

## *Synthèse des travaux réalisés*

---

Cette thèse constitue une première contribution aux travaux menés dans le cadre de la chaire industrielle "Dynamique des Systèmes Mécaniques complexes" de la fondation d'entreprise EADS, mise en place au centre d'Aix-en-Provence d'Arts et Métiers ParisTech, et ont été réalisés au sein de l'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS). Les activités de cette chaire industrielle concernent la problématique pluridisciplinaire que posent la conception, la modélisation et la commande de systèmes mécaniques complexes tels que les aéronefs de mission. Dans ce mémoire, nous définissons le contexte et les objectifs de la chaire, et nous proposons une première approche de représentation énergétique multiniveau de l'hélicoptère basée sur l'utilisation d'outils de représentation multiphysique. La synthèse suivante des travaux réalisés au cours de cette thèse concerne à la fois une étude menée sur les outils de représentation multiphysique et la modélisation des hélicoptères des grands industriels.

### *Synthèse des travaux réalisés*

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de préciser le contexte scientifique et industriel de la chaire, en montrant les verrous technologiques autour de deux thèmes. Le premier concerne le développement des liaisons intelligentes (actives et semi-actives) et le second concerne l'optimisation de la chaîne de commande de vol d'un hélicoptère (allant du pilote aux rotors). Les actions de recherche actuelles sur ces thèmes, se focalisent essentiellement sur la modélisation et la conception d'actionneurs (électriques, hydrauliques, hybrides, ...) et la définition d'algorithmes de commande (classiques et avancées).

L'expérience montre que ces actions, généralement définies de façon séparée, sont essentielles et performantes mais insuffisantes. Généralement, elles ne permettent pas une optimisation au niveau de la conception et de la commande du système. De plus, elles n'apportent pas de vision sur l'ensemble du système, qui prenne en compte la complexité des couplages. Cela peut conduire, pour le cas des hélicoptères, à l'apparition de phénomènes d'instabilité comme la résonance air, la résonance sol et les phénomènes de couplage entre pilote et hélicoptère ("rotorcraft pilot couplings"). Ils sont généralement dus à des couplages mal maîtrisés entre les sous-systèmes air, fuselage, rotors et système de commande.

C'est autour de ces verrous technologiques et de ces problèmes d'instabilité récurrents des hélicoptères que les activités de la chaire ont été définies. Par conséquent, les travaux de recherche associés sont centrés sur la modélisation et la maîtrise de la dynamique des systèmes mécaniques complexes, plus particulièrement des hélicoptères des grands industriels. Plusieurs critères permettent de définir la complexité de ces systèmes. Dans ce mémoire, nous avons principalement retenu, pour la modélisation, la complexité liée à la multiplicité de sous-systèmes en forte interaction et à l'aspect multiphysique du système. En première phase, une recherche sur les approches de modélisation existantes des aéronefs a été effectuée. Nous avons ainsi constaté qu'il existe dans la littérature un nombre important de travaux de recherche centrés sur la modélisation et la commande de drones. La modélisation de ce type d'hélicoptère correspond à une modélisation type boîte noire et l'aéronef est généralement considéré comme une unique masse rigide. Ces méthodes ne peuvent pas être appliquées sur les hélicoptères des poids lourds industriels car ils sont de composition beaucoup plus complexe et leur modélisation nécessite la prise en compte de plusieurs sous-systèmes.

Actuellement, les méthodes de modélisation des hélicoptères des grands industriels peuvent être qualifiées d'approches par sous-systèmes. Elles bénéficient d'une longue expérience et sont basées sur une concaténation de différentes approches (empiriques, analytiques, numériques, ...), en fonction de la nature du sous-système considéré. Il n'existe pas d'approche unifiée offrant une vision globale et structurelle sur la dynamique du système. Pour d'autres applications, principalement sur des systèmes de transport terrestre, ce type d'approches existe et utilise des outils de représentation multiphysique tels que le bond graph (BG) et la Représentation Energétique Macroscopique (REM). Certes, les hélicoptères demeurent plus complexes par leur aspect multidimensionnel difficile à simplifier,

mais ces études permettent d'espérer une application tout aussi intéressante au cas des hélicoptères.

C'est dans ce contexte qu'ont été fixés les objectifs de cette thèse. Le premier objectif, général et méthodologique, vise à proposer une représentation multiniveau qui soit la plus complète possible, laissant la possibilité d'aller d'un besoin global à l'intégration du comportement des composants. Le deuxième objectif consiste à analyser la potentialité des outils de représentation multiphysique pour l'étude de l'un des phénomènes d'instabilité.

Pour aborder ces objectifs, une réflexion sur les outils de représentation multiphysique est indispensable. Pour cette raison, une partie importante du deuxième chapitre a été consacrée au choix des outils présentant les meilleurs atouts pour une modélisation énergétique multiniveau d'hélicoptères. Deux outils ont été retenus de cette étude.

Le premier est le bond graph, car il permet une modélisation structurelle et peut être utilisé pour répondre au besoin d'une représentation multiniveau en exploitant le BG à mots pour les niveaux de description macroscopiques. De plus, il offre des méthodes d'analyse de propriétés structurelles, nécessaires préalablement à la définition des lois de commande. Cependant, le BG est plus fréquemment utilisé en application à des systèmes de transport terrestre, généralement associés à des problématiques qui peuvent être simplifiées en cas d'étude monodimensionnels. Pour le cas des systèmes à voilures tournantes, l'aspect multidimensionnel est difficile à simplifier et, par conséquent, cette représentation semble être insuffisante pour atteindre un objectif de description macroscopique et synthétique des systèmes. Face à cette difficulté, notre intérêt s'est porté sur le multibond graph (MBG). Il s'agit d'une extension du BG monodimensionnel développée pour l'étude des systèmes mécaniques multicorps. Cette méthode offre une approche de représentation systémique pour la description des solides en mouvement et des liaisons mécaniques.

Le deuxième outil sélectionné est la Représentation Énergétique Macroscopique. Cet outil propose une démarche systématique pour la structuration de la commande de systèmes, utilisant des techniques d'inversion de modèles causaux (principes d'inversions directe et indirecte). De plus, il permet une organisation des modèles avec une forme graphique relativement simple conduisant à des représentations légèrement plus macroscopiques que celles du BG simple.

Cette étude conclut au choix du BG car il permet une représentation multiniveau et une modélisation des parties multicorps, tandis que la REM a principalement été retenue pour la structuration de la commande.

A partir de cette étude approfondie des deux outils de représentation, nous avons proposé, en seconde partie du deuxième chapitre, une approche visant une exploitation complémentaire du BG et de la REM pour la modélisation et la commande des systèmes multiphysiques. Cette démarche de fédération de deux outils a été illustrée sur la base d'une chaîne de commande de vol d'hélicoptère et peut se résumer en quelques étapes. A partir d'un système physique existant ou en cours de conception, avec une expertise potentiellement faible, il est possible d'arriver à établir la structure de commande par inversion de ce système. Pour cela, l'utilisation d'un outil de description structurelle du système comme le BG, sert de support méthodologique à la construction d'un premier modèle structurel. Les hypothèses de modélisation prises en première approche peuvent conduire à l'utilisation de la causalité dérivée, autorisée avec le BG. Une deuxième étape consiste alors à revenir sur les hypothèses prises en ce qui concerne les éléments représentés en causalité dérivée. L'objectif est ici d'obtenir un modèle BG causal permettant d'envisager une transformation vers une représentation fonctionnelle au sens énergétique, sous la forme d'une REM. Finalement cette représentation du système est utilisée pour la déduction d'une structure de commande par inversion du système.

Dans le troisième chapitre, une analyse énergétique de l'hélicoptère, ayant pour principale préoccupation la représentation de la transmission de puissance dans le système, a été introduite. Nous avons pu proposer, à partir de cette analyse, une description macroscopique et énergétique de l'hélicoptère basée sur le BG à mots. Ensuite, nous avons analysé les différentes parties de cette description en montrant l'intérêt de décrire et modéliser certaines d'entre elles en détail. Il s'agit de voir pour chaque partie quel outil, parmi ceux retenus dans le deuxième chapitre, est le plus adapté et quels sont le ou les phénomènes d'instabilité qui sont concernés. Le BG et son extension, le MBG, ressortent majoritairement pour la représentation de ces parties et la REM pourra être utilisée pour la structuration de commande de sous-systèmes.

En se basant sur cette analyse, nous avons choisi, dans le cadre de la représentation multiniveau, de commencer par la représentation de la partie composée du rotor et du fuselage. Un modèle multibond graph associé à ces sous-systèmes est donc proposé. Dans le quatrième chapitre, les conditions aux limites du

modèle obtenu ont été adaptées pour reproduire le phénomène de RA. Ce dernier a été validé par une comparaison avec un modèle analytique préexistant et validé. Au travers d'un premier cas d'étude, l'apparition du phénomène de RA a été mise en évidence par simulation pour le cas d'un rotor articulé. Pour cela, les conditions de simulation ont été modifiées de manière à reproduire les conditions particulières d'une configuration de vol en virage serré, impliquant une forte conicité du rotor (angle de battement moyen sur un tour important) susceptible de conduire à l'apparition du phénomène de résonance air. Dans un deuxième cas d'étude, nous avons également reproduit les conditions d'apparition du phénomène de RA pour le cas d'un rotor rigide. Dans ce cas, l'apparition du phénomène est plutôt liée à un couplage naturel entre les modes de battement et de trainée de pales. Dans les deux cas d'étude, des paramètres de conception du rotor sont modifiés de manière à simuler différentes solutions de conception de rotors et vérifier que le modèle développé reproduit correctement l'apparition du phénomène pour les solutions théoriquement concernées.

## *V.2. Perspectives*

L'approche de représentation multiniveau de l'hélicoptère proposée dans ce document, apporte une vision globale et structurelle de la dynamique du système. Il s'agit des premiers travaux réalisés au sein du projet de la chaire industrielle. Ils permettent d'ouvrir de nombreuses perspectives pour la poursuite de travaux de recherche sur cette thématique de la maîtrise des systèmes mécaniques complexes tels que les hélicoptères.

La première perspective est dans la continuité d'une modélisation énergétique de l'hélicoptère. Elle consiste à faire évoluer la représentation obtenue dans ces travaux en l'incrémentant, tant par l'ajout de sous-systèmes que par l'augmentation de la précision de modélisation. En effet, les sous-systèmes modélisés lors de cette étude (rotor et fuselage) l'ont été en considérant des hypothèses simplificatrices fortes, notamment celle consistant à considérer l'ensemble des corps modélisés comme rigides. Ce modèle constitue néanmoins une base de travail pour les études ultérieures qui pourront par exemple prendre en compte les déformations principales des pales et du fuselage, susceptibles d'intervenir dans de nombreux phénomènes vibratoires. Pour ce qui concerne l'intégration de sous-systèmes supplémentaires, l'étape suivante consiste à ajouter la "brique" contenant les interactions avec le pilote. Pour cela, des études complémentaires ont été initiées

récemment dans cette optique d'étude des couplages entre pilote et hélicoptère [Tod - 2013]. La modélisation des couplages entre le pilote et les autres sous-systèmes (rotors et fuselage en première approche), n'est pas évidente. Ce qui rend ces couplages complexes, c'est la difficulté de prise en compte de l'aspect biomécanique et neuromusculaire du pilote. Pour aborder ces problématiques, les études engagées sont définies en quelques phases. Une première phase consiste en la recherche des pratiques de modélisation existantes des couplages pilote-aéronefs. Aujourd'hui, il a été constaté un manque de modèles de pilote et un manque de modèles de pilote-hélicoptère couplés. Une deuxième phase en cours de ces travaux consiste en la représentation énergétique du pilote en association avec la représentation du sous-système rotor-fuselage. Une troisième phase consiste en l'exploitation des représentations obtenues essentiellement pour l'étude du phénomène de couplage pilote-aéronef ("Rotorcraft Pilot Couplings"). Il serait intéressant par la suite d'incrémenter le modèle avec la représentation d'autres sous-systèmes (servocommandes, plateaux de commande, train d'atterrissage,...). Il s'agit de profiter des avantages de la description unifiée qu'offrent les outils de représentation utilisés dans ces travaux pour obtenir la représentation la plus complète possible. L'objectif n'est cependant pas d'obtenir un outil de simulation d'hélicoptères qui se substitue aux modèles et outils existants. Au contraire, ces développements ont pour objectif d'être complémentaires en apportant des méthodes d'organisation de modèle et d'analyse. Des couplages avec d'autres types de modèles et d'outils numériques seront donc probablement à envisager, par exemple pour prendre en compte certains couplages aérodynamiques.

D'autres perspectives consistent dans l'exploitation des représentations obtenues pour divers objectifs, par exemple :

- Les phénomènes d'instabilité pourront être étudiés sur la base d'une analyse graphique utilisant les concepts de chemins causaux et boucles causales. On pourra commencer à court terme à étudier la potentialité de ces méthodes sur le modèle rotor-fuselage et analyser le phénomène de résonance air. Il s'agit d'exploiter ces techniques graphiques pour estimer les dynamiques lentes et rapides du modèle et déterminer les modes de résonance à l'origine de l'instabilité ;
- L'étude de la sensibilité de systèmes, notamment actifs, aux incertitudes paramétriques (variation de masse, positions des centres de gravité,...) pourra être envisagée.

Les perspectives présentées précédemment consistent essentiellement dans l'évolution de la représentation multiniveau et dans l'exploitation des avantages des outils de représentation, dans un premier temps sur l'exemple de l'appareil étudié dans ce mémoire avant une extension à d'autres gammes d'hélicoptères, y compris des concepts innovants d'aéronefs. Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous avons proposé, dans un contexte de démarche fédérative, une approche de complémentarité entre les deux formalismes graphiques BG et REM. Une première perspective, dans la continuité de cette proposition, serait de l'étendre sur d'autres sous-systèmes plus complexes de l'hélicoptère ou autres applications et d'étudier la possibilité de l'appliquer sur des systèmes multidimensionnels. Une deuxième perspective concerne la transformation de modèles. En effet, la troisième étape de cette démarche de complémentarité a nécessité des études complémentaires pour définir les règles de transformations entre les deux modèles (BG et REM) (Annexe B), utilisant les concepts de l'ingénierie dirigée par les modèles (métamodélisation et transformation de modèles). Dans la procédure de la REM, il serait intéressant d'envisager, en se basant sur ces mêmes principes, l'établissement d'une transformation automatique entre le modèle du processus et celui de sa structure maximale de commande (SMC), et par la suite entre cette dernière et une structure pratique de commande (SPC) en prenant en compte un ensemble de "règles métiers".





---

## Références Bibliographiques

---

- [Amerongen - 2003] J. van Amerongen, P. Breedveld, "Modelling of Physical Systems for the Design and Control of Mechatronic Systems", *Annual Reviews in Control*, Volume 27, Issue 1, 2003, pp. 87-117, ISSN 1367-5788, 10.1016/S1367-5788(03)00010-5 .
- [Barre - 2006] P. J. Barre, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Dumetz, F. Giraud, J. P. Hautier, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, E. Semail, "Inversion-Based Control of Electromechanical Systems Using Causal Graphical Descriptions", *IEEE-IECON'06*, Paris, November 2006.
- [Basset - 2012] P.M. Basset, A. Tremolet, and al., "C.R.E.A.T.I.O.N. the onera multi-level rotorcraft concepts evaluation tool: the foundations", *AHS Future Vertical Lift Aircraft Design Conference*, San Fransisco, United States, 2012.
- [Behzadjpour - 2006] S. Behzadjpour, A. Khajepour, "Causality in vector bond graphs and its application to modeling of multi-body dynamic systems", *Simulation Modelling Practice and Theory* 14, pp. 279–295, 2006, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2005.06.001>.
- [Bezivin - 2006] J. Bezivin, "Model Driven Engineering: An Emerging Technical Space", *Lecture Notes in Computer Science*, pp 36-64, 2006, ISBN 978-3-540-46235-4.
- [Bonderson - 1975] L.S. Bonderson, "Vector bond graphs applied to one-dimensional distributed systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 75–82, 1975.
- [Borutzky - 2009] W. Borutzky, "Bond Graph Modelling and Simulation of Multidisciplinary Systems – An Introduction", *Journal of Simulation Modelling Practice and Theory*, Pages 3-21, 2009, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2007.08.008>.

- [Borutzky - 2010] W. Borutzky "Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models", Springer, 2010, ISBN: 1848828829 9781848828827.
- [Boulon - 2010] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, M. C. Péra, "From Modeling to Control of a PEM Fuel Cell Using Energetic Macroscopic Representation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, n°6, pp. 1882-1891, 2010.
- [Bouscayrol - 2000] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multimachine Multiconverter System: Application for Electromechanical Drives", European Physics Journal - Applied Physics, vol. 10, no. 2, pp. 131-147, May 2000.
- [Bouscayrol - 2002] A. Bouscayrol, P. Delarue, "Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator", International Journal of Renewable Energy Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 479-485, August 2002.
- [Bouscayrol - 2003] A. Bouscayrol, "Formalismes de représentation et de commande des systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs", Habilitation à Diriger des Recherches, L2EP, USTL, Déc. 2003, N° d'ordre H 405.
- [Bouscayrol - 2005] A. Bouscayrol, P. Delarue, X. Guillaud, "Power strategies for Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine", Renewable Energy, vol. 30, pp. 2273-2288, May 2005.
- [Bramwell - 1975] A. R. S. Bramwell "An Introduction to Helicopter Air Resonance", The City University, London, Reports and Memoranda No. 3777, September 1975, [naca.central.cranfield.ac.uk/reports/arc/rm/3777](http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/arc/rm/3777).
- [Breedveld - 1985] P.C. Breedveld." Multibond Graph Elements in Physical Systems" Journal of the Franklin Institute, vol. 319, no. 1-2, pp. 1-36, 1985, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032\(85\)90062-6](http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032(85)90062-6)
- [Cacho - 2000] R. Cacho, J. Felez, C. Vera, "Deriving simulation models from bond graphs with algebraic loops, The extension to multibond graph systems", Journal of the Franklin Institute, vol. 337, pp. 579-600, 2000, [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032\(00\)00025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032(00)00025-9).

- [Chikhaoui - 2012] Z. Chikhaoui, J. Gomand, F. Malburet, P. J. Barre "Complementary use of BG and EMR formalisms for multiphysics systems analysis and control", 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis International Conference (ASME – ESDA), Nantes, France, 2012, <http://dx.doi.org/10.1115/ESDA2012-82318>.
- [Chikhaoui - 2013] Z. Chikhaoui, J. Gomand, F. Malburet, M. D. Pavel, P. J. Barre, "Towards an energetic modeling of rotorcraft using Bond-Graphs", AHS International 69th Annual Forum, Phoenix Arizona, 2013.
- [Coleman - 1958] R. P. Coleman, A.M. Feingold, "Theory of Self-excited Mechanical oscillations of Rotors with Hinged Blades", NACA report 1351, 1958.
- [Combemale - 2008] B. Combemale, "Approche de modélisation pour la simulation et la vérification de modèle- Application à l'ingénierie des procédés", Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2008.
- [Dauphin - 2000] G. Dauphin-Tanguy, "Les bond graphs", Hermes Science Publication, Paris, 2000.
- [Dauphin - 1999] G. Dauphin-Tanguy, "Les Bond graphs et leur application en mécatronique", Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique Industrielle, 1999, Référence S 7222.
- [Delarue - 2003] Ph. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, G. Lancigu, "Modelling, Control and Simulation of an Overall Wind Energy Conversion System", Renewable Energy, vol. 28, no. 8, pp. 1159-1324, July 2003, [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00221-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00221-5).
- [Dieterle - 2005] W. Dieterle, "Mechatronic Systems: Automotive Applications and Modern Design Methodologies", Annual Reviews in Control, vol. 29, no. 2, pp. 273-277, 2005, <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2005.05.002>.
- [Donham - 1969] R. E. Donham, S. V. Cardinale, I. B. Sachs, "Ground and Air Resonance Characteristics of a Soft In-Plane Rigid-Rotor System", Journal of the American Helicopter Society, vol. 14, no. 4, pp. 33-41, 1 October 1969, <http://dx.doi.org/10.4050/JAHS.14.33>.
- [Fotsu - 1996] R. Fotsu-Ngwompo, S. Scavarda, D. Thomasset, "Inversion of linear time-invariant SISO systems modelled by bond graph", Journal of the

- Franklin Institute and applied Mathematics, vol. 333, no. 2, pp. 157-174, 1996, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032\(96\)00025-7](http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032(96)00025-7).
- [Gomand - 2008] J. Gomand, "Analyse de systèmes multi-actionneurs parallèles par une approche graphique causale", Thèse, L2EP, Lille, France, 2008, N° d'ordre 2008 ENAM 0043.
- [Hautier - 1999] J. P. Hautier, J. Faucher and J. P. Caron, "Le graphe Informationnel Causal, un outil pour analyser, comprendre, représenter", Journées 3EI, Cachan, 1999.
- [Iraqi - 2012] M. Iraqi-Houssaini, M. Kleiner, L. Roucoules, "Tools interoperability in engineering design using model-based engineering", 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis International Conference (ASME – ESDA), Nantes, France, 2012, <http://dx.doi.org/10.1115/ESDA2012-82290>.
- [Iraqi - 2011] M. Iraqi-Houssaini, M. Kleiner, L. Roucoules, "Model-based (Mechanical) Product Design, model driven engineering languages and systems", 14<sup>th</sup> International Conference Models, Wellington - New Zealand, 2011.
- [Johnson - 2013] W. Johnson, "A History of Rotorcraft Comprehensive Analyses", American Helicopter Society 69th Annual Forum, Phoenix Arizona, 2013.
- [Junco - 2002] S. Junco, A. Donaire, G. Garnero, "Speed control of series DC motors: A Bond Graph based backstepping design", IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Tunisia, 2002, <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1176035>.
- [Karnopp - 2000] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, R. C. Rosemberg, "System Dynamics - Modeling and Simulation of Mechatronic Systems", Wiley Interscience, 2000.
- [Krysinski - 2011] T. Krysinski, F. Malburet, "Mechanical Instability", Wiley, 2011.
- [Lefort - 1975] P. Lefort et J. Hamann, "L'hélicoptère, théorie et pratique", Chiron, Paris, 1975.
- [Letrouve - 2009] T. Letrouve, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Influence of the Clutch Model in a Simulation of a Parallel Hybrid Electric Vehicle", IEEE

- VPCC'09, Dearborn, USA, September 2009, <http://dx.doi.org/10.1109/VPCC.2009.5289446>.
- [Lhomme - 2005] W. Lhomme, Ph. Delarue, Ph. Barrade, A. Bouscayrol, "Maximum Control Structure of a series hybrid electric vehicle using supercapacitors", EVS'21, Monaco, April 2005.
- [Lhomme - 2007] W. Lhomme, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique", Thèse, USTL Lille, Novembre 2007, N° d'ordre 4059.
- [Lhomme - 2008] W. Lhomme, R. Zanasi, G.-H. Geitner, A. Bouscayrol, "Different Graphical Descriptions of Clutch Modelling for Traction Systems", ElectrIMACS'08, Quebec (Canada), May 2008.
- [Malburet - 1997] F. Malburet, "Amélioration du comportement vibratoire en basses fréquences par des moyens actifs", Thèse, Ensam Paris, 1997
- [Malburet - 2000] F. Malburet, A. Otho, P. Almeras, T. Krysinski, "Active control to improve the air resonance stabilities of modern rotor", Active Control in Mechanical Engineering, proceeding (Colloque Vibrations Chocs et Bruits), A.A. Balkema/Rotterdam/ Brookfield/2000, L. Jezequel Editor, pp. 213-220., 2000.
- [Marconi - 2007] L. Marconi, R. Naldi, "Robust full degree-of-freedom tracking control of a helicopter", journal of IFAC the International Federation of Automatic Control, vol. 43, no. 11, pp. 1909-1920, 2007, <http://dx.doi.org/10.1016/j.automat.2007.03.028>.
- [Margolis - 2001] D. Margolis, T. Shim, "A bond graph model incorporating sensors, actuators, and vehicle dynamics for developing controllers for vehicle safety", Journal of the Franklin Institute, vol. 338, no. 1, pp. 21-34, 2001, [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032\(00\)00068-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032(00)00068-5).
- [Marquis - 1997] W. Marquis-Favre, "Contribution à la représentation bond graph des systèmes mécaniques multi corps", Thèse, EEA, INSA Lyon, France, 1997, N° d'ordre 97 ISAL 0126.
- [Martin - 2011] M. Martin, J. Gomand, F. Malburet, P.J. Barre, "Modelling and Control of an Effort Feedback Actuator in Helicopter Flight Control Using Energetic Macroscopic Representation", IMAACA 2011, 5th

International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation, Rome, Italy, Sept. 12-14, 2011.

[Martin - 2013] M. Martin, "Contribution à l'intégration d'un actionneur intelligent à retour d'effort au sein d'un système complexe – Application aux commandes de vol d'hélicoptères", Thèse, LSIS, Art et Métiers ParisTech, Aix en Provence, France, 2013.

[Martinez - 2010] Martinez, M. L. and Romero, G. and Maroto, J. and Felez, J., "Simulation Model of the Scanner Servocontrols for the Orientation of a Fighter Aircraft by Using the Bond Graph Technique", Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN), Second International Conference on, pages 106-111, July 2010, <http://dx.doi.org/10.1109/CICSyN.2010.67>.

[Martini - 2008] A. Martini, "Modélisation et commande de vol d'un hélicoptère drone soumis à une rafale de vent", Thèse, LGIPM, Metz, France, 2008.

[Masarati - 2011] P. Masarati, V. Muscarello, G. Quaranta, "Robust aeroservoelastic stability of helicopters: application to the air/ground resonance", American Helicopter Society 67th Annual Forum, Virginia Beach, VA, May 3–5, 2011.

[Muzard - 1994] P. Muzard, "Etude du comportement dynamique linéaire et non-linéaire d'un rotor d'hélicoptère. Application au couplage rotor-fuselage", Thèse, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France, 1994, N° d'ordre 94-53.

[Niesner - 2005] C. Niesner "Sensibilité et robustesse à l'incertitude paramétrique, une approche Bond Graph", Thèse, LAGIS, Lille, 2005, N° d'ordre 15.

[Ormiston - 1991] Ormiston, A. Robert, "Rotor-Fuselage Dynamics of Helicopter Air and Ground Resonance", Journal of the American Helicopter Society, vol. 36, no. 2, pp. 3-20, April 1991.

[Pavel - 2008] M. D. Pavel, G. D. Padield, "Understanding the peculiarities of Rotorcraft-Pilot-Coupling", American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montreal, Canada, April 29-May 1, 2008.

- [Pavel - 2010] M. D. Pavel, "Modeling Lead-Lag Dynamics for Rotorcraft-Pilot-Couplings Investigation", American Helicopter Society 66th Annual Forum, Phoenix Arizona, May 11-13, 2010.
- [Paviot - 2010] T. Paviot, "Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management", Thèse, Ecole Centrale Paris, 2010, N° d'ordre 2010ECAP0020.
- [Paytner - 1961] H. M. Paytner, "Analysis and Design of Engineering systems", MIT-Press, Camb, MA, 1961.
- [Pierquin - 2002] J. Pierquin, "Contribution à la commande des systèmes multi machines multi convertisseurs", Thèse de doctorat, USTL Lille, Juillet 2002, N° d'ordre 3148.
- [Raju - 2010] M. Raju Hossain, D. Geoff Rideout, and D. Nicholas Krouglicof, "Bond graph dynamic modeling and stabilization of a quad-rotor helicopter", Proceedings of Spring Simulation Multiconference (SpringSim '10), Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, 2010, <http://dx.doi.org/10.1145/1878537.1878761>.
- [Raletz - 1990] R. Raletz, "Théorie élémentaire de l'hélicoptère", Collection aviation, Cépaduès-éditions, Toulouse, 1990.
- [Rougier - 2007] P. Rougier, "Mécanique du vol de l'hélicoptère", Lavoisier : Hermes Science Publication, Paris, 2007.
- [Schafroth - 2010] D. Schafroth, C. Bermes, S. Bouabdallah, R. Siegwart, "Modeling, system identification and robust control of a coaxial micro helicopter", journal of Control Engineering Practice, pp. 700-711, 2010, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.004>
- [Silva - 2010] Luis I. Silva, Guillermo A. Magallan, Pablo M. de la Barrera, Cristian H. De Angelo and Guillermo O. Garcia, "Modeling of Electric Vehicles Dynamics with Multi-Bond Graphs", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 1-3 September 2010, <http://dx.doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729149>.
- [Tiernego - 1985] M. J. L. Tiernego, A. M. Bos, "Modelling the dynamics and kinematics of mechanical systems with multibond graphs", Journal of

- the Franklin Institute, pp. 37–50, 1985, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032\(85\)90063-8](http://dx.doi.org/10.1016/0016-0032(85)90063-8).
- [Tod - 2013] G. Tod, F. Malburet, J. Gomand, P.J. Barre, B. Boudon, "An Energetic Approach To Aeroelastic Rotorcraft-Pilot Couplings Analysis", ERF 2013, 39<sup>th</sup> European Rotorcraft Forum 2013, Moscow, Russia, Sept. 3-6, 2013.
- [Tremolet - 2012] A. Tremolet, P. M. Basset, "Some meta-modeling and optimization techniques for helicopter pre-sizing", European Rotorcraft Forum, Amsterdam, September 2012.
- [Vaz - 2004] A. Vaz, S. Hirai, "Application of Vector Bond Graphs to the Modeling of a Class of Hand Prostheses", Proceedings of ESDA04, 7th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Manchester, United Kingdom, July 19-22, 2004, <http://dx.doi.org/10.1115/ESDA2004-58249>.
- [Vergé - 2004] M. Vergé, D. Jaume, "Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graph", Editions Technip, 2004.
- [Verhille - 2007] J. N. Verhille, "Représentation Énergétique Macroscopique du métro VAL 206 et Structures de commande déduites par inversion", Thèse de doctorat ENSAM, juillet 2007, N° d'ordre 2007 ENAM 0018.
- [Vernay - 2012] B. Vernay, "Analyse et comparaison de modèles pour modélisation multi-physique", Mémoire de master, LSIS, Aix en Provence, 2012.
- [Watkinson - 2003] J. Watkinson, "The Art of Helicopter", Butterworth-Heinemann, 2003.
- [Wegner - 1996] P. Wegner, "Interoperability", ACM Computing Survey, pp. 258-287, 1996.
- [Zhao - 2012] Q. Zhao, F. Gao, "Bond graph modelling of hydraulic six-degree-of-freedom motion simulator", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 226, no. 12 2887-2901, December 2012, <http://dx.doi.org/10.1177/0954406212440067>.
- [ARISTOTEL - 2013] [www.aristotel-project.eu](http://www.aristotel-project.eu) (Oct. 2013)



[L2EP - 2013] <http://l2ep.univ-lille1.fr> (Oct. 2013)

[20-sim - 2013] <http://www.20sim.com> (Oct. 2013)

[Sites institutions] Les principaux sites des institutions dans les activités portent sur l'hélicoptère (Oct. 2013) :

- [S\_1] Alfred Gessow Rotorcraft Center; University of Maryland, College Park, US : [www.agrc.umd.edu](http://www.agrc.umd.edu) ;
- [S\_2] Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, of Politecnico di Milano, Italy : [www.polimi.it](http://www.polimi.it) ;
- [S\_3] Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California Davis, US : [www.ucdavis.edu](http://www.ucdavis.edu) ;
- [S\_4] Flight Science and Technology; University of Liverpool; Liverpool, U.K: [www.liv.ac.uk/flightscience](http://www.liv.ac.uk/flightscience) ;
- [S\_5] University of Technology Delft, Netherlands: <http://www.tudelft.nl> ;
- [S\_6] NASA Ames Research Center, US: <http://www.arc.nasa.gov> ;
- [S\_7] L'équipe Ingénierie Numérique des systèmes mécaniques du Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes, Arts et Métiers Paristech, France : <http://www.lsis.org/> ;
- [S\_8] Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, France : <http://www.onera.fr/>.



---

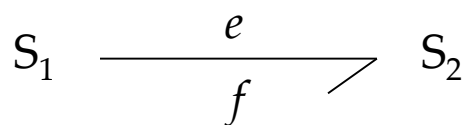
# *Annexe A - Notions complémentaires sur les outils de représentation multiphysique*

---

Dans cette annexe, des éléments supplémentaires sur les outils de représentation multiphysique retenus (le bond graph, le multibond graph et la Représentation Energétique Macroscopique) sont présentés. Dans la première partie un rappel sur les principes de base du BG et de la REM est effectué. Ensuite, les éléments du MBG sont présentés en analogie au BG.

## *Notions de base du BG*

L'énergie échangée entre deux systèmes est représentée par un lien de puissance, décrit par une demi-flèche. Ce lien porte les variables de flux et d'effort (Figure 0.1) :



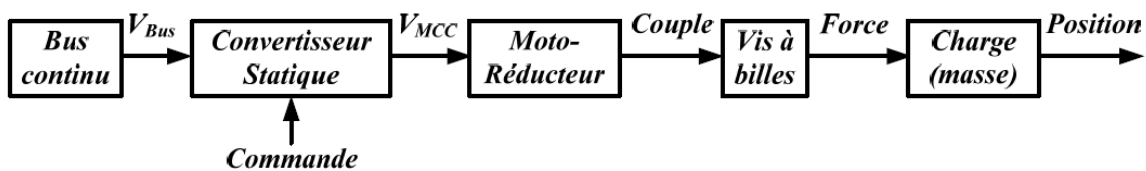
**Figure 0.1** - Lien de puissance en bond graph

Les variables généralisées de flux et d'effort sont différentes selon les domaines. L'expression de la puissance échangée s'obtient par multiplication des deux variables d'effort et de flux. L'expression de l'énergie est obtenue par intégration de l'expression de la puissance. Le Tableau 0.1 présente les analogies entre les variables de puissance et d'énergie dans les principaux domaines physiques qui concernent l'hélicoptère.

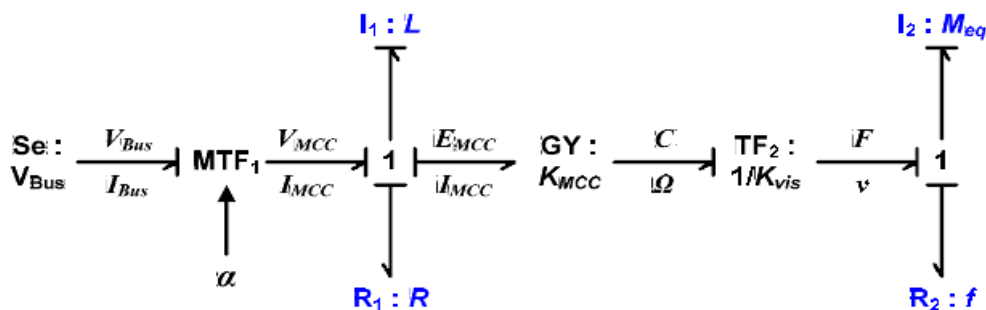
**Tableau 0.1** - Variables généralisées pour quelques domaines physiques [REF]

Domaine	Effort (e)	Flux (f)	Moment généralisé (p)	Déplacement généralisé (q)
Mécanique de translation	Force F [N]	Vitesse V [m/s]	Moment p [Ns]	Déplacement x [m]
Mécanique de rotation	Couple M [Nm]	Vitesse w [rad/s]	Moment pw [Nms]	Angle q [rad]
Electrique	Tension u [V]	Courant i [A]	Flux $\lambda$ [Vs]	Charge q [As]
Hydraulique	Pression totale p [N/m <sup>2</sup> ]	Flux volumique Q [m <sup>3</sup> /s]	Moment de pression pp [N/m <sup>2</sup> s]	Volume Vc [m <sup>3</sup> ]

La démarche de représentation d'un système en BG est illustrée sur la base d'un exemple de chaîne de conversion électromécanique [Gomand - 2008] de la Figure 0.2.

**Figure 0.2** - Exemple de chaîne de conversion électromécanique [Gomand - 2008]

La première étape consiste à placer les principaux éléments BG représentant les fonctions énergétiques des composants du système (Figure 0.3) : des éléments de stockage (I et C) et un élément dissipatif (R). Plusieurs types d'éléments permettent la liaison entre ces éléments : des éléments de jonction à effort commun (jonction '0') ou à flux commun (jonction '1'), des éléments transformateurs ('TF') ou gyrateurs ('GY') et des éléments de source d'effort ('Se') ou de flux ('Sf').

**Figure 0.3** - Bond graph d'une chaîne de conversion électromécanique [Gomand - 2008]

**Tableau 0.2 - Règles d'affectation de la causalité sur les différents éléments du BG [Dauphin - 2000]**

Elements	Causalité	
Sources d'énergie	<i>Obligatoire</i>	
Accumulation d'énergie	<i>Intégrale</i>	<i>Dérivée</i>
Dissipation d'énergie	<i>Arbitraire (linéaire)</i>	<i>Non arbitraire (non linéaire)</i>
Conversion d'énergie		
Distribution d'énergie		

La deuxième étape consiste en l'affectation de la causalité. Elle est représentée par un trait sur chaque lien spécifiant le lien de cause à effet. Ce trait est placé à côté de l'élément qui se voit imposer l'effort. La causalité est affectée selon des règles spécifiques (Tableau 0.2) et en suivant la procédure suivante [Dauphin - 2000] :

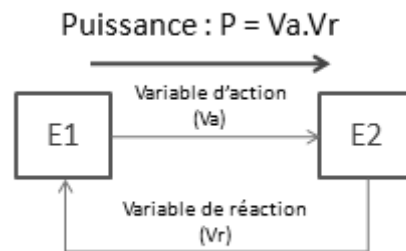
- 1- Affecter la causalité aux sources (obligatoires) et aux éléments R (non linéaires).
- 2- Affecter, dans la mesure du possible, une causalité intégrale aux éléments I et C.
- 3- Affecter les causalités aux éléments R (linéaires) en respectant les restrictions de causalité aux éléments de distribution (les jonctions "0" et "1") et aux éléments de conversion (TF et GY).

L'affectation de la causalité intégrale dans ce cas est préférentielle, mais en cas de conflit à une jonction on peut être amené à représenter certains éléments (I et C) en causalité dérivée.

## *Notions de base de la REM*

L'outil REM repose sur deux principes :

- 1- Le principe d'action-réaction : Chaque action d'un élément (1) induit une réaction de l'élément (2). La puissance instantanée échangée entre les deux éléments est le produit des deux variables d'action et de réaction entre les deux éléments [Bouscayrol - 2003] (Figure 0.4). Ce principe est également à la base du bond graph.



**Figure 0.4 - Principe d'action-réaction**

- 2- Le principe de causalité : la causalité physique ne peut être qu'intégrale. Ce principe découle du fait que toute grandeur physique ne peut être que la conséquence d'événements passés ou présents, mais pas d'événements futurs.

Nous soulignons ici, une différence avec le BG qui autorise l'utilisation de la causalité dérivée.

La Figure 0.5 montre un exemple de représentation en REM sur la chaîne de conversion électromécanique. La représentation comporte plusieurs types d'éléments : source de puissance (pictogramme ovale couleur verte), éléments de conversion (pictogramme carré pour une conversion monodomaine ou circulaire pour une conversion multidomaine) et élément d'accumulation (pictogramme rectangulaire orange avec une barre oblique). Ces différents éléments sont reliés par les variables d'action réaction [Bouscayrol - 2003].

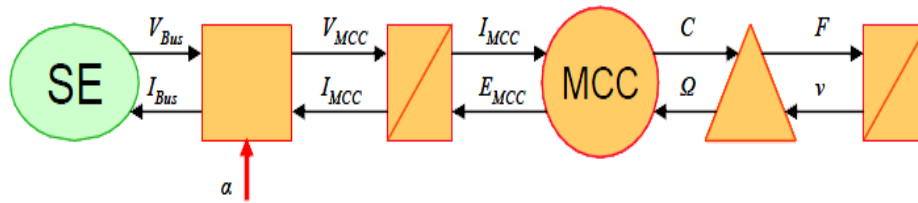


Figure 0.5 - REM d'une chaîne de conversion électromécanique [Gomand - 2008]

Tableau 0.3 - Analogies entre les principaux éléments du BG et ceux de la REM

Elements	BG Symbol	EMR Symbol	Examples
Source element	$se \longrightarrow$ $sf \longrightarrow$		Battery  Hands on Stick
	$\longrightarrow I$  $\longrightarrow c$		Inductor, Inertia  Capacitor, stiffness
Conversion element	$\longrightarrow \frac{TF}{m} \longrightarrow$		Chopper, Gearbox
	$\longrightarrow GY \longrightarrow$		DC machine
Coupling element			Series connexion or parallel connexion

Les causalités intrinsèques des éléments d'accumulation fixent leurs entrées et sorties (principe de cause à effet), et donc les entrées et sorties des autres éléments. Comme son nom l'indique la REM permet une représentation macroscopique, parce qu'elle ne fait apparaître que les éléments d'accumulation d'énergie et de transfert de puissance, facilitant ainsi la déduction de la commande par inversion du système.


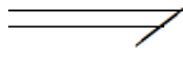

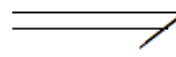
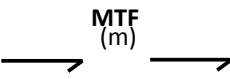
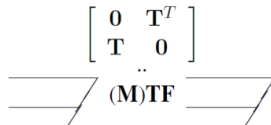
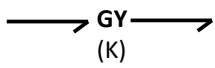
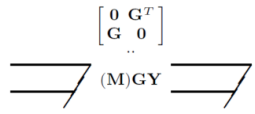
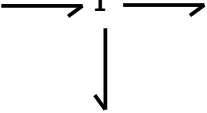
Les analogies entre les principaux éléments des représentations BG et REM sont présentés dans le Tableau 0.3, accompagnés de quelques exemples.

## Le BG et le MBG

Le BG a été développé au départ avec une forme monodimensionnelle. Plus tard, cette méthode a été étendue à une forme vectorielle appelée multibond graph (MBG), pour la représentation et l'analyse des systèmes multicorps.

Les analogies entre les principaux éléments du BG monodimensionnel et éléments multiports du MBG dans le domaine multidimensionnel, sont présentées dans le Tableau 0.4.

**Tableau 0.4** - Analogies des principaux éléments du BG et ceux du MBG

Elements	BG Symbol	MBG Symbol
Source element	$(Se)$ ou $(Sf)$ 	$(Se)$ ou $(Sf)$ 
Accumulation element	 $(I)$ ou $(C)$	 $(I)$ ou $(C)$
Conversion element		$\begin{bmatrix} 0 & T^T \\ T & 0 \end{bmatrix}$ 
		$\begin{bmatrix} 0 & G^T \\ G & 0 \end{bmatrix}$ 
Coupling element	$(O)$ ou $\mathbf{1}$ 	$(\underline{O}_n)$ ou $\underline{1}_n$ 