

Quels outils de représentation pour quels objectifs

Le développement de systèmes mécatroniques de plus en plus complexes et le besoin de les analyser dans leur globalité ont joué en faveur de l'apparition d'outils de représentation multiphysique. Ces outils qui permettent une formalisation graphique unifiée des systèmes quels que soient les domaines de la physique abordés, offrent une organisation des modèles facilitant ainsi l'analyse et la simulation de ce type de systèmes.

Dans le cadre du projet de la chaire "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes", les travaux de recherche sont centrés sur la méthodologie de maîtrise de la dynamique des systèmes tels que les hélicoptères. Dans ce chapitre, nous abordons une réflexion sur les outils de représentation qui présentent un intérêt pour une modélisation énergétique multiniveau d'un hélicoptère.

Dans la première partie du chapitre, un bilan des outils de représentation multiphysique existants est présenté. Dans ce contexte et par rapport aux objectifs présentés dans le premier chapitre, le bond graph (BG), le multibond graph (MBG) et la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) sont retenus.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous proposons une approche visant une exploitation complémentaire des outils retenus pour la modélisation et la commande d'un système.

II.1. *Etat de l'art des outils de représentation multiphysique*

Les outils de représentation graphique sont tout d'abord définis dans cette partie. Cette étape est nécessaire pour comprendre leur intérêt et ce que l'on veut exploiter de leur utilisation, pour la modélisation d'un système complexe tel que l'hélicoptère. Ensuite, un bilan des outils existants est présenté de manière à mettre en évidence quels sont ceux qui correspondent le mieux à nos objectifs.

II.1.1. *Qu'est-ce qu'un outil de représentation ?*

La modélisation est une étape du processus de conception. Lorsqu'il s'agit d'un système complexe multiphysique, cette étape n'est pas sans difficulté à cause de la complexité inhérente au système à concevoir et de la multidisciplinarité des équipes qui doivent coopérer pour la conception de tels systèmes [Amerogen - 2003 ; Dieterle - 2005]. En effet, il existe plusieurs critères pour considérer qu'un système est complexe (Chapitre I.2). Pour ces travaux, nous nous intéressons à la complexité liée à la multiplicité de sous-systèmes en fortes interactions et à l'aspect multiphysique du système. Pour la modélisation de ce type de systèmes, deux approches peuvent être retenues de la littérature.

La première approche de modélisation est la plus commune et consiste à obtenir un modèle sous forme de fonctions de transfert [Amerogen - 2003]. Un moyen d'y parvenir consiste tout d'abord à analyser la physique du sous-système. Il s'agit d'en effectuer une analyse structurelle pour obtenir une décomposition en éléments simples, correspondant par exemple aux éléments d'un modèle à paramètres localisés (masse, ressort, etc). A partir de cette analyse, les équations de comportement peuvent être déterminées. Ensuite, pour le sous-système considéré, une ou plusieurs fonctions de transfert globales sont généralement retenues pour décrire les fonctions principales du sous-système. Ces fonctions de transfert peuvent être représentées sous la forme d'un ou plusieurs schémas blocs. Elles sont exploitées ensuite pour atteindre plusieurs objectifs : par exemple l'analyse du comportement du sous-système pour l'élaboration de la commande ou encore l'identification expérimentale et le dimensionnement. Cette étape se fait souvent à l'aide d'outils de simulation numérique. Les différentes étapes de cette première approche sont illustrées par la Figure II.1. Lors des dernières opérations, les liens entre les paramètres des fonctions de transfert globales et les paramètres physiques du système peuvent être perdus. En effet, la traçabilité des hypothèses prises, des calculs

effectués, ou encore des conditions d'identification peut facilement être perdue dans un contexte industriel, particulièrement dans le cas d'entreprises comportant de nombreux services et potentiellement confrontées à une rotation fréquente de ses personnels.

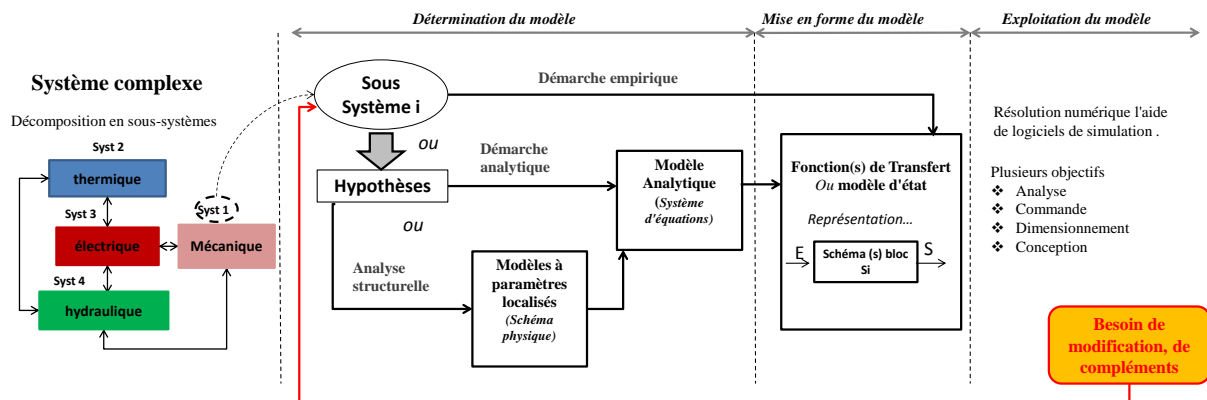


Figure II.1 - Approche de modélisation par fonctions de transfert d'un système complexe

Cette première approche de modélisation peut être décrite comme une approche informationnelle car elle offre des informations sur les relations entre signaux d'entrée et signaux de sortie (par exemple entre un déplacement d'une entrée de commande et le déplacement de la sortie correspondante). Ce type d'approche donne une vision essentiellement mathématique du système [Dieterle - 2005] et induit une perte de la signification physique des paramètres dominants (gains statiques, pulsations de résonance, amortissements, ...) [Amerogen - 2003], et par conséquent une perte des liens de causalité et des transferts énergétiques entre les éléments du système. En effet, la représentation sous forme d'une fonction de transfert permet de décrire les liens d'action entre les éléments mais, les liens de réaction ne sont pas systématiquement pris en compte car ils ne correspondent pas toujours à l'une des fonctions principales recherchées pour le sous-système considéré. Pour cette raison, des ingénieurs travaillant dans des disciplines différentes et pour des objectifs de conception et de structuration de commande de systèmes complexes multiphysiques ont besoin de représentations complémentaires à l'approche de modélisation présentée ci-dessus : une représentation qui permette de préserver le lien avec les paramètres physiques du système, se basant sur un langage de description énergétique unifié dans tous les domaines de la physique, et donnant ainsi une lisibilité structurelle du système et une visibilité sur les transferts de puissance entre éléments [Borutzky - 2009].

Dans ce contexte, des outils de représentation multiphysique ont été développés. Ils correspondent à une étape intermédiaire entre le schéma physique ou

le modèle mathématique et l'étape de simulation numérique. Ils sont construits selon une approche systématique et unifiante basée sur la notion de causalité et la représentation des fonctions énergétiques [Dauphin - 1999 ; Bouscayrol - 2003]. Ils permettent ainsi une organisation de modèles, sous forme graphique, décrivant le comportement dynamique tout en mettant en évidence les couplages et les transferts d'énergie entre les éléments du système.

Ils sont choisis selon l'objectif pour :

- faciliter l'analyse ou, si nécessaire, la modification du modèle en cas de besoin,
- réaliser la conception ou l'amélioration de la commande ;
- guider le concepteur et faciliter la communication entre des ingénieurs de disciplines différentes.

La seconde approche de modélisation peut être définie comme complémentaire à la première en incluant une étape intermédiaire de représentation graphique multiphysique (Figure II.2). Cette représentation, issue d'une analyse structurelle, permet de conserver la structure du système modélisé et de garder la traçabilité des hypothèses choisies. Elle facilite ainsi le retour sur ces éléments en cas de besoin de modification du modèle ou d'ajout de nouveaux éléments.

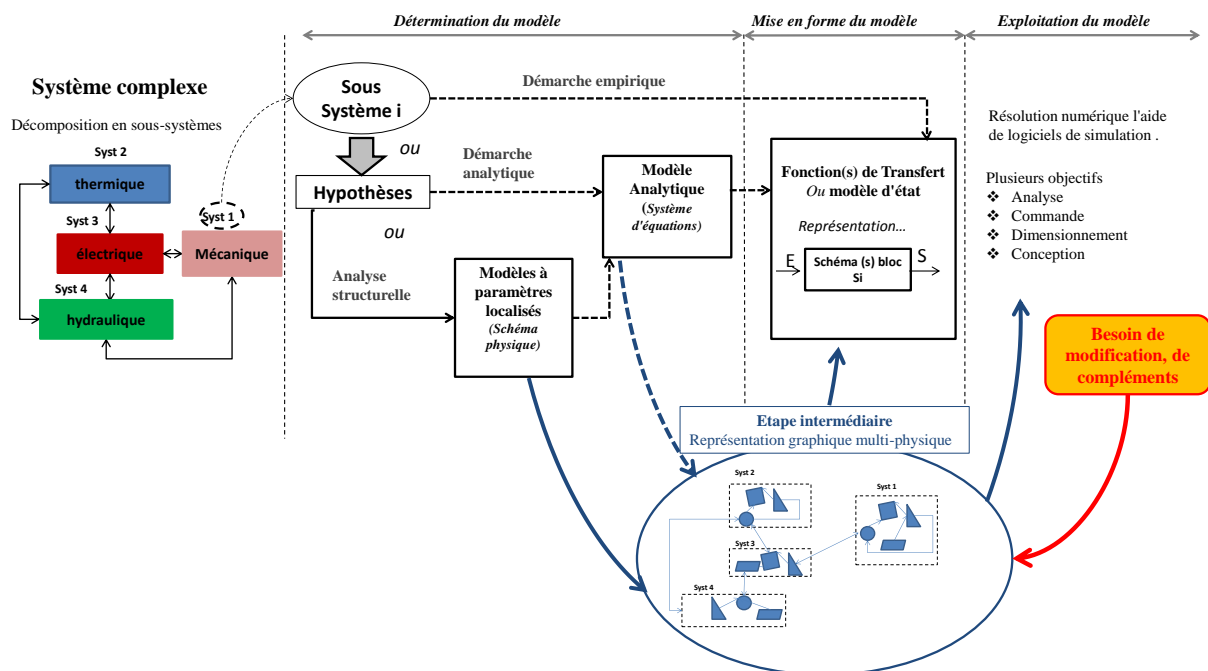


Figure II.2 - Approche de modélisation multiphysique de systèmes complexes

II.1.2. Quels outils de représentation pour l'hélicoptère ?

Les outils de représentation multiphysique (Figure II.3) ont été développés depuis les années 50 pour des objectifs différents, mais ont néanmoins tous un point commun : par définition, ils utilisent un langage unifié pour tous les domaines de la physique [Gomand - 2008].

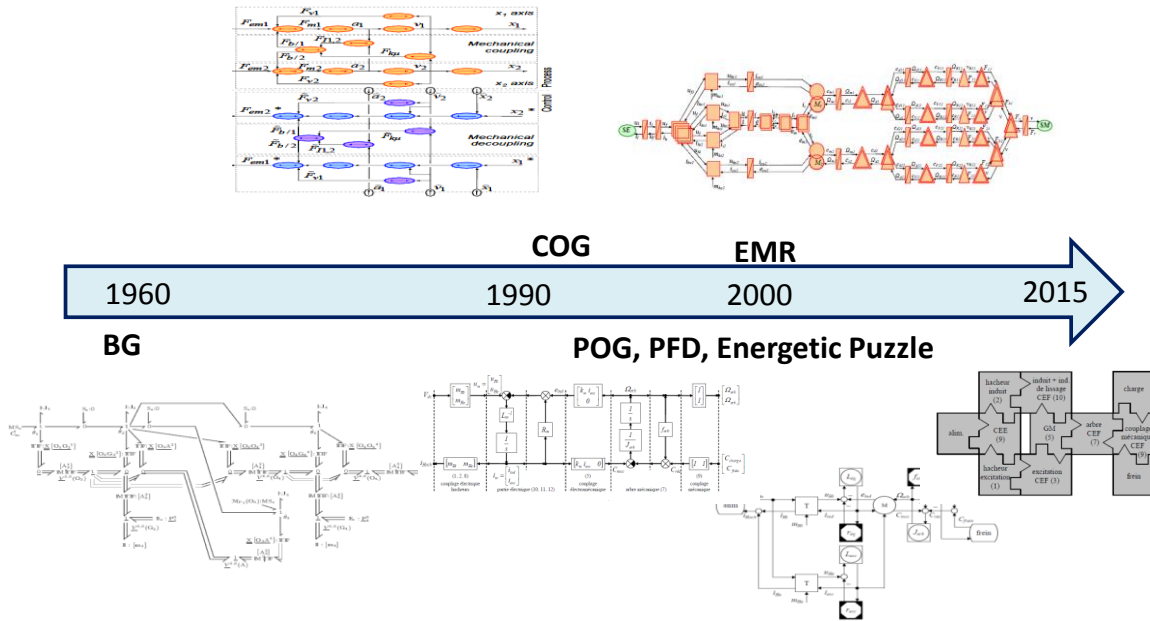


Figure II.3 - Les outils de représentation multiphysique

Dans cette partie, nous présentons un bilan des outils de représentation multiphysique existants. S'il existe plusieurs travaux [Gomand - 2008 ; Lhomme - 2007 ; Lhomme - 2008] dans lesquels les auteurs présentent et comparent ces outils dans l'objectif de positionner un outil présélectionné pour l'étude parmi d'autres outils aux caractéristiques plus ou moins similaires, l'objectif ici est différent : il s'agit de les présenter tout en mettant en évidence les avantages et/ou les limites par rapport à nos besoins qui ont été présentés dans le premier chapitre.

Les critères de choix sont ainsi définis en fonction des objectifs autour de l'application des systèmes complexes tels que l'hélicoptère. Nous recherchons des outils qui permettent :

- une représentation multiniveau ;
- de supporter la modélisation (méthode) ;
- la structuration de la commande ;
- la représentation des systèmes multidimensionnels.

II.1.3. *Le bond graph et le multibond graph*

Le bond graph a été développé au début des années 1960 au Massachusetts Institute of Technology (MIT) pour la conception et la modélisation des systèmes de puissance [Karnopp - 2000 ; Paytner - 1961]. Dans un modèle bond graph (BG), le flux énergétique entre deux éléments est décrit par une connexion bidirectionnelle (demi-flèche), appelée "bond", portant les deux variables de puissance (effort et flux). Le langage BG définit des éléments spécifiques qui correspondent aux principaux processus énergétiques [Dauphin - 2000]. L'ensemble de ces éléments est présenté dans l'Annexe A.

Dans la méthodologie BG, la première étape consiste en une analyse fonctionnelle du système pour obtenir un BG à mots. Il s'agit d'une décomposition du système en sous-systèmes et de la définition de leurs différentes interactions entre eux [Dauphin - 2000]. Ensuite, une analyse phénoménologique est effectuée, c'est-à-dire une description détaillée de chaque sous-système (basée sur les phénomènes physiques de transformation de puissance entre les éléments du sous-système), ce qui ramène à un modèle BG plus détaillé. Finalement, une analyse causale (affectation de la causalité) est faite et permet d'obtenir un modèle BG causal. Il s'agit de montrer le lien de cause à effet entre les variables. Lorsqu'il s'agit d'éléments accumulateurs d'énergie, la causalité peut être représentée sous une forme dérivée ou une forme intégrale. Cependant, à un instant t donné si l'intégrale d'un signal $u(t)$ peut être connue avec précision en ne faisant appel qu'à son évolution passée et présente (Figure II.4.a), la dérivation de ce signal à ce même instant nécessite la connaissance de son évolution future (Figure II.4.b). Or, l'évolution de toute grandeur physique ne peut être que la conséquence d'événements passés ou présents. Ainsi, l'opération de dérivation n'est qu'un concept mathématique et se trouve être impropre à la description naturelle d'un processus d'accumulation. Le lien naturel de causalité entrée-sortie d'un processus accumulateur ne peut donc être que de type intégral [Gomand - 2008].

Dans la méthode BG, l'affectation de la causalité se fait en s'appuyant sur une procédure et en respectant des règles spécifiques [Borutzky - 2009 ; Dauphin - 1999] (Annexe A). Pour cela, la causalité intégrale est préférentielle, mais dans certains cas, des conflits de causalité apparaissent et par conséquent des éléments accumulateurs doivent être représentés en causalité dérivée. En fonction des hypothèses de modélisation choisies lors de l'analyse structurelle, l'utilisation de la causalité dérivée est parfois rendue nécessaire. Un exemple est donné dans [Dauphin - 2000] sur la base d'un système mécanique.

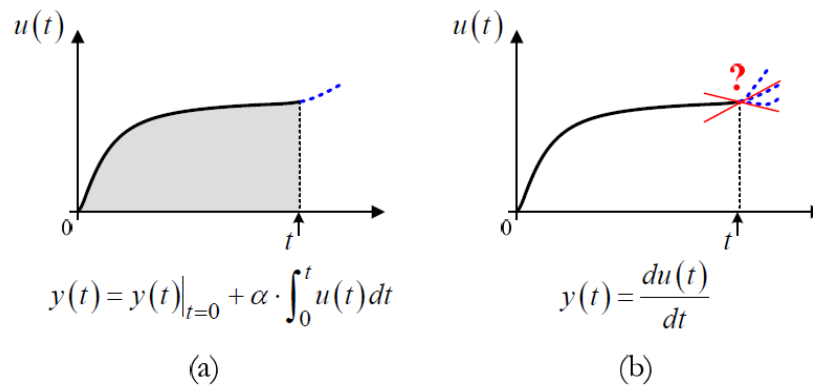


Figure II.4 - Illustration des concepts de causalité [Gomand - 2008] intégrale (a) et dérivée (b)

A partir du BG, la représentation d'état du système est déterminée et la commande globale est élaborée par la suite. Un modèle BG peut également être utilisé pour déterminer un modèle inverse à l'aide d'un BG dit "bicausal" [Fotsu - 1996] afin de générer un signal de commande à partir d'un objectif de trajectoire de sortie. [Junco - 2002] en donne un exemple d'application.

L'outil BG, en utilisant le BG à mots en première approche, offre la possibilité de passer d'une description macroscopique vers une représentation de plus en plus détaillée selon l'objectif. Il permet ainsi de répondre en partie au besoin d'une représentation multiniveau. De plus, il offre des méthodes d'analyse des propriétés structurelles comme la commandabilité et l'observabilité, nécessaires préalablement à l'établissement de lois de commande. Ces techniques sont basées sur une analyse graphique, utilisant les concepts de causalité et de chemins et boucles causaux [Dauphin - 2000 ; Borutzky - 2010]. Un autre point intéressant de l'outil BG se situe au niveau de l'existence de logiciels spécifiques pour la construction, la simulation et l'analyse de modèles. On citera par exemple 20-sim [20-sim - 2013].

Applications industrielles du BG :

Le BG est utilisé dans différentes applications industrielles, principalement dans le domaine automobile (par exemple pour la modélisation et la commande de boîtes de vitesses automatiques [Dauphin - 1999], de suspensions de voiture [Margolis - 2000], etc.), mais aussi dans le domaine de l'aéronautique (par exemple pour la modélisation, la commande et le dimensionnement d'une gouverne d'aileron d'un avion) et dans le domaine des énergies renouvelables. Toutefois, le BG avec une forme monodimensionnelle semble insuffisant pour aborder la modélisation des hélicoptères, plus complexe que les systèmes de transport terrestre (Chapitre I.3.2). La différence figure dans la difficulté de simplifier l'aspect multidimensionnel à un

cas monodimensionnel pour l'étude du système. En effet, l'utilisation de la représentation BG sur un tel système multicorps complexe est possible, mais elle conduit à un graphe complexe et peu lisible, ce qui réduit les avantages méthodologiques recherchés.

Le BG a été développé au début avec une forme scalaire, c'est-à-dire avec des liens monodimensionnels entre les éléments, représentés par des demies flèches simples (bonds), associés à deux variables scalaires de puissance (variable d'effort "e" et de flux "f"). Plus tard, cette méthode a été étendue à une forme vectorielle, appelée "multibond graphs" (MBG), pour traiter les systèmes multicorps. Dans la forme vectorielle, les liens simples sont remplacés par des multiliens, représentés par des flèches en trait double, portant des vecteurs de flux (\vec{f}) et d'efforts (\vec{e}). En effet, la méthode BG avec une forme scalaire présentée précédemment, peut être appliquée aux systèmes multicorps. Cependant, pour des systèmes complexes, une telle représentation devient vite très compliquée pour rester utile, et son aptitude à offrir une vision structurelle globale du système est perdue. Par exemple, [Zhao - 2012] propose un modèle BG scalaire d'un système multidisciplinaire non linéaire impliquant la dynamique d'un système multicorps, d'un actionneur hydraulique et d'un contrôleur électronique. Par souci de clarté et d'efficacité, les auteurs entendent, dans leurs travaux futurs, convertir le modèle BG scalaire en une représentation BG vectorielle MBG.

La méthodologie MBG peut être définie comme une extension du BG Scalaire classique. La notation multibond a été introduite dans [Bonderson - 1975], et a été améliorée ensuite par [Breedveld - 1985]. Dans cette dernière notation, les "bonds" sont étendus à des "multibonds" représentant les vecteurs d'effort et de flux, et les composants scalaires élémentaires (dissipations, accumulations, etc.) représentant les processus physiques fondamentaux sont étendus aux éléments multiports correspondants (Annexe A). Finalement, Tierneho et Bos proposent une approche systémique pour la représentation d'un solide en mouvement basée sur les équations de Newton-Euler [Tierneho - 1985]. Dans ce contexte, dans [Borutzky - 2010], l'auteur donne un bref historique de l'évolution de la méthode MBG. Ensuite, il décrit une librairie du multibond graph dans laquelle il présente l'approche de représentation systémique des solides en mouvement (à partir de [Tierneho - 1985]) et des différents types de liaisons mécaniques. La méthode est illustrée par l'exemple d'un pendule, montrant la mise en œuvre d'une représentation MBG d'un solide en mouvement associé à une liaison pivot.

Plusieurs autres personnes ont travaillé sur la représentation BG des systèmes multicorps. Dans [Marquis - 1997], l'auteur présente une synthèse bibliographique de ces travaux et les classe en deux approches : une première approche analytique-graphique de Karnopp et Rosenberg, qui nécessite un développement analytique avant la construction du graphe, et une seconde approche plus générique qui correspond à la méthode MBG de Tiernego et Bos présentée précédemment. Ensuite, il propose une amélioration de la deuxième méthode MBG qu'il nomme "représentation bond graph privilégiée des systèmes mécaniques multicorps", qui permet d'appréhender au mieux les systèmes mécaniques cinématiquement bouclés. L'auteur appuie ses travaux par la représentation de plusieurs exemples de systèmes mécaniques multicorps (Robots, Pendule, machine à former, etc.).

L'hélicoptère est un système multicorps qui se déplace selon six degrés de liberté et l'utilisation d'une représentation multicorps est donc nécessaire. L'élaboration d'un modèle analytique prenant en compte la dynamique mécanique multicorps dans l'hélicoptère du point de vue global est une tâche complexe et n'est pas pratique lorsqu'il s'agit de manipuler ou modifier le modèle d'un tel système complexe. La deuxième approche MBG est donc plus intéressante, en offrant une procédure de construction systémique et générique des systèmes mécaniques multicorps et multidimensionnels. De même que pour le BG scalaire, un autre avantage de cette méthode figure dans l'existence d'outil spécifique, 20-sim, pour la structuration, la simulation et l'analyse des causalités. Dans la représentation MBG et lors de l'affectation de causalité, un trait de causalité est affecté pour les trois dimensions portées par un lien (multibond), ce qui a pour conséquence l'apparition plus fréquente d'éléments en causalité dérivée et de boucles algébriques. Des méthodes d'intégration ont été développées dans le logiciel 20-sim, permettant de traiter ces problèmes [Behzadjpour - 2006 ; Cacho - 2000].

Applications industrielles du MBG :

Plusieurs travaux de recherche montrent des applications et les avantages du multibond graph (MBG) pour différents objectifs. Borutzky [Borutzky - 2010] présente une brève étude du MBG incluant des références aux applications MBG, spécialement en industrie robotique et automobile. Quelques travaux récents peuvent être cités, par exemple :

- dans [Silva - 2010], les auteurs proposent une modélisation de la dynamique d'un véhicule électrique pour faciliter l'analyse et la compréhension du comportement dynamique ;

- dans [Vaz - 2004], les auteurs proposent une application du bond graph vectoriel à la modélisation d'une classe de prothèses de main.

Le multibond graph a aussi été appliqué à quelques applications intéressantes dans le domaine de l'aéronautique.

- Dans [Raju - 2010], les auteurs proposent un modèle de la dynamique d'un hélicoptère "quad-rotor" représenté en BG et en MBG. Ils présentent un modèle instable en boucle ouverte et proposent des contrôleurs en boucle fermée pour assurer la stabilisation de l'aéronef. Le quad-rotor est par la suite contrôlé à partir d'une position initiale de roulis, de tangage, de lacet et d'altitude, jusqu'à un état d'équilibre désiré. Dans cet article, le BG et le MBG ont été choisis pour faciliter la construction du modèle.
- Dans [Martinez - 2010], un modèle MBG d'un dispositif de positionnement d'une antenne de radar montée sur un avion de chasse est proposé. Le système étudié est composé de deux corps rigides et l'antenne, reliés par un joint de cardan. Les mouvements d'azimut et d'élévation de l'antenne sont contrôlés par des servocommandes. Le MBG a été appliqué à ce système pour sa capacité à intégrer différents domaines physiques (électrique, mécanique et système de commande) avec plusieurs degrés de liberté.

Les deux derniers exemples illustrent les avantages du MBG au travers d'applications aéronautiques. Le premier exemple considère l'aéronef comme un unique solide rigide en mouvement dont la position est contrôlée par quatre forces générées par les rotors. Le deuxième exemple expose un système plus complexe, représentant l'association de plusieurs sous-systèmes de différents domaines physiques. Comme exposé au chapitre précédent, le cas des hélicoptères des grands industriels est considéré comme différent de ces applications. La différence figure ici dans la difficulté de simplifier le modèle du système pour le ramener à un seul solide en mouvement. En effet si cette hypothèse de modélisation peut être suffisante dans le cas d'un drone tel que le "quadrotor" mentionné précédemment, elle n'est généralement pas adaptée aux hélicoptères, plus complexes et pour lesquels un nombre important de sous-systèmes et leurs interactions doivent être considérés. Par conséquent, l'utilisation du MBG dans le domaine aéronautique, nous laisse espérer une application intéressante aux les hélicoptères des grands industriels.

II.1.4. Le POG, le PFD et le Puzzle Energétique

D'autres outils de représentation énergétique ont été développés à la fin des années 90 : le Power Flow Diagram (PFD), le Puzzle Energétique et le Power Oriented Graph (POG). Ces formalismes permettent aussi de structurer les modèles en mettant en évidence les transferts de puissance, chacun avec une description graphique différente afin de mettre en évidence des caractéristiques particulières du système. Dans [Lhomme - 2007], l'auteur s'appuie sur un exemple de système électromécanique pour comparer ces outils par rapport au BG. Quelques points de cette étude sont retenus :

- Le POG met en évidence les flux énergétiques échangés entre les composants en utilisant une représentation vectorielle. L'utilisation de la causalité intégrale dans ce cas est préférentielle voire quasi-exclusive.
- Le PFD représente des flux de puissance en utilisant un lien pour chaque variable (de flux et d'effort). Cette représentation, riche en détails, facilite le calcul du rendement énergétique du système car les éléments dissipatifs sont mis en évidence. Ce point ne peut cependant pas être retenu comme spécificité de l'outil dans la mesure où les éléments "R" du BG offrent la même possibilité. L'utilisation de la causalité intégrale est exclusive pour le PFD.
- le Puzzle Energétique a été développé pour la conception des structures de conversion d'énergie dans le domaine du génie électrique. Il met en évidence les flux de puissance en utilisant un symbole pour la variable de flux et un symbole pour la variable d'effort. L'utilisation de la causalité intégrale est exclusive pour ce formalisme.

Chacun de ces formalismes met en évidence certaines propriétés physiques des systèmes, mais ils présentent tous des caractéristiques similaires au BG et restent limités par rapport à ce dernier, notamment du point de vue logiciel de simulation. De plus, aucune méthodologie permettant de concevoir l'architecture de commande n'a été développée en association avec ces formalismes. Ces outils (POG, PFD et Puzzles Energétique) ne seront pas retenus car l'objectif global des travaux consiste à apporter une meilleure compréhension du comportement dynamique du système, mais aussi de meilleures solutions de conception de commande.

II.1.5. *Le GIC et la REM*

Dans les années 90, et plus tard dans les années 2000, d'autres outils ont été développés au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de puissance de Lille (L2EP) pour répondre à un besoin de représentation causale physique dans le but de structurer la commande des systèmes [Hautier - 1999].

Tout d'abord, le Graphe Informationnel Causal (GIC) a été proposé pour organiser les variables énergétiques d'un assemblage d'objets dont on possède la connaissance fonctionnelle au sens énergétique, tout en respectant la causalité intégrale. Ces objets peuvent avoir différentes fonctions énergétiques : dissipation, accumulation, transformation ou conversion. Les entrées et sorties de chaque objet sont définies en fonction de sa propre causalité (interne) et aussi en fonction de la causalité fixée par les objets environnants auxquels il est associé (causalité externe). Grâce à ce respect de la causalité intégrale, le GIC donne une description du système tout en localisant les éléments accumulateurs, ce qui facilite la structuration de la commande en se basant sur des principes d'inversion directe et indirecte [Barre - 2006]. Cependant, ce formalisme reste limité par rapport à nos besoins car il correspond à une représentation de type signal et ne fait donc pas apparaître explicitement les transferts de puissances entre les éléments du système. Pour cette raison ce formalisme ne sera pas retenu.

Ensuite, un deuxième outil a été développé sur la base du GIC, suivant le même principe de représentation causale : la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Bouscayrol - 2003]. La REM permet d'organiser les éléments du système de façon à faire apparaître explicitement les transferts de puissance en réunissant les variables de flux et d'effort à la manière du bond graph, tout en imposant le respect de la causalité intégrale naturelle, à la manière du GIC, pour faciliter la structuration de la commande par inversion [Bouscayrol - 2000].

Applications industrielles de la REM :

Cet outil a été exploité pour différentes applications industrielles, telles que le métro Val206 [Verhille - 2007], pour mettre en relief les divers couplages (électriques, magnétiques, mécaniques) et les phénomènes non-linéaire (jeux mécaniques, contact roue-sol) du système. La REM est également utilisée pour la structuration de commande de divers autres systèmes : dans le domaine de l'automobile et plus particulièrement des véhicules électriques et hybrides [Lhomme - 2005 ; Letrouve - 2009], dans le domaine des énergies renouvelables pour la gestion et la commande d'éoliennes [Bouscayrol - 2002 ; Bouscayrol - 2005], de panneaux

photovoltaïques ou encore de piles à combustible [Boulon - 2010]. Toutefois, elle n'a jamais été appliquée à l'hélicoptère. Le point commun principal qui ressort de ces différents travaux consiste en l'exploitation de techniques d'inversion de modèles causaux pour la structuration de la commande.

La REM est présentée comme un outil permettant une organisation des modèles causaux, dans le cas de systèmes assez complexes, pour la structuration de commande. Cet outil n'est pas le plus adapté pour une application à l'hélicoptère car il n'a pas été conçu pour la représentation des systèmes multicorps. Cependant, cet outil pourra être utilisé pour la définition de structures de commande de certains sous-systèmes de l'hélicoptère.

II.1.6. Conclusion sur le choix des outils

L'objectif global de ces travaux consiste à proposer une représentation énergétique et multiniveau, prenant en compte les interactions entre les divers sous-systèmes, et ce pour la maîtrise du comportement dynamique de l'hélicoptère, en termes de comportements non souhaités (par exemple les instabilités) ou de comportements souhaités (par exemple le contrôle de trajectoire).

Pour cela, à partir de l'étude effectuée sur les différents outils existants, nous commençons à avoir quelques éléments de réponse en termes d'outils et de méthodes. Ainsi, les outils qui ressortent le plus sont le bond graph, le multibond graph ainsi que la représentation énergétique macroscopique, et pourraient être exploités tel qu'illustré à la Figure II.5.

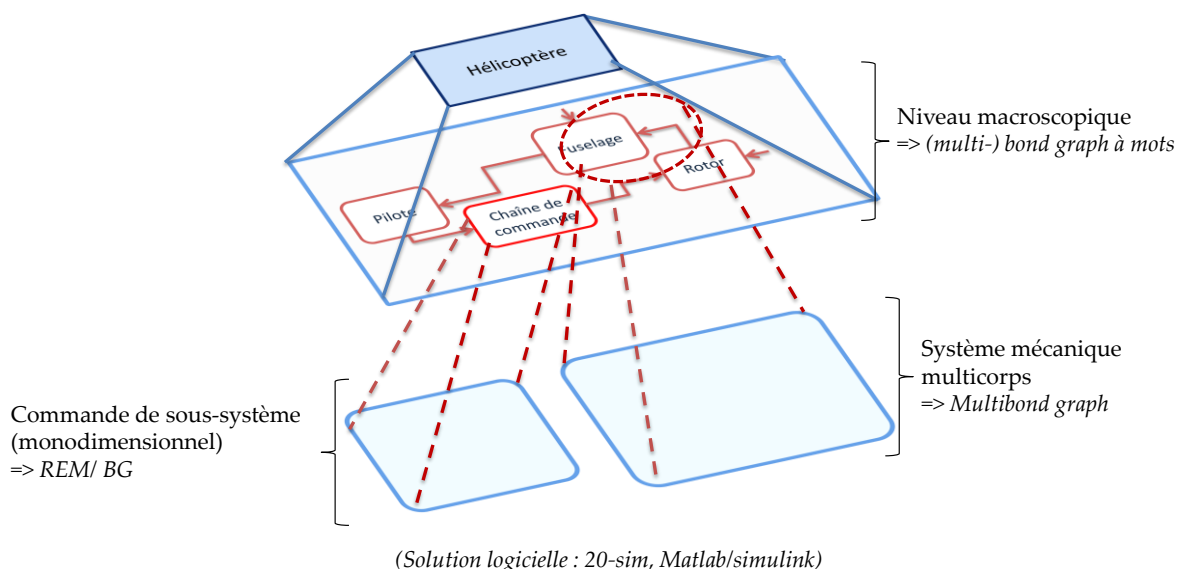


Figure II.5 - Des solutions d'outils et de logiciels existants

Le premier outil sélectionné est le BG. Il peut être utilisé pour répondre au besoin d'une représentation multiniveau en exploitant le BG à mots pour des descriptions macroscopiques. Cependant, pour considérer une modélisation globale de l'hélicoptère, le BG avec une forme monodimensionnelle semble insuffisant pour la représentation des parties importantes du système caractérisées par un aspect multidimensionnel difficile à simplifier. En effet, son utilisation serait possible mais conduirait à un graphe complexe, plus difficilement lisible et donc plus difficilement exploitable. Pour cette raison, notre intérêt s'est porté sur le multibond graph, une extension du BG monodimensionnel pour l'étude des systèmes multicorps. Le BG et le MBG correspondent ainsi à des descriptions graphiques génériques intéressantes pour supporter le développement du modèle global de l'hélicoptère, à partir des premières hypothèses choisies jusqu'à la simulation du comportement dynamique. De plus, le BG scalaire peut être utilisé pour traiter des problèmes liés à la conception de la commande sur la base d'analyses graphiques des propriétés structurelles [Dauphin - 2000 ; Borutzky - 2010]. Leur application au multibond graph pourra constituer une perspective intéressante pour l'analyse des phénomènes de couplage spécifiques à l'hélicoptère.

Le deuxième outil sélectionné est la REM. Il est choisi parce qu'il offre une démarche systématique pour la définition de structures de commande de systèmes. Ce dernier est néanmoins peu adapté à la représentation des systèmes complexes multicorps. Son exploitation est donc envisagée en tant qu'outil complémentaire au BG et au MBG, pour la commande de certains sous-systèmes.

Dans ce contexte, la partie suivante expose une première contribution de ces travaux de thèse qui consiste à proposer une démarche de modélisation et de commande d'un système multiphysique basée sur une exploitation complémentaire du bond graph et de la représentation énergétique macroscopique.

II.2. Complémentarité des deux outils BG et REM

Ces travaux de thèse se situent dans le cadre des activités de recherche du projet Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS). Une partie des travaux de l'équipe porte sur l'utilisation de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) [Bezivin - 2006] dans les processus de conception de produits, dont l'objectif est de faciliter la conception collaborative entre différents experts métier. Plus précisément, ces

travaux s'inscrivent dans une démarche fédérative du problème visant l'interopérabilité d'outils métiers basée sur les modèles [Iraqi - 2011].

L'interopérabilité signifie l'aptitude de plusieurs systèmes à communiquer, coopérer et échanger des données et services, malgré les différences dans les langages et les implémentations ou les niveaux d'abstraction [Wegner - 1996]. Elle peut être perçue selon trois points de vue selon [Paviot - 2010] :

- le premier consiste en une approche par intégration qui vise à proposer un modèle/outil unique qui intègre tous les concepts métiers ;
- le deuxième consiste en une approche unificatrice qui vise à proposer un modèle/outil permettant de lier les différents concepts métiers à travers des associations sémantiques et doit évoluer lors de la mise à jour de nouveaux concepts ;
- le troisième consiste en une approche fédérative visant à proposer une méthode qui permette d'associer plusieurs modèles/outils distincts dynamiquement en utilisant des transformations de modèles.

La troisième approche peut être considérée comme plus souple, plus flexible, car elle ne nécessite que des changements locaux lorsqu'il s'agit d'ajouter de nouveaux concepts. Pour cette raison, certains travaux de l'équipe ont été orientés vers cette approche et portent sur l'adaptation des techniques de modélisation au contexte de la conception des produits en fournissant des techniques pour réaliser l'interopérabilité des outils métiers entre les différents espaces techniques [Iraqi - 2011 ; Iraqi - 2012].

Ainsi, dans le contexte d'une démarche fédérative menée par l'équipe et à partir de l'étude des outils de représentation des systèmes dynamiques complexes (Chapitre II.1), nous nous sommes intéressés à la complémentarité entre le BG et la REM. L'originalité de l'étude que nous proposons consiste en l'exploitation des différences qui existent entre les deux outils. Tout d'abord le BG est utilisé en première approche pour établir une analyse structurelle du système et afin de répondre à la difficulté face à laquelle on se trouve parfois pour l'obtention d'un modèle à paramètres localisés équivalents. Ensuite, pour atteindre un objectif de structuration de commande, la REM est utilisée pour établir une commande par inversion.

Dans cette section, un sous-système de la chaîne de commande de vol d'un hélicoptère est utilisé comme exemple de support applicatif pour exposer la démarche proposée. La première partie est dédiée à la description du système étudié.

Dans la deuxième partie, nous présentons en quelques étapes l'utilisation complémentaire du BG et de la REM, sur la base de ce sous-système. Plus tard, on pourra envisager d'étendre cette méthode et l'appliquer à des sous-systèmes plus complexes de l'hélicoptère.

II.2.1. Présentation d'une chaîne de commande de vol d'hélicoptère

Sur les premiers hélicoptères et encore aujourd'hui sur les hélicoptères légers, les pilotes devaient contrôler les angles des pales du rotor à travers un ensemble d'éléments mécaniques, sans aucune assistance, afin de contrôler le comportement de l'appareil. Au fil du temps, des dispositifs complémentaires ont été installés dans le système de contrôle afin d'améliorer la sécurité, le confort, et les performances. Ces dispositifs, qui ont plusieurs fonctions, évitent entre autres au pilote d'avoir à fournir des efforts trop importants dans les manches de pilotage pour faire varier le pas des pales.

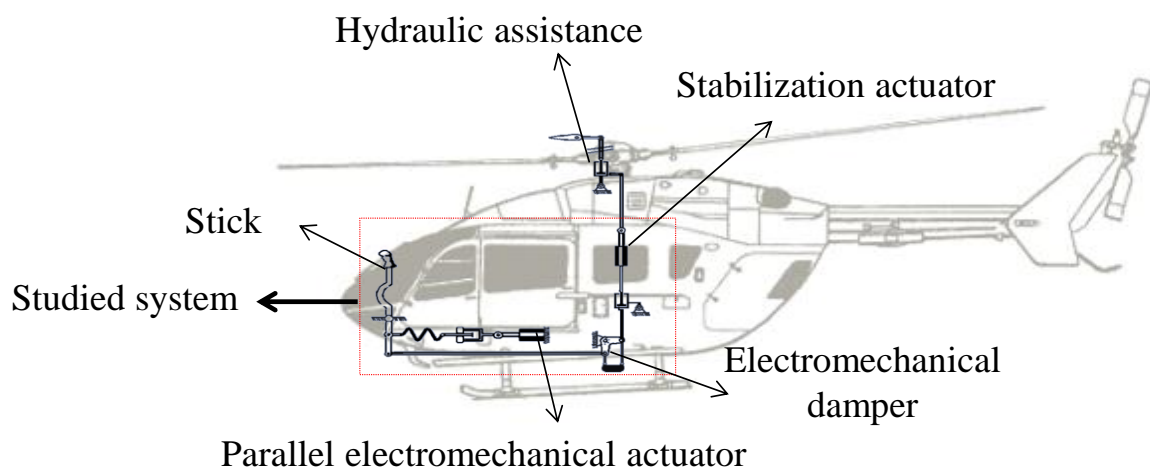


Figure II.6 - Système de commande d'un hélicoptère [Martin - 2011]

L'ensemble des dispositifs est appelé système de commande de vol d'hélicoptère [Martin - 2011 ; Krysinski - 2011]. Plusieurs axes sont pris en compte dans ce système (Figure II.6), correspondant aux axes de vol (roulis, tangage et lacet). Chaque axe est composé des mêmes éléments, qui ont plusieurs fonctions [Martin - 2011 ; Krysinski - 2011] :

- une servocommande (hydraulic assistance) est placée à l'extrémité de chaque axe et permet de fournir les efforts nécessaires pour l'orientation des pales ;

- un vérin de stabilisation est introduit pour permettre au pilote automatique (PA) de charger le pilote d'une partie de ses tâches de pilotage ;
- un actionneur électromécanique parallèle est utilisé pour créer un point d'ancrage des commandes de vol et constituer un point d'entrée au PA. L'actionneur est associé à un ressort physique calibré pour créer un retour d'effort au pilote au travers des manches ;
- un dispositif électromécanique est inséré sur chaque axe pour limiter la dynamique des commandes du pilote (electromechanical damper).

En plus de ces éléments, chaque axe est composé d'un ensemble de biellettes et de renvois d'angle.

L'application décrite dans cette section représente une partie du système de commande de vol d'un hélicoptère, allant du manche (stick) au vérin de stabilisation ("stabilization actuator"). Le système considéré est présenté dans la Figure II.6, et son caractère multiphysique est dû à la superposition, dans cette partie, des domaines mécanique et électrique. L'objectif est d'illustrer, au travers de ce sous-système multiphysique, l'intérêt de l'utilisation complémentaire du BG et de la REM pour la modélisation et l'analyse d'un tel système.

II.2.2. Utilisation complémentaire du BG et de la REM

Dans cette partie, l'approche de complémentarité entre le BG et la REM que nous proposons est expliquée. La première étape exploite la méthodologie BG pour faciliter la modélisation à partir d'une analyse structurelle, topologique, du système. La représentation énergétique macroscopique est ensuite utilisée pour faciliter la déduction des structures de contrôle. La démarche de complémentarité peut être résumée en quatre étapes principales, en prenant comme support applicatif la chaîne de commande de vol de l'hélicoptère :

- **Etape 1 : Modélisation structurelle à l'aide du BG**

La première étape consiste en une analyse physique structurelle et topologique du sous-système considéré. Il s'agit d'observer les différents composants le constituant et de proposer une décomposition en éléments simples qui correspondent aux éléments d'un modèle à paramètres localisés (exemples : masses, ressorts, inductances, résistances, ...) Cette analyse permet d'obtenir une première version d'hypothèses de modélisation, associées à un premier modèle dont une représentation est proposée par la Figure II.7.

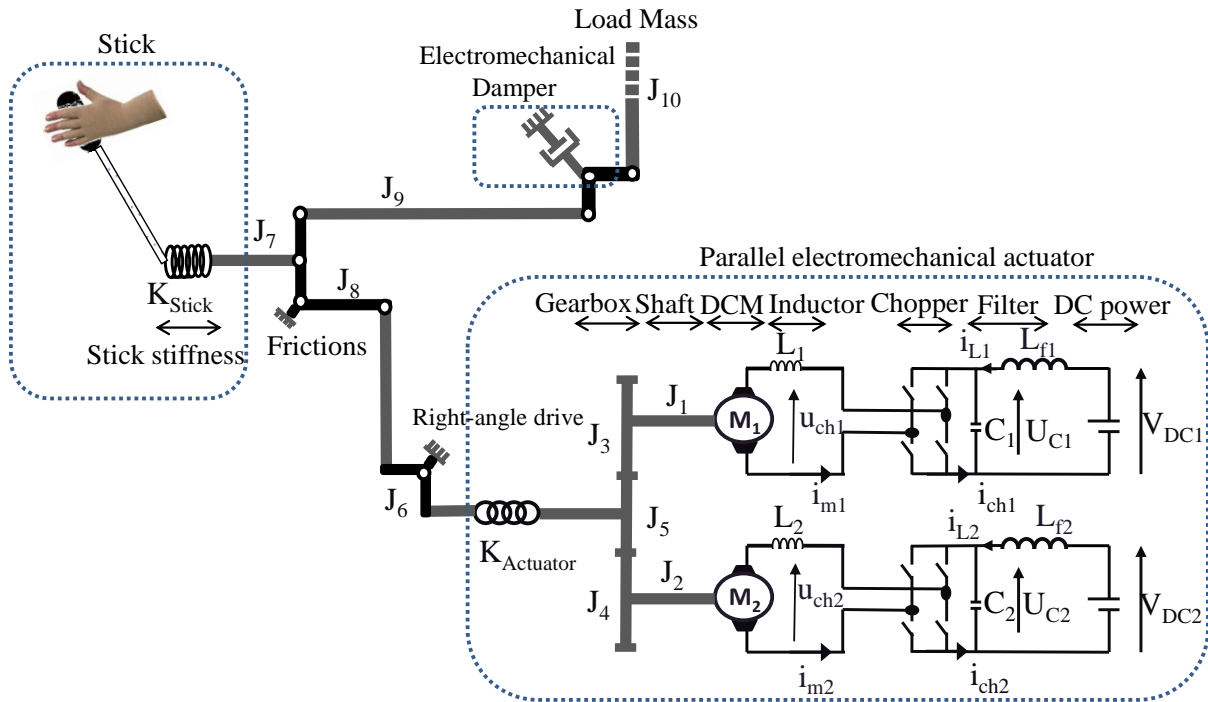


Figure II.7 - Modèle du sous-système "commande de vol"

Nous retrouvons sur le modèle du sous-système de commande de vol, les principaux éléments qui sont : le manche, l'actionneur électromécanique et l'amortisseur. Le sous-système est caractérisé par la superposition de deux domaines physiques (mécanique et électrique). Trois types de sources d'énergie peuvent être distinguées et correspondent aux frontières du sous-système considéré : des sources d'efforts électriques qui permettent d'alimenter les actionneurs électromécaniques, une source de flux mécanique qui représente le déplacement du manche par le pilote (hypothèse de modélisation en première approche), et une source d'effort mécanique modulée modélise l'élément électromécanique qui permet de limiter la dynamique des commandes du pilote.

Pour obtenir le modèle structurel de la Figure II.7, nous avons été amenés à poser un certain nombre d'hypothèses :

- en raison de contraintes liées à la sûreté de fonctionnement, l'alimentation électrique de ce sous-système est redondé. Les deux actionneurs synchrones à aimants permanents montés en parallèle sont alimentés par des sources indépendantes. Ces deux actionneurs, leur convertisseur d'électronique de puissance et leur commande rapprochée sont supposés équivalents à des moteurs à courant continu (Direct Current Motor, DCM) alimentés par des hacheurs (chopper). Pour chaque moteur et l'alimentation électrique associée,

deux inductances (une pour les enroulements du stator et l'autre pour le filtre) et un condensateur (pour le filtre) sont considérés ;

- les deux moteurs (DCM) permettent la conversion du domaine électrique au domaine mécanique ;
- du point de vue mécanique, les deux rotors des deux moteurs (DCM) sont couplés mécaniquement par un réducteur de vitesse et participent au contrôle de la chaîne de commande. Nous considérons que les arbres de transmission de ces composants sont rigides et nous les représentons par des inerties : les arbres des deux rotors sont représentés par J_1 et J_2 et celles des arbres du réducteur par J_3 , J_4 et J_5 . Accouplé au pignon du réducteur, un élément physiquement réalisé par un ressort est dimensionné pour générer un retour d'effort en fonction de la position du manche de pilotage. Par conséquent, cet élément est nécessairement représenté par sa raideur (K_{actuator}) et son inertie est supposée négligeable devant celle des autres composants. Le reste de la chaîne mécanique est constitué par le manche de pilotage et des bielles de transmission. Parmi ces éléments, de par leurs matériaux constitutifs et leurs dimensions, le manche est supposé apporter la principale contribution de souplesse. Un paramètre localisé de raideur est donc inséré en pied du manche dans le modèle, tandis que les éléments de bielles et de renvoi d'angle restants sont considérés comme rigides et sont modélisés par leur inertie (J_6 , J_7 , J_8 , J_9 et J_{10}).

A partir du modèle obtenu, nous établissons la représentation BG correspondante, présentée dans la Figure II.8 en quelques étapes :

- Placer les sources d'énergie Se_1 et Se_2 représentant les sources de tension des actionneurs électromécaniques, Sf représentant l'action du pilote sur le manche et MSe représentant l'amortisseur électromécanique.
- Placer les éléments de couplage correspondant aux jonctions à flux commun ('1') et à effort commun ('0'), tout en leur attachant les éléments d'accumulation (I, C) ou de dissipation (R) d'énergie correspondants. Les éléments I représentent les inductances des moteurs et des filtres de la partie électrique et les inerties des biellettes et arbres de transmission de la partie mécanique. Les éléments C représentent les condensateurs des filtres de la partie électriques et les raideurs du trim et du manche dans la chaîne mécanique. Finalement, les éléments R représentent les frottements visqueux des renvois d'angle présents dans la chaîne mécanique ;

- Placer les autres éléments de liaison permettant la conversion d'énergie, tels que les convertisseurs mono-physiques ('TF'), représentant les hacheurs dans la partie électrique, le réducteur de vitesse et les bras de levier dans la partie mécanique et les convertisseurs multiphysiques ('GY'), représentant les moteurs (DCM) ;
- Relier les différents éléments placés par des liens de puissance ("bonds").

Les différentes étapes présentées permettent d'établir le modèle BG acausal du sous-système, qui offre une vision topologique du système, en concordance avec les hypothèses choisies pour cette première approche de modélisation.

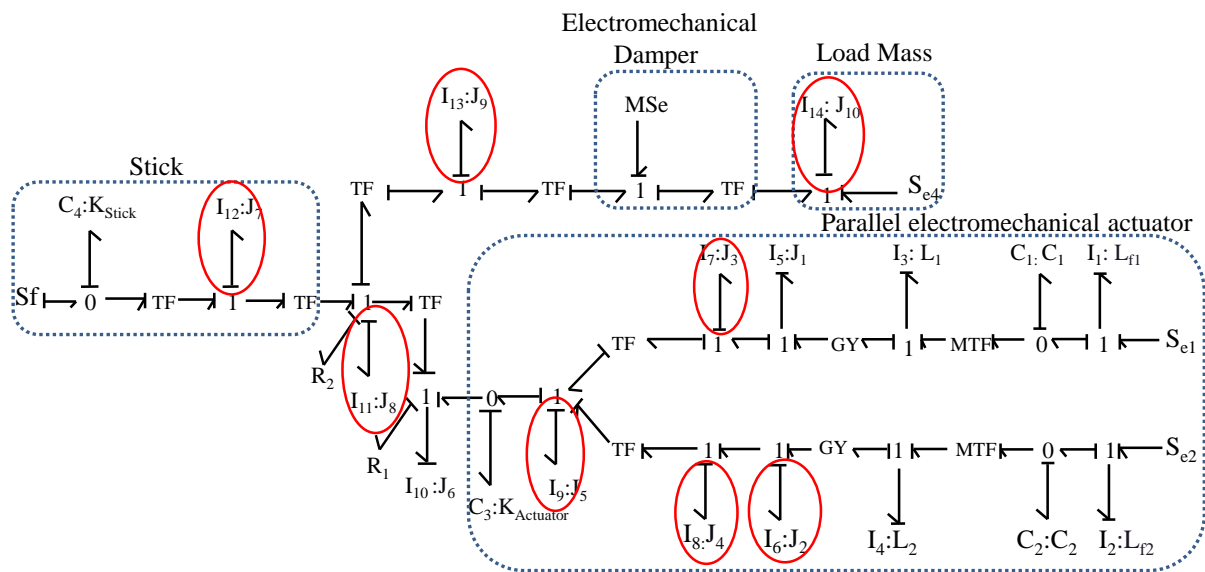


Figure II.8 - Modèle bond graph structurel d'une chaîne de commande de vol d'hélicoptère

L'étape suivante consiste en l'affectation des causalités en respectant des règles bien spécifiques [Borutzky - 2009 ; Dauphin - 2000] : l'utilisation de la causalité intégrale est préférée, mais en cas de conflits, des causalités dérivées doivent être affectées à certains éléments de stockage d'énergie (I et/ou C). Le bond graph obtenu est dit "causal" et est représenté par la Figure II.8. Les éléments de stockage encerclés, correspondent aux éléments pour lesquels la causalité dérivée a été nécessaire. Il est intéressant de noter que la solution de BG causal obtenue n'est pas unique. Cette dernière dépend de l'ordre dans lequel les causalités sont affectées. Cependant, ceci n'a pas d'incidence sur la procédure proposée.

- Etape 2 : D'un modèle structurel à un modèle fonctionnel énergétique

L'objectif principal de la méthode que nous proposons est de définir une structure de contrôle du système à travers les techniques d'inversion en utilisant la

REM. La méthode BG, en autorisant l'emploi de la causalité dérivée, permet de conserver le caractère structurel et topologique de la modélisation du système proposée en première analyse. En effet, cette approche structurelle implique généralement l'utilisation de plusieurs éléments en causalité dérivée dans le modèle. La causalité dérivée n'est cependant pas représentative d'un comportement physique naturel pour un élément de stockage d'énergie (Chapitre II.1.3) mais indique une dépendance (contrainte cinématique) vis-à-vis d'un autre élément de stockage de même nature et en causalité intégrale. La REM nécessite un modèle dans lequel la fonction énergétique de chaque élément de stockage est considérée, ce qui implique par conséquent de ne considérer que la causalité intégrale. Un tel modèle est défini comme un modèle fonctionnel énergétique (causal) [Delarue - 2003].

Cette étape nécessite de reprendre les hypothèses initialement établies dans l'objectif d'éliminer les causalités dérivées présentes dans le modèle structurel, et ainsi obtenir un modèle fonctionnel énergétique compatible avec une Représentation Énergétique Macroscopique. Cette démarche favorise donc une analyse a posteriori des hypothèses prises lors de la première approche de modélisation du système et, par conséquent, rend nécessaire une augmentation de l'expertise sur son comportement dynamique aux endroits mis en évidence par les éléments en causalité dérivée. Dans le cas du système étudié, les éléments en causalité dérivée correspondent à la juxtaposition de plusieurs éléments inertiels (I) considérés comme distincts, mais dont les vitesses sont cinématiquement interdépendantes. Cette interdépendance cinématique correspond à une liaison considérée comme rigide entre éléments inertiels, c'est-à-dire sans prise en compte d'une éventuelle raideur de transmission. Ainsi, des études supplémentaires, expérimentales et/ou théoriques (par exemple à l'aide de simulations numériques par éléments finis), doivent être menées pour augmenter les connaissances sur le comportement dynamique du système, spécialement en ce qui concerne les parties comportant des causalités dérivées.

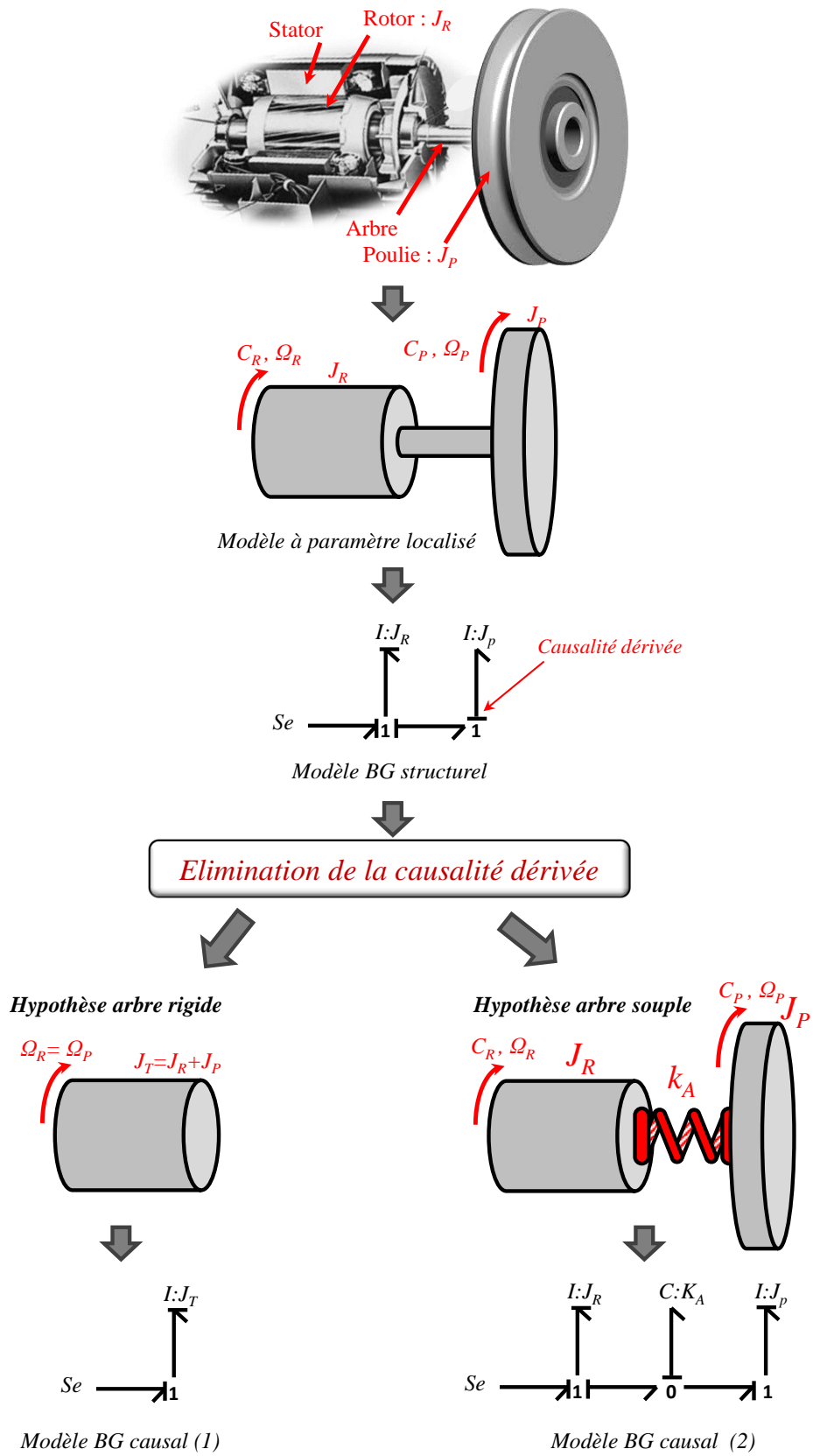


Figure II.9 – Retour sur les hypothèses de modélisation pour éliminer les causalités dérivées

Suite à ces études complémentaires et en fonction des objectifs fixés pour l'étude de modélisation, on distingue deux types de modification illustrés dans la Figure II.9. Ils sont utilisés pour éliminer les causalités dérivées et obtenir un modèle en causalité intégrale :

- Dans le cas où les études complémentaires conduisent à invalider les hypothèses initiales, la modification consiste à ajouter un paramètre localisé correspondant à un élément de stockage d'énergie. Cela entraîne une augmentation de l'ordre du modèle. Lorsque l'élément concerné par la causalité dérivée est un élément de stockage inertiel (I), le paramètre localisé supplémentaire correspond à un stockage capacitif (C). Dans le domaine mécanique, il s'agit de prendre en compte une raideur de transmission entre deux éléments inertiels. De cette manière, la raideur de transmission ainsi que l'inertie initialement en causalité dérivée peuvent être mises en causalité intégrale. Inversement, lorsque l'élément en causalité dérivée est de type capacitif (C), l'insertion d'un élément inertiel (I) est nécessaire.
- Dans le cas contraire, les études complémentaires conduisent à valider les hypothèses initiales de modélisation, et la modification consiste à concaténer des éléments de stockage d'énergie de même nature (inertiels ou capacitifs). Cela conduit à conserver l'ordre de la partie de modèle concernée. Lorsqu'il y a juxtaposition de plusieurs éléments de nature identique en causalité dérivée, il s'agit de les concaténer avec l'élément en causalité intégrale de même nature qui se situe à proximité de ces éléments.

La Figure II.10 montre le modèle bond graph en causalité intégrale obtenu après modification du modèle BG structurel initial (Figure II.8) du sous-système de la chaîne de commande. En se référant au système physique pour notre exemple, la souplesse des arbres de transmission concernés par les éléments en causalité dérivée est jugée négligeable par rapport aux autres raideurs de la chaîne (K_{actuator} et K_{stick}). Nous avons ainsi choisi de conserver l'ordre du modèle en ayant uniquement recours à des concaténations d'éléments inertiels.

A l'aide de ces modifications appliquées au modèle structurel, les éléments en causalité dérivée ont été éliminés de manière à assurer la compatibilité avec la REM. L'approche structurelle de modélisation du BG a permis une première approche topologique pour la modélisation du système et a conduit à une étude plus fine de modélisation, ciblée sur les éléments faisant intervenir une causalité dérivée.

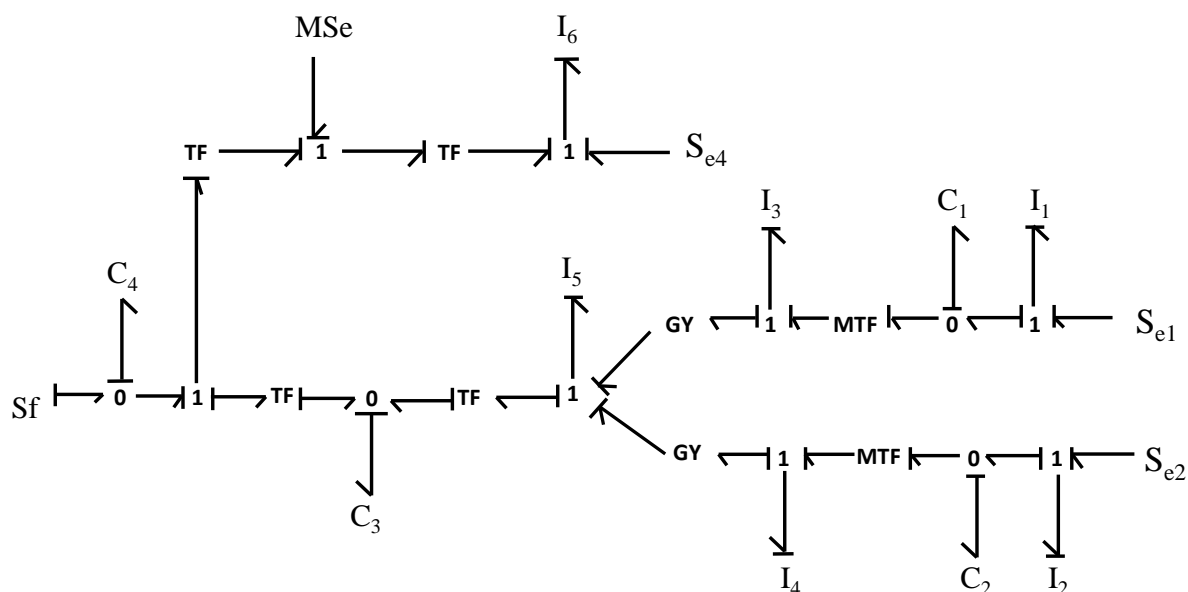


Figure II.10 - BG en causalité intégrale d'une chaîne de commande de vol d'hélicoptère

- Etape 3 : Transformation du BG à la REM

Finalement, le dernier modèle BG (en causalité intégrale) obtenu est transformé en représentation énergétique macroscopique (REM). La Figure II.11, montre la REM correspondante.

Les règles nécessaires à la systématisation de la transformation entre modèles BG et REM sont nécessaires et doivent être écrites. Cette problématique a été à l'origine d'un stage de Master Recherche [Vernay - 2012] visant à définir les règles de transformation entre les deux modèles en utilisant des concepts de l'Ingénierie Dirigée par les modèles [Bezivin - 2006]. Ce travail propose un métamodèle (i.e. un modèle qui définit le langage d'expression d'un modèle) pour chacun des deux outils BG et REM. Ces métamodèles servent ensuite de base à l'établissement d'une carte de correspondances pour permettre une transformation entre les deux modèles. Ainsi, les bases sont posées pour permettre de générer automatiquement un modèle REM à partir d'un modèle BG en causalité intégrale. L'implémentation est réalisée sous Eclipse Modeling Framework (EMF). La transformation est validée et analysée sur la base du sous-système de la chaîne de commande utilisé dans cette partie. Des éléments supplémentaires concernant les métamodèles du BG et de la REM, ainsi que l'établissement de la carte de correspondances entre les deux outils sont proposés en Annexe B.

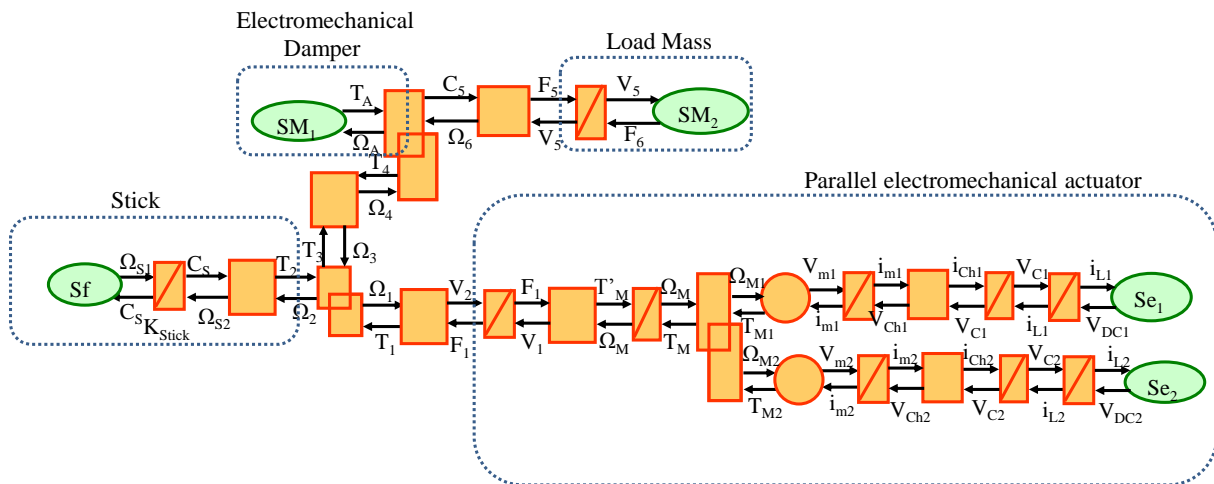


Figure II.11 - Représentation Énergétique Macroscopique d'une chaîne de commande de vol d'hélicoptère

La REM présentée dans la Figure II.11 offre une vision synthétique du système, représente la fonction énergétique de ses éléments et permet d'organiser les interconnexions entre les composants en respectant la causalité intégrale. Ces propriétés facilitent la conception de la commande [Delarue - 2003 ; Pierquin - 2002].

- **Etape 4 : Structuration de la commande par les techniques d'inversion**

Grace à cette approche de modélisation, une structure de contrôle peut être déduite en utilisant les techniques d'inversion. La commande par inversion permet l'inversion pas à pas des fonctionnalités de chaque composante du système, représentées par des processeurs élémentaires respectant la causalité intégrale [Hautier - 1999]. Ces principes d'inversion, comme mentionné dans la partie II.1.5, ont été développés à partir du GIC et de la REM par le L2EP [L2EP - 2013]. L'application de ces techniques, sur une chaîne de commande de vol d'un hélicoptère, pour la définition de structures de commande, est détaillée dans [Martin - 2013]. Cette étape n'est pas présentée dans ce mémoire.

Ces principes d'inversion, comme ils sont systématiques, peuvent être vus comme une nouvelle transformation du modèle du processus à celui de sa structure maximale de commande (SMC). De même, le passage de la SMC à une structure pratique de commande (SPC) fait appel à des règles métiers de l'automatique, de l'électronique et de l'économie (structure des correcteurs, choix du nombre et des technologies de capteurs, minimisation des coûts) que l'on pourrait également imaginer intégrer dans des règles de transformation.

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bilan des outils de représentation multiphysique existants, tout en nous référant à des objectifs de représentation qui tournent autour de l'application aux hélicoptères. Les outils retenus sont le bond graph et la représentation énergétique macroscopique.

Le premier semble être le plus complet à tous points de vue car il nous offre une représentation multiniveau, permet d'aborder les systèmes multicorps avec le multibond graph et est associé à des logiciels spécifiques. Les développements relativement récents visant à lui apporter des méthodes pour la structuration de la commande le rapprochent de la REM qui ressort essentiellement pour ce point. Cependant, l'objectif de cette étude n'est pas d'aboutir au choix d'un seul outil pour l'étude des hélicoptères, mais d'exploiter chacun pour ce pour quoi il est performant. L'outil REM reste plus adapté pour la commande. De plus son organisation et sa forme graphique simple en font un outil complémentaire au BG.

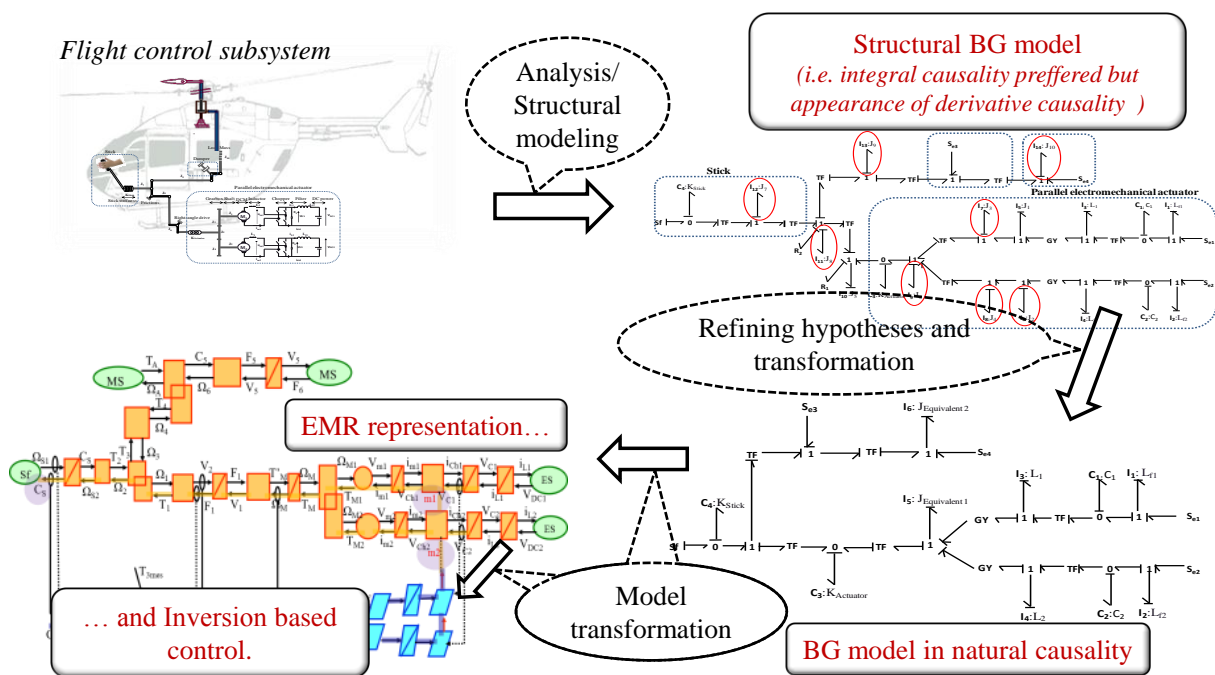


Figure II.12 - Utilisation complémentaire du BG et de la REM

Ainsi, une des contributions de ce travail a été d'exploiter les différences qui existent entre les deux outils pour en proposer un usage complémentaire dans un objectif d'aide à la modélisation et à la structuration de la commande tel que résumé par la Figure II.12 :

-
- la causalité intégrale préférentielle du BG permet de supporter l'activité de modélisation structurelle ;
 - l'approche fonctionnelle au sens énergétique de la REM, associée aux principes d'inversion, constitue une aide à la structuration de la commande.

Cette approche de complémentarité a été présentée au congrès ESDA 2012 de l'ASME [Chikhaoui - 2012].