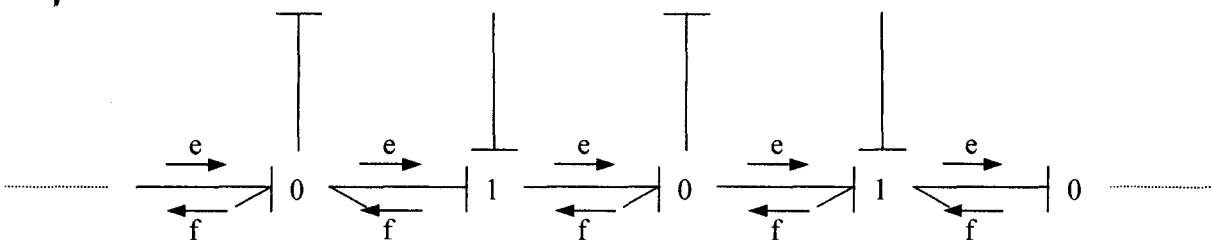
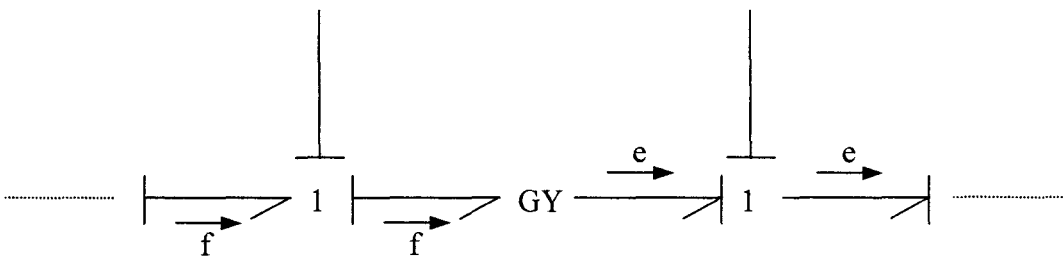
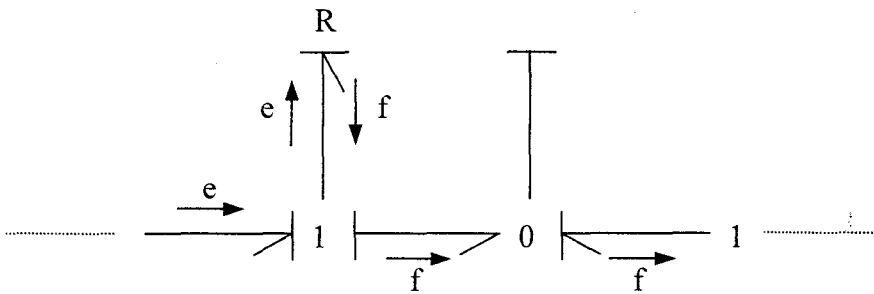


Figure A.5 : Chemins causaux dans un modèle bond-graph

4. Un **chemin causal** est **mixte** (présence d'un *GY*) ou indirect (passage par un élément *R*, *C*, *I*) s'il faut changer de variable lors du parcours du chemin (figures A.6 (a) et (b)).



(a)



(b)

Figure A.6 : Chemin causal mixte (a) et indirect (b)

5. Une **chaîne d'action** est un chemin causal entre une source et un détecteur.
6. Une **boucle causale** (figure A.7) est un chemin causal fermé entre deux éléments de l'ensemble (*R*, *C*, *I*) partant de la sortie d'un port et revenant à l'entrée de ce port sans parcourir le même lien dans la même direction plus d'une fois.

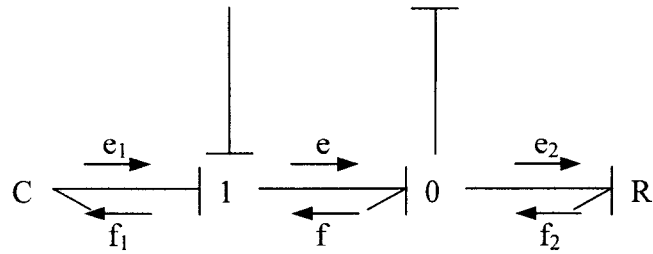


Figure A.7 : Boucle causale entre C et R

7. Une **boucle de causalité** est une succession de jonctions et de liens formant un cycle, pour lesquels la causalité est orientée dans le même sens sur tous les liens (figure A.8), (sauf en présence d'un GY).

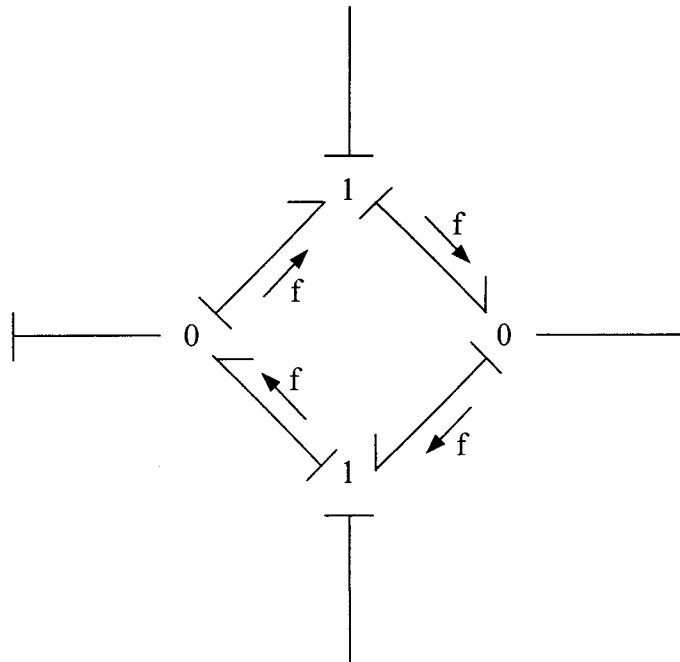


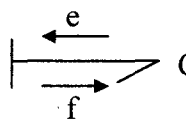
Figure A.8 : Boucle de causalité

A - 5 - 2 Gain d'un élément R, C, I

Dans le cas linéaire, la relation entre la variable d'entrée et la variable de sortie d'un élément 1-port (I, C ou R) peut s'écrire sous forme symbolique en utilisant l'opérateur symbolique de Laplace s associé à la dérivation par rapport au temps ou son inverse $1/s$ associé à l'intégration par rapport au temps.

On appelle **transmittance** (ou **gain**) d'un élément le rapport entre sa variable de sortie et sa variable d'entrée exprimées sous forme symbolique.

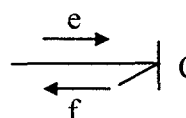
Ainsi, pour un élément C en causalité intégrale on aura :



$$e_c = \frac{1}{C} \int f_c dt \quad E(s) = \frac{1}{Cs} F(s)$$

Figure A.9 : Gain d'un élément C en causalité intégrale

En causalité dérivée on aura :



$$f_c = C \frac{de_c}{dt} \quad F(s) = Cs E(s)$$

Figure A.10 : Gain d'un élément C en causalité dérivée

De même, nous avons les transmittances élémentaires pour I et R :

- I / Is (causalité intégrale) et Is (causalité dérivée).
- R et $1/R$.

A - 5 - 3 Gain d'un chemin causal

Le **gain d'un chemin causal** direct ou mixte, indicé i , se calcule par :

$$T_i = (-1)^{n_0 + n_1} \cdot \prod_{j,k} (m_j \text{ ou } \frac{1}{m_j}) \cdot (r_k \text{ ou } \frac{1}{r_k})$$

où :

- n_0 et n_1 représentent respectivement le nombre total de changements d'orientation des liens aux jonctions 0 quand on suit la variable flux, et aux jonctions 1 quand on suit la variable effort.
- m_j , $1/m_j$ et r_k , $1/r_k$ sont les modules des éléments TF et GY intervenant dans le chemin causal, compte-tenu de la causalité qui leur est affectée.

Lorsque le chemin causal est indirect, et passe par des éléments R , C ou I , il faut multiplier l'expression précédente du gain par les transmittances des éléments traversés.

A - 6 - 4 Gain d'une boucle causale

Quand deux ports sont connectés causalement et composent une boucle causale indicée i , le *gain de boucle* B_i est obtenu par la relation suivante :

$$B_i = (-1)^{n_0+n_1} \cdot \prod_g \cdot \prod_{j,k} (m_j \text{ ou } \frac{1}{m_j})^2 \cdot (r_k \text{ ou } \frac{1}{r_k})^2$$

où n_0 et n_1 sont définis comme précédemment et $\prod_g$ désigne le produit des gains des éléments de la boucle.

Considérons à titre d'exemple le schéma électrique suivant (figure A.11) et son bond-graph associé (figure A.12) :

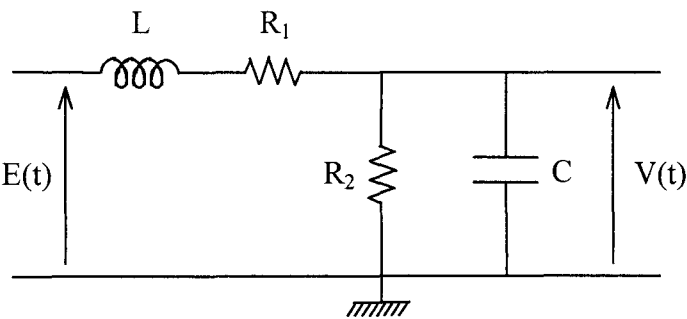


Figure A.11 : Schéma électrique

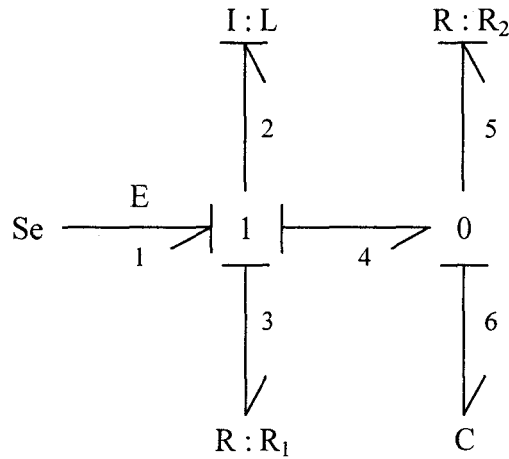
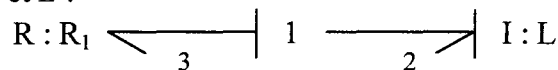


Figure A.12 : Modèle bond-graph associé au schéma électrique

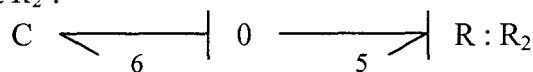
Trois boucles causales sont apparentes sur le bond-graph :

- Entre R_1 et L :



Le gain de boucle est $B_1 = -R_1 / Ls$, conformément à la formule précédente, le signe étant dû à un changement dans l'orientation des demi-flèches à une jonction 1 en suivant l'effort (trajet dans le sens 3-2), soit $n_0 = 0$ et $n_1 = 1$.

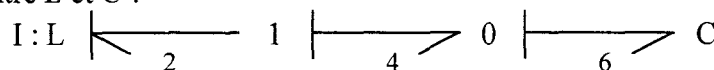
- Entre C et R_2 :



Cette boucle causale a comme gain :

$$B_2 = -1/R_2Cs, \quad (n_0 = 1, n_1 = 0)$$

- Entre L et C :



Le gain de cette boucle causale est :

$$B_3 = -1/LCs^2, \quad (n_0 = 0, n_1 = 1)$$

A - 7 Tableau récapitulatif des éléments de base bond-graph et de leurs propriétés

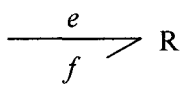
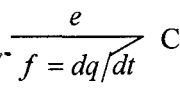
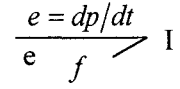
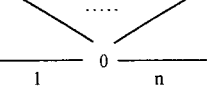
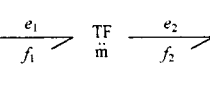
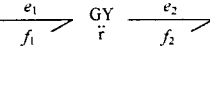
LES ELEMENTS DE BASE BOND-GRAPH ET LEURS PROPRIETES				
Eléments bond-graph	Symbole	Loi générique	Exemples physiques	Causalités
Variables de puissance	effort e flux f		force, couple, tension, pression ... vitesse, vit. ang., courant, débit, vol....	
Variables d'énergie	moment p déplacement q	$p = \int e dt$ $q = \int f dt$	impulsion, flux (self), ... déplacement, charge, volume, ...	
Eléments actifs (sources)	Se  Sf 	e indépendant de f f indépendant de e	pesanteur, générateur de tension, ... générateur de courant, pompe, ...	Se  , e donné Sf  , f donné
Eléments passifs 1-port	 R	$\Phi_R(e, f) = 0$	amortisseur, résistance, restriction hydraulique, frottement, ...	 R $e = F_R(f)$ ($e = Rf$)  R $f = F_R^{-1}(e)$ ($f = 1/R e$)
	 C	$\Phi_C(e, q) = 0$	ressort, condensateur, réservoir, élasticité, ...	 C $e = F_C(q)$ ($e = q/C$)  C $q = F_C^{-1}(e)$ ($q = C e$)
	 I	$\Phi_I(p, f) = 0$	masse, inertie, self, ...	 I $f = F_I(p)$ ($f = p/I$)  I $p = F_I^{-1}(f)$ ($p = I f$)
Eléments de jonction (conservatifs de puissance)		$e_1 = \dots = e_n$ $\sum_{i=1}^n a_i f_i = 0 \quad (a_i = \pm 1)$	connection série en mécanique connection parallèle en électrique	 1 seul trait causal près de la jonction ex. : $e_2 = e_1, \dots, e_n = e_1, \quad f_1 = a_1 \sum_{i=1, i \neq 1}^n a_i f_i$
		$f_1 = \dots = f_n$ $\sum_{i=1}^n a_i e_i = 0 \quad (a_i = \pm 1)$	connection parallèle en mécanique connection série en électrique	 1 seul lien sans trait causal près de la jonction ex. : $f_2 = f_1, \dots, f_n = f_1, \quad e^1 = a^1 \sum_{i=1}^n a_i e_i$
		$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	levier, système d'engrenages ou de poulies, réducteur, transformateur électrique, ...	 TF $e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$  TF $e_2 = (1/m) f_1$ $f_1 = (1/m) e_2$
		$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	moteur à courant continu, capteur à effet Hall, ...	 GY $e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$  GY $f_2 = (1/r) e_1$ $f_1 = (1/r) e_2$

Tableau A.13 : récapitulatif des éléments de base bond-graph et de leurs propriétés.

ANNEXE B

EXEMPLES DE CONTRAINTES ISSUES DU DOMAINE DE L'AUTOMATIQUE POUR L'AIDE A LA CONCEPTION INTEGREE

Les différentes propriétés sont énumérées de la manière suivante :

- la **qualité** représente la description de la propriété proprement dite ; le terme **qualité secondaire** désigne les propriétés optionnelles que l'on peut avoir lorsque certaines qualités "primaires" ne sont pas vérifiées (ex.: choix des sous-espaces commandables lorsque la commandabilité structurelle n'est pas vérifiée)
- l'**indicateur** représente les implications de l'existence de la propriété sur le modèle bond-graph, c'est-à-dire les signes qui vont nous permettre de dire si la propriété est vérifiée ou non
- la **résolution** fournit des éléments afin d'aider à obtenir la propriété désirée sur le modèle bond-graph dans le cas où celle-ci n'était pas vérifiée, dans le cadre de l'aide à la conception

Qualité	<i>Rang-bg de A maximal (pas de valeur propre nulle dans A, évite la CNS d'instabilité asymptotique) [30]</i>
Indicateur	<i>Aucun élément dynamique ne reste en causalité intégrale lorsque la causalité dérivée est imposée sur le modèle</i>
Résolution	<i>Proposition de modification du modèle (ajout/suppression d'éléments)</i>

Qualité	<i>Système [AC] structurellement à état observable [30]</i>
Indicateur	• <i>Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à un détecteur</i> • <i>Aucun élément dynamique ne reste en causalité intégrale lorsque la causalité dérivée est imposée sur le modèle et qu'on dualise les capteurs</i>
Résolution	• <i>Pour les connections causales avec les capteurs, proposer un nouveau placement des capteurs</i> • <i>Pour les éléments restant en causalité intégrale, modifier le modèle par ajout ou suppression d'éléments</i>

Qualité	<i>Système [AB] structurellement à état commandable [30]</i>
Indicateur	• <i>Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à une source</i> • <i>Aucun éléments dynamique ne reste en causalité intégrale lorsque la causalité dérivée est imposée sur le modèle et qu'on dualise les sources</i>
Résolution	• <i>Pour les liaisons causales avec les sources, proposer un nouveau placement des sources</i> • <i>Pour les éléments restant en causalité intégrale, modifier le modèle par ajout ou suppression d'éléments</i>

Qualité secondaire	<i>Rang de A non maximal avec choix des relations algébriques (simplification arbitraire ou choix de l'utilisateur) [30]</i>
Indicateur	
Résolution	<i>Choisir l'affectation causale aboutissant aux relations algébriques choisies (simplification arbitraire ou choix de l'utilisateur)</i>
Qualité secondaire	<i>Rang de A non maximal avec sous-espaces de commandabilité choisis (choix des éléments non commandables, choix des sous-espaces de commandabilité tels que l'intersection des sous-espaces non commandables associés à chaque entrée soit le sous-espace d'état non commandable tout en minimisant ce dernier) [30]</i>
Indicateur	
Résolution	• Choisir l'affectation causale afin d'obtenir la qualité désirée • Eventuellement déplacer les sources
Qualité secondaire	<i>Rang de A non maximal avec sous-espaces d'observabilité choisis (choix des éléments non observables, choix des sous-espaces d'observabilité tels que l'intersection des sous-espaces non observables associés à chaque capteur soit le sous-espace d'état non observable tout en minimisant ce dernier) [30]</i>
Indicateur	
Résolution	• Choisir l'affectation causale afin d'obtenir la qualité désirée • Eventuellement déplacer les capteurs
Qualité	<i>Condition suffisante de non commandabilité en sortie [30]</i>
Indicateur	<i>Il existe au moins un détecteur ne pouvant pas être dualisé. L'inversion des causalités peut se faire sur les éléments I, R, C mais aussi sur certaines sources.</i>
Résolution	<i>Déplacer les capteurs et/ou les sources ou rajouter des sources</i>
Qualité	<i>Condition suffisante de non commandabilité structurelle en sortie [30]</i>
Indicateur	<i>Le nombre d'entrées pouvant être dualisées est inférieur au nombre de détecteurs (seuls les éléments I, R, C peuvent adopter une causalité inverse)</i>
Résolution	<i>Déplacer les capteurs et/ou les sources ou rajouter des sources</i>
Qualité	<i>Système linéaire stationnaire à m entrées et p sorties ($p \leq m$) structurellement commandable en sortie (condition suffisante) [31]</i>
Indicateur	<i>Il n'existe qu'un seul choix possible de p chemins entrées-sorties différents</i>
Résolution	<i>Déplacer les capteurs et/ou les sources ou rajouter des sources</i>
Qualité	<i>Système linéaire stationnaire à m entrées et p sorties ($p \leq m$) structurellement commandable en sortie [31]</i>
Indicateur	• Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement atteints par une source • Rang-bg (AB) = n • Rang-bg (C) = p • En d'autres termes, lorsque les sorties sont indépendantes, la commandabilité en

	<i>état implique celle vis à vis des sorties</i>
Résolution	<i>Déplacer les capteurs et/ou les sources ou rajouter des sources</i>
Qualité	<i>Système carré à m entrées m sorties non inversible (condition suffisante) [31]</i>
Indicateur	<i>Pas de présence de m chemins causaux entrées-sorties différents</i>
Résolution	<i>Redéfinir la structure du modèle (position et nombre des capteurs/actionneurs, éléments)</i>
Qualité	<i>Système carré à m entrées m sorties inversible (condition suffisante) [31]</i>
Indicateur	<i>Un seul choix possible de m chemins causaux entrées-sorties différents</i>
Résolution	<i>Redéfinir la structure du modèle (position et nombre des capteurs/actionneurs, éléments)</i>
Qualité	<i>Système carré à m entrées m sorties inversible (condition nécessaire et suffisante) [31]</i>
Indicateur	<i>Déterminant de la matrice système non nul</i>
Résolution	<i>Redéfinir la structure du modèle (position et nombre des capteurs/actionneurs, éléments)</i>
Qualité	<i>Système inversible (m entrées m sorties) découplable par retour d'état statique [31]</i>
Indicateur	<i>Chacun des m chemins causaux entrées-sorties différents (choisis pour assurer l'inversibilité) est le plus court qui puisse exister entre une entrée (MSe ou MSf) et la sortie y_j (De ou Df)</i>
Résolution	<i>Redéfinir la structure du modèle (position et nombre des capteurs/actionneurs, éléments)</i>
Qualité	<i>Commandabilité structurelle d'un bond-graph linéaire comprenant des sources modulées uniquement [16]</i>
Indicateur	<i>Sur le bond-graph en causalité dérivée, tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée, en dualisant éventuellement les sources, la dualisation d'une source modulée n'étant possible que si un élément en causalité intégrale El_j est connecté par un chemin causal (propre ou impropre) à un détecteur modulant cette source. Les signaux partant de ce détecteur sont ensuite supprimés. De plus, l'élément El_j ne peut plus être réutilisé pour la dualisation d'une autre source.</i>
Résolution	<i>Modifier si possible le placement des sources modulées et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions).</i>
Qualité	<i>Commandabilité structurelle d'un bond-graph linéaire comprenant des sources modulées et non modulées [16]</i>
Indicateur	<i>Sur le bond-graph en causalité dérivée, tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée, en dualisant éventuellement les sources, la dualisation d'une source modulée n'étant possible,</i> <i>soit si un élément en causalité intégrale El_j est connecté par un chemin causal (propre ou impropre) à un détecteur modulant cette source. Les</i>

	signaux partant de ce détecteur sont ensuite supprimés. De plus, l'élément El_j ne peut plus être réutilisé pour la dualisation d'une autre source. soit si le détecteur modulant cette source est connecté par un chemin causal propre à une source non modulée. Les signaux partant du détecteur modulant la source que l'on dualise, vers d'autres sources sont aussi alors supprimés. La dualisation des sources non modulées n'est ensuite soumise à aucune contrainte.
Résolution	Modifier si possible le placement des sources modulées ou non modulées et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions)
Qualité	Commandabilité structurelle d'un bond-graph linéaire, à sources modulées par l'intégrale de l'état, par les sources non modulées [16]
Indicateur	- Il existe au moins un chemin causal généralisé liant une source indépendante à chaque élément dynamique en causalité intégrale - L'application d'une causalité préférentielle dérivée sur les éléments dynamiques n'intervenant pas dans le vecteur x_{i_1} (états dont la valeur de l'intégrale intervient dans la modulation des sources modulées) conduit à un bond-graph dont les éléments dynamiques encore en causalité intégrale (y compris ceux intervenant dans le vecteur x_{I_1}) sont tous reliés causalement à des éléments du vecteur x_{I_2} (états dont la valeur de l'intégrale n'intervient pas dans la modulation des sources modulées) encore en causalité intégrale, ou à des sources modulées ou non. Les éléments auxquels ils sont reliés doivent de plus être tous différents et les sources dépendantes doivent être modulées par des variables différentes.
Résolution	Modifier si possible le placement des sources modulées ou non modulées et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions).
Qualité	Commandabilité structurelle d'un bond-graph modulé linéairement avec des éléments en causalité dérivée [16]
Indicateur	Equivalent à l'étude de la commandabilité du même bond-graph sans les sources modulées par les dérivées de l'état
Résolution	Modifier si possible le placement des sources et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions)
Qualité	Condition suffisante de commandabilité locale autour des points d'équilibre d'un système bilinéaire modélisé par bond-graph [16]
Indicateur	Si, l'entrée u étant supposée constante, ce bond-graph vérifie le critère des systèmes linéaires pour la commandabilité alors le système bilinéaire est localement commandable autour des points d'équilibre. Autrement dit, si tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée quand on met le bond-graph en causalité dérivée, et qu'on dualise les sources, on peut affirmer que le système est localement commandable.
Résolution	Modifier si possible le placement des sources et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions).

Qualité	<i>Condition nécessaire de commandabilité d'un système bilinéaire modélisé par bond-graph [16]</i>
Indicateur	• Il existe un chemin causal entre un élément MTF ou MGY modulé par une commande et les éléments dynamiques en causalité intégrale quand le bond-graph est en causalité intégrale. • Aucun groupe de un élément n'est commun à tous les bond-graphs $(B_i) \ i = 0 \text{ à } m$ • Si un groupe de 2 éléments ou plus est commun à tous les bond-graphs $(B_i) \ i = 0 \text{ à } m$, il est nécessaire que ces éléments ne forment plus un groupe dans le bond-graph somme des (B_i)
Résolution	<i>Modifier si possible le placement des sources et des capteurs ou revoir la structure du modèle au niveau des éléments (et jonctions)</i>

Remarque

D'autres cas non linéaires peuvent également être considérés (cf. thèse Stéphane Rimaux page 160).

Qualité	<i>Surveillabilité d'un modèle bond-graph [10]</i>
Indicateur	<i>Pour chaque source S_i, il existe un chemin allant de cette source à un capteur non inclus dans les autres chemins partant des autres sources et aboutissant à ce même capteur</i>
Résolution	<i>Changer le positionnement des actionneurs et/ou des capteurs</i>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : S.H. Birkett
Combinatorial Analysis of Dynamical Systems
 Ph.D thesis, Waterloo, Ontario, 1990.
- [2] : P. Borne, G. Dauphin-Tanguy et al
Modélisation et identification des processus
 Technip 1992.
- [3] : F.T. Brown
Direct Application of the Loop Rule to Bond Graphs
 Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control, pp 253-261, september 1972.
- [4] : P.J. Gawthrop
Bicausal Bond Graphs
 ICBGM'95, Las Vegas, U.S.A. pp 83-88, 1995
- [5] : P. Kubiak, A. Azmani, G. Dauphin-Tanguy
Input-output Relation for Bond Graph with a Multiport Element
 IEEE/SMC Vancouver, october 1995.
- [6] : D. Mosiek, M. Tagina, G. Dauphin-Tanguy
Determination of a Computational Method for the Generation of Analytical Redundancy Relations using a Bond Graph Approach
 ESS'95 Erlangen, october 1995.
- [7] : D. Mosiek, M. Tagina, J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy
Utilisation of the Junction Structure Matrix and the Loops Properties of a Bond Graph Model to Avoid Implicit Equations During the Generation of Analytical Redundancy Relations and Sensors Placement
 ESM'96, Budapest, June 96.
- [8] : D. Mosiek, A. Azmani, G. Dauphin-Tanguy
A Graphical Representation deduced from Bond Graph Models for Monitoring Systems Design
 ESS'97, Passau, October 97.
- [9] : M. Staroswiecki, V. Cocquempot, J.P. Cassar
Generation of Analytical Redundancy Relations in Linear Interconnected Systems
 IMACS Annals on Computing and Applied Mathematics Proceedings MIN-S² 90, Brussels, 3-7 September 1990.
- [10] : M. Tagina
Application de la modélisation bond-graph à la surveillance des systèmes complexes
 Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1995.
- [11] : M. Tagina, J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki
Monitoring of Systems Modelled by Bond Graph
 ICBGM'95. International Conference on Bond Graph Modeling. Las Vegas, pp 275-280, January 1995.

[12] : M.Tagina, J.P.Cassar, G.Dauphin-Tanguy, M.Staroswiecki
La surveillabilité à partir d'un modèle bond graph
15th JTEA. Nabeul (Tunisia), vol 1, 10-11 november 1995.

[13] : H.C Turbatte
Conception d'architectures d'instrumentation sous contraintes d'observabilité et de fiabilité.
Application à des plates formes pétrolières
Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Lorraine, France, 1992

[14] Marisol Delgado
Description et simulation de systèmes décrits par le bond graph
Ph.D. Dissertation, Université de Rennes I, France, 1990

[15] : C. Sueur, G. Dauphin-Tanguy
Bond-graph approach for structural analysis of MIMO linear systems
Journal of the Franklin Institute, vol. 328, N°1, pp. 55-70, 1991

[16] : S. Rimaux
Etude des propriétés structurelles de certaines classes de systèmes physiques non linéaires modélisés par bond-graph
Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1995

[17] : P. Rémy
Conception et réalisation d'un processeur pour la génération d'un modèle bond-graph à partir de différentes descriptions de systèmes physiques sous le logiciel ARCHER
Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1994

[18] D.C. Karnopp
State variables and pseudo bond-graph for compressible thermofluid systems
J. of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 101, p.201-204, september 1979

[19] : R. Fotsu Ngwompo
Contribution au dimensionnement des systèmes sur des critères dynamiques et énergétiques - Approche par bond-graph
Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1997

[20] Jan L. Top, Arno Pieter Jan Breunese, Jan F. Broenink, Hans Akkermans
Structure and Use of a Library for Physical Systems Models
SCS Publishing, Simulation Series, Vol.27, No.1, pp.97-102, 1995

[21] A. Azmani
Analyse qualitative d'un bond-graph par les techniques de l'Intelligence Artificielle.
Contribution à la conception et à la réalisation du logiciel d'aide à la modélisation ARCHER.
Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1991

[22] A. Azmani, G. Dauphin-Tanguy
ARCHER : a program for computer aided modelling and analysis.
Volume spécial IMACS Transactions, Elsevier, 1992

[27] Jan L. Top, Arno Pieter Jan Breunese, Jan F. Broenink, Hans Akkermans
Structure and Use of a Library for Physical Systems Models
ICBGM'95, Vegas, SCS Publishing, Simulation Series, Vol.27, No.1, pp.97-102, 1995

[28] G. Massini, A. Napoli, D. Colnet, D. Leonard, K. Tombre
Les langages à objet, langages de classe, langages de frames, langages d'acteurs
Interéditions, 1989

[29] B. Meyer
Conception et programmation par objet
Interéditions, 1990

[30] C. Sueur
Contribution à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques par une approche bond-graph. Application aux systèmes polyarticulés plans à segments flexibles.
Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1990

[31] A. Rahmani
Etude structurelle des systèmes linéaires par l'approche bond-graph
Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1993

[32] M. Staroswiecki
Les systèmes et le concept d'instrumentation intelligente
Ingénieurs et scientifiques de France, le progrès technique

(reprise de la communication aux entretiens de la technologie, PARIS-CNIT- La Défense 1992), pp 35-42, février 1992

[33] M. Staroswiecki
La problématique et les approches de la surveillance des systèmes technologiques
Journées d'Etude S3 : Sûreté, Surveillance, Supervision.
Détection et localisation de défaillances
GDR Automatique
Paris 17-18 novembre 1994

[34] R. Iserman
Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A survey
Automatica, Vol 20, n°4, pp 387-404, 1984

[35] J.J. Gertler
Survey on Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants.
IEEE Control System Magazine, pp 3-11, décembre 1988

[36] Y. Park, J.L. Stein
Performance Evaluation of State and Input Observer for Machine Diagnostics.
Proceeding of the 1990 American Control Conference, San Diego, CA, 1990

[37] T.D. Cecchin, B. Sauter
Fault Detection in Time Varying System via Parameter Estimation
Proceedings IMACS MCTS 91, pp 542-551, Lille, France 1991

- [38] T. Sprösser
Contribution à l'étude des méthodes de détection de défauts par redondance analytique.
Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 16 décembre 1992
- [39] J.L. Stein, J.F. Tu
A State-Space Model for Monitoring Thermally Preload in Anti-Friction Spindle Bearings of High-Speed Machine Tools.
Transactions du ASME, Vol. 116, pp 372-386, septembre 1994
- [40] D.G. Luenberger
An introduction to Observers.
IEEE Transactions on Automatic Control.
Vol AC-16, n°6, pp 596-602, décembre 1971
- [41] P.M. Frank
Advanced Fault Detection and Isolation Schemes Using Nonlinear and Robust Observers.
10th World Congress on Automatic Control, IFAC, RFA, pp 63-68, juillet 1987
- [42] P.M. Franck
Fault Diagnosis on the basis of Dynamic Process Models.
Proceedings IMACS, 12th World Congress on Scientific Computation, Paris, France, pp 414-419, 18-22 juillet 1988
- [43] A.S. Willsky
A Survey of Design Methods for failure Detection in Dynamic Systems.
Automatica, Vol 12, pp 601-611, 1976
- [44] R.N. Clark
A Simplified Instrument Failure Detection Scheme
IEEE Trans. Aerosp. Electro. Syst.
Vol. AES, pp 558-563, juillet 1978
- [45] R.V. Bear
Failure Accomodation in Linear Systems Though Self-Reorganization
Ph. D dissertation, MIT, Dep. Aero. Astro. Cambridge, février 1971
- [46] J.F. Magni, P. Moyon
A Generalized Approach to Observers for Fault Diagnosis.
Proceedings of 30th IEEE CDC, Brighton, UK, décembre 1991
- [47] J. Brunet, D. Jaume, M. Labarrère, A. Rault, M. Vergé
Détection et diagnostic de pannes, approche par modélisation
Paris, Hermès, 1990.
- [48] : P. Declerck, M. Staroswiecki
Generation of Analytical Redundancy Relations for Fault Detection
IEEE SICICI Singapore February 18-21, pp 1010-1014, 1992.

[49] : J. Gerteler, D. Singer

A New Structural Framework for Parity Equation-based Failure Detection and Isolation
Automatica, Vol. 26, n° 2, pp 381-388, 1990.

[50] : M. Tagina, J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki

La surveillance d'un système électromécanique en utilisant une approche bond graph
Journées Tunisiennes d'Electronique et d'Automatique, pp 99-107 november 5-7, 1994.

