



HAL
open science

Approche énergétique pour la représentation, la structuration et la synthèse des Systèmes d'Assistance à Opérateur : application aux chaînes de commande de vol d'hélicoptère

Matthieu Touron

► **To cite this version:**

Matthieu Touron. Approche énergétique pour la représentation, la structuration et la synthèse des Systèmes d'Assistance à Opérateur : application aux chaînes de commande de vol d'hélicoptère. Automatique / Robotique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0008 . tel-01447390

HAL Id: tel-01447390

<https://pastel.hal.science/tel-01447390>

Submitted on 26 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Automatique "

présentée et soutenue publiquement par

Mathieu TOURON

Le 23 mars 2016

**Approche énergétique pour la représentation, la structuration
et la synthèse des Systèmes d'Assistance à Opérateur :
Application aux chaînes de commande de vol d'hélicoptère**

Directeur de thèse : **Pierre-Jean BARRE**

Co-encadrement de la thèse : **Julien GOMAND et Jean-Yves DIEULOT**

Jury

| | |
|--|------------|
| Mme. Geneviève DAUPHIN-TANGUY , Professeur des Universités, CRISTAL, Ecole Centrale de Lille | Président |
| M. Eric BIDEAUX , Professeur des Universités, Ampère, INSA de Lyon | Rapporteur |
| M. Claude BERGMANN , Inspecteur Général de l'Éducation Nationale HDR | Examineur |
| M. Pierre-Jean BARRE , Professeur des Universités, LSIS, Arts et Métiers ParisTech, Aix en Provence | Examineur |
| M. Jean-Yves DIEULOT , Maître de Conférences HDR, CRISTAL, Polytech-Lille | Examineur |
| M. Julien GOMAND , Maître de Conférences, LSIS, Arts et Métiers ParisTech, Aix en Provence | Examineur |

« Nous sommes, comme disait Husserl, des "fonctionnaires de l'humanité", payé par l'État pour découvrir des choses, soit sur le monde naturel, soit sur le monde social et il fait partie, me semble-t-il, de nos obligations de restituer ce que nous avons acquis. »

Pierre Bourdieu

« navegar é preciso, viver não é preciso »

Fernando Pessoa

Remerciement

Les travaux présentés dans ce mémoire sont le fruit de collaborations solides et entretenues. Je tiens à remercier les personnes qui ont participé à ces travaux.

Mes premiers remerciements vont à Madame Geneviève Dauphin Tanguy, Professeur des Universités au sein du laboratoire CRISTAL, pour sa disponibilité, son accueil toujours chaleureux et ses conseils avisés et éclairants. Je souhaite aussi remercier Monsieur Claude Bergmann, Inspecteur Général de l'Éducation Nationale, pour son suivi, ses encouragements et la pertinence de ses remarques, et Monsieur Eric Bideaux, Professeur des Universités au sein du laboratoire Ampère, pour la finesse de ses apports.

Je remercie aussi mon équipe d'encadrement proche, Messieurs Pierre-Jean Barre, Jean-Yves Dieulot et Julien Gomand, pour la qualité de leurs éclairages, leur acuité dans leurs directions, leur patience et leur ténacité. L'amitié qu'ils m'ont témoignée est pleinement réciproque.

Enfin, mes pensées vont aussi à tous les membres de l'équipe INSM du laboratoire LSIS, Monsieur Lionel Roucoules, son responsable, Monsieur François Malburet porteur de la Chaire « "Dynamique des Systèmes Mécaniques complexes » », ainsi que tous les autres membres de l'équipe : enseignants-chercheurs, ingénieurs, doctorants, et agents.

Sommaire

| | |
|--|------------------|
| <u>LISTE DES FIGURES.....</u> | <u>3</u> |
| <u>LISTE DES TABLEAUX</u> | <u>6</u> |
| <u>NOTATIONS GENERALES</u> | <u>7</u> |
| <u>INTRODUCTION GENERALE</u> | <u>8</u> |
| <u>1 L'APPROCHE MULTI-PHYSIQUE POUR L'INGENIERIE DE L'HELICOPTERE</u> | <u>10</u> |
| 1.1 PROBLEMATIQUES GENERALES SOULEVEES PAR LE DEVELOPPEMENT D'UN HELICOPTERE | 10 |
| 1.2 LA MODELISATION MULTI-PHYSIQUE POUR UNE APPROCHE MODULAIRE..... | 12 |
| 1.2.1 MODELISATION MULTI-PHYSIQUE : LE PARADIGME ENERGETIQUE..... | 12 |
| 1.2.2 STRUCTURE DU SYSTEME ET SA REPRESENTATION GRAPHIQUE..... | 23 |
| 1.2.3 ILLUSTRATION 1 : CAS DE LA DYNAMIQUE DU VOL D'HELICOPTERE - RESONANCE AIR | 26 |
| 1.2.4 ILLUSTRATION 2 : CHAINES DE COMMANDE DE VOL D'HELICOPTERE | 29 |
| 1.3 CONCLUSION : DES BESOINS METHODOLOGIQUES..... | 31 |
| <u>2 SYSTEMES D'ASSISTANCE A OPERATEUR : STRUCTURE, MODELES ET SPECIFICATIONS</u> | <u>33</u> |
| 2.1 LES INTERFACES HOMME-MACHINE EN INTERACTIONS PHYSIQUES..... | 33 |
| 2.2 ORGANISATION ET FONCTIONNALITES D'UN SYSTEME D'ASSISTANCE A OPERATEUR..... | 38 |
| 2.3 MODELISATION ET SPECIFICATION MULTI-PHYSIQUE DES S.A.O. | 41 |
| 2.4 CONCLUSION : LES SPECIFICITES DES S.A.O. | 45 |
| <u>3 CONCEPTION STRUCTURELLE D'ASSISTANCE A OPERATEUR PAR APPROCHE ENERGETIQUE</u> | <u>46</u> |
| 3.1 INTRODUCTION DU CAS D'ETUDE GENERIQUE | 46 |
| 3.2 APPROCHES DE COMMANDES DANS LE FORMALISME HAMILTONIEN A PORTS..... | 48 |
| 3.2.1 ENERGY BALANCING (EB) | 49 |
| 3.2.2 ENERGY SHAPING (ES) ET IDA-PBC | 50 |
| 3.2.3 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | 52 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.3 | CONCEPTION STRUCTURELLE ET FORMELLE DE L'ASSISTANCE A OPERATEUR | 53 |
| 3.3.1 | OBTENTION DE LA STRUCTURE ET SYNTHÈSE DE L'ASSISTANCE | 53 |
| 3.3.2 | VALIDITÉ THÉORIQUE DE LA MÉTHODOLOGIE | 54 |
| 3.3.3 | PROPRIÉTÉS DANS LE CAS DES COMPORTEMENTS LINÉAIRES..... | 60 |
| 3.4 | SYNTHÈSE MÉTHODOLOGIQUE | 62 |
| 3.5 | ÉTUDES DE CAS | 67 |
| 3.5.1 | COMMANDABILITÉ ET OBSERVABILITÉ DU CAS D'ÉTUDE GÉNÉRIQUE..... | 67 |
| 3.5.2 | CAS DU CONTRÔLE D'IMPÉDANCE | 67 |
| 3.5.3 | CAS DU <i>POWER SCALING</i> | 74 |
| 3.6 | CONCLUSION..... | 76 |
| 4 | <u>SYNTHÈSE D'ASSISTANCE A LA COMMANDE DE VOL D'UN HELICOPTERE DE FORT TONNAGE..</u> | 78 |
| 4.1 | INTRODUCTION..... | 78 |
| 4.2 | DU SUPPORT INDUSTRIEL AU MODELE DE VALIDATION | 81 |
| 4.3 | DEFINITION D'UN MODELE SIMPLIFIE POUR LA SYNTHÈSE | 86 |
| 4.4 | STRUCTURE ET SYNTHÈSE DE L'ASSISTANCE | 89 |
| 4.4.1 | FONCTIONNALITÉS ATTENDUES..... | 89 |
| 4.4.2 | DEFINITION DU COMPORTEMENT PRATIQUE | 91 |
| 4.4.3 | APPLICATION DE LA MÉTHODE IDA-PBC..... | 91 |
| 4.4.4 | MISE EN ŒUVRE DE LA SYNTHÈSE..... | 96 |
| 4.4.5 | VALIDATION DE PERFORMANCE | 98 |
| 4.4.6 | ANALYSE : COMPARAISON AVEC LA SOLUTION INDUSTRIELLE | 99 |
| 4.5 | CONCLUSION..... | 101 |
| 5 | <u>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</u> | 103 |
| 5.1 | SYNTHÈSE DES TRAVAUX | 103 |
| 5.2 | PERSPECTIVES | 104 |
| | <u>ANNEXES.....</u> | 112 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| fig. 1-1 – Représentation organique à grande échelle [7]..... | 11 |
| fig. 1-2 – Les domaines de la physique [14] | 12 |
| fig. 1-3 – Système isolé..... | 12 |
| fig. 1-4 – Transfert de puissance | 13 |
| fig. 1-5 – Transfert multiple de puissance..... | 13 |
| fig. 1-6 – Circuit électrique | 18 |
| fig. 1-7 – Grandeurs traversante et encadrante..... | 18 |
| fig. 1-8 – Schéma électrique | 23 |
| fig. 1-9 – Schéma cinématique d’un régulateur de Watt | 23 |
| fig. 1-10 – Représentation graphique (a) et comportement associé (b) d’un modèle causal | 24 |
| fig. 1-11 – Représentation graphique causale d’un réseau d’une chaîne électro-mécanique | 24 |
| fig. 1-12 – Représentation graphique (a) et comportement associé (b) d’un modèle acausal..... | 25 |
| fig. 1-13 – Représentation graphique acausale d’un réseau..... | 25 |
| fig. 1-14 – Interconnexion de systèmes hamiltoniens | 26 |
| fig. 1-15 – Représentation macroscopique de l’interconnexion | 26 |
| fig. 1-16 – Représentation macroscopique d’un hélicoptère [7] | 27 |
| fig. 1-17 – Synoptique de la cinématique d’un hélicoptère en vol [7] | 27 |
| fig. 1-18 – Détail de l’articulation pale-mât [7] | 27 |
| fig. 1-19 – Modèle multi-bond graph de l’hélicoptère [7]..... | 28 |
| fig. 1-20 – Principe de fonctionnement du plateau cyclique [32] | 29 |
| fig. 1-21 – Synoptique de la structure des CdV [33]..... | 30 |
| fig. 1-22 – Structure de contrôle obtenue par inversion du modèle [33] | 31 |
| fig. 1-23 – Cartographie des représentations d’un système | 32 |
| fig. 2-1 – Ordre de grandeur des puissances dans l’hélicoptère..... | 33 |

| | |
|---|----|
| fig. 2-2 – Exemples de systèmes d’aide à l’action | 34 |
| fig. 2-3 – Synoptique de la téléopération [37] | 34 |
| fig. 2-4 – Organe de retour haptique Falcon (Novint Inc.) | 35 |
| fig. 2-5 – Exemple de comanipulation Homme-Machine [38] | 35 |
| fig. 2-6 – Exosquelette Hercule (RB3D) | 35 |
| fig. 2-7 – Définitions des grandeurs d’interaction..... | 35 |
| fig. 2-8 – <i>Human Extender</i> [39]..... | 36 |
| fig. 2-9 – Principe du contrôle d’impédance | 37 |
| fig. 2-10 – Représentation synoptique d’un comportement | 38 |
| fig. 2-11 – Structure organique : cas de la téléopération..... | 38 |
| fig. 2-12 – Structure organique : cas de la coopération | 38 |
| fig. 2-13 – Structure organique : cas d’un S.A.O. | 39 |
| fig. 2-14 – Composition d’un S.A.O. | 40 |
| fig. 2-15 – Représentation des interactions physiques d’un SAO | 41 |
| fig. 2-16 – Représentation du comportement spécifié | 42 |
| fig. 2-17 – Exemple d’usage de l’élément PTF..... | 44 |
| fig. 3-1 – Cas d’étude générique utilisé pour les développements..... | 46 |
| fig. 3-2 – Bond-graph associé au cas d’étude..... | 46 |
| fig. 3-3 – interconnexion pour <i>Energy Balancing</i> | 49 |
| fig. 3-4 – Structuration des domaines informationnels et physiques | 50 |
| fig. 3-5 – Synoptique du principe de l’IDA-PBC | 51 |
| fig. 3-6 – Déviation de comportement | 55 |
| fig. 3-7 – Assistance avec ports actionnés..... | 57 |
| fig. 3-8 – Bond-graph à multiplicateur de puissance (a) dissipatif (b) non dissipatif [47]..... | 58 |
| fig. 3-9 – Exemple de structure ne respectant pas la propriété 3-8..... | 61 |
| fig. 3-10 – Représentation multi-niveau d’un S.A.O..... | 63 |
| fig. 3-11 – Synoptique : choix du comportement spécifié pratique..... | 64 |
| fig. 3-12 – Comportement spécifié idéal d’un contrôle d’impédance | 68 |

| | |
|---|----|
| fig. 3-13 – Comportement spécifié pratique dans le cas du contrôle d'impédance | 69 |
| fig. 3-14 – Bond graph du système désiré | 70 |
| fig. 3-15 – Bond graph du système assisté | 70 |
| fig. 3-16 – Simulation du contrôle d'impédance | 71 |
| fig. 3-17 – Bond graph du système assisté non linéaire | 72 |
| fig. 3-18 – Comportement non linéaire spécifié pour Cd^* | 73 |
| fig. 3-19 – Déviation globale en contrôle d'impédance non linéaire | 73 |
| fig. 3-20 – Déviation partielle du comportement isolé (Vu, Fu) en contrôle d'impédance non linéaire | 73 |
| fig. 3-21 – Deux niveaux de représentation équivalents | 74 |
| fig. 3-22 – Représentation bond-graph du <i>power scaling</i> | 75 |
| fig. 3-23 – Simulation du <i>power scaling</i> | 76 |
| fig. 4-1 - Hélicoptère de fort tonnage (a) et son manche (b) [7] | 78 |
| fig. 4-2 – Schéma à paramètres localisés pour une chaîne de CDV d'hélicoptère [33] | 79 |
| fig. 4-3 – Modèle volumique utilisé pour la validation | 80 |
| fig. 4-4 – Organes composant une chaîne de commande de vol | 81 |
| fig. 4-5 – Vue de détail : plateau cyclique et servo-commande | 82 |
| fig. 4-6 – Vue de détail : manche et <i>TRIM</i> | 82 |
| fig. 4-7 – Mise en évidence du tangage du plateau | 83 |
| fig. 4-8 – Bond graph simplifié à mots des commandes de vol | 84 |
| fig. 4-9 – Bond graph détaillé d'une commande de vol en tangage | 84 |
| fig. 4-10 – Rapport cinématique global en fonction de la position | 85 |
| fig. 4-11 – Bond graph détaillé du modèle pour la synthèse | 86 |
| fig. 4-12 – Excitation : mouvement au manche du pilote | 87 |
| fig. 4-13 – Systèmes non assistés : couple du pilote sur le manche | 88 |
| fig. 4-14 – Systèmes non assistés : encadrement du couple du pilote | 88 |
| fig. 4-15 – Systèmes non assistés : déplacement angulaire du plateau | 89 |
| fig. 4-16 – Ressenti en effort spécifié | 90 |

| | |
|---|-----|
| fig. 4-17 – Bond-graph du comportement spécifié pratique | 91 |
| fig. 4-18 – Représentation cyber-physique détaillée | 92 |
| fig. 4-19 – Représentation synthétique du comportement du SAO..... | 93 |
| fig. 4-20 – Chronogrammes du déplacement et du ressenti du pilote | 94 |
| fig. 4-21 – Vérification du ressenti du système assisté | 95 |
| fig. 4-22 – Analyse du ressenti du système assisté | 95 |
| fig. 4-23 – Vérification du déplacement de la matière d’œuvre | 96 |
| fig. 4-24 – Principe de la simulation couplée | 97 |
| fig. 4-25 – Validation du comportement en ressenti | 98 |
| fig. 4-26 – Validation du déplacement de la matière d’œuvre | 99 |
| fig. 4-27 – Comparaison simulation - expérimentation..... | 100 |
| fig. 4-28 – Effort déployé par le vérin de servo-commande | 101 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| tab. 1-1 – Analogie sur l’énergie..... | 16 |
| tab. 1-2 – Analogie flux-effort | 18 |
| tab. 1-3 – Analogie traversante-encadrante | 19 |
| tab. 2-1 – Expression fonctionnelle des comportements élémentaires | 43 |
| tab. 3-1 – Paramètres utilisés pour la simulation du contrôle d’impédance | 71 |
| tab. I-1 – Modèle de validation : paramétrages des variables | 112 |
| tab. II-1 – Modèle de validation : caractéristiques des comportements | 113 |
| tab. III-1 – Tableau des valeurs 20Sim..... | 114 |
| tab. IV-1 – Notations retenues pour la détermination de la charge équivalente | 115 |

Notations générales

| | |
|---------------------|---|
| H | Hamiltonien, énergie totale stockée dans un ensemble isolé |
| $\{x\}$ | Vecteur d'état |
| $\{u\}$ | Vecteur des grandeurs physiques excitantes du comportement |
| $\{y\}$ | Vecteur des grandeurs physiques résultantes du comportement |
| ∇ | Opérateur nabla |
| $J_{f(\{x\})}$ | Matrice jacobienne de la fonction $f(\{x\})$ |
| $[Q]$ | Matrice jacobienne des équations constitutives d'un comportement linéaire |
| $[J(x)]$ | Matrice de structure énergétique |
| $[R(x)]$ | Matrice de dissipation |
| \mathcal{B}_n | Comportement du système nominal |
| \mathcal{B}_a | Comportement du système assisté |
| \mathcal{B}_{as} | Comportement spécifié du système assisté |
| \mathcal{B}_{ath} | Comportement théorique du système assisté |
| \mathcal{B}_{ar} | Comportement réel du système assisté |
| s | Variable de Laplace |

Introduction générale

Un aéronef à voilure tournante est un système physique qui présente de nombreuses complexités : structure multi-physique de grande dimension, comportements non-linéaires, couplages phénoménologiques générant de nombreux modes vibratoires. A cette complexité physique s'ajoute une complexité d'ingénierie : les solutions technologiques permettant la maîtrise de telles complexités se superposent, occultant les fonctionnalités. L'analyse de ces systèmes devient alors une gageure.

Le développement de ce type de système nécessite des méthodes d'analyse (structurelle et comportementale) et de commande adaptées à ces spécificités. Afin de développer les méthodes nécessaires, les travaux menés dans le cadre de la chaire industrielle "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes" de la fondation d'entreprise Airbus Group ont prouvé l'intérêt d'une modélisation énergétique : les outils de représentation proposés permettent un modèle multi-physique, modulaire (acausale) et à différents niveaux de granularité. Ils ont aussi pu valider leur efficacité à simuler les comportements spécifiques de la dynamique du vol, l'aéronef étant modélisé comme une structure énergétique passive recevant la puissance motrice.

Si la maîtrise du comportement d'un aéronef est un défi pour l'ingénieur, elle ne l'est pas moins pour le pilote : canaliser la puissance motrice (2 MW dans le cas d'un hélicoptère de fort tonnage) à partir d'une commande manuelle est impossible sans organe actif d'assistance. La modélisation et la commande des organes actifs d'assistance a déjà fait l'objet de travaux réalisés par l'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS). Ceux-ci aboutissent à un modèle combiné physique des organes et informationnel des lois de commande.

Les travaux exposés dans ce mémoire visent à ajouter le niveau de granularité intermédiaire et nécessaire entre la représentation multi-physique pure et une représentation combinée physique et informationnelle d'un système d'assistance à opérateur. A l'instar de nombreux outils de représentation graphique multi-physique, le paradigme de modélisation utilisé est basé sur l'expression énergétique des comportements et des interactions structurelles. Une expression mathématique équivalente, recouvrant toute la sémantique des stockages et dissipations d'énergie dans un réseau, se retrouve dans le formalisme hamiltonien à ports.

Les méthodes de commande dans ce formalisme sont nombreuses (*Energy Balancing*, *IDA-PBC*, etc.), et visent à maîtriser le comportement par un façonnement de l'énergie. Mais elles n'ont jamais été mises en œuvre dans le cadre de l'assistance à opération. Nous proposons donc ici un schéma d'interaction spécifique à l'assistance à opération qui, elle, nécessite non pas une conservation mais une amplification de la puissance de l'opérateur. S'appuyant sur cette nouvelle perspective, ces travaux investiguent aussi une méthodologie originale de conception de la structure organique et de synthèse de l'assistance.

Le premier chapitre détaille les spécificités d'un aéronef à voilure tournante. Sa structure et son comportement physiques sont représentés selon le paradigme énergétique, support de la modélisation multi-physique. L'usage de cette représentation pour la synthèse d'une assistance à la commande de vol réalisée lors de travaux antérieurs est rappelé.

Le deuxième chapitre vise, sur la base d'un état de l'art des systèmes à interface homme-machine physique, à proposer une représentation originale de ces interactions. Une structure organique générique des systèmes d'assistance à opérateur est proposée, en tâchant de la distinguer d'une structure de téléopération.

La structure originale proposée, en interaction avec l'environnement, ne correspond pas aux structures habituellement utilisées dans le cadre du façonnement d'énergie. Le troisième chapitre développe donc les approches de commande du paradigme énergétique dans le cadre proposé de l'assistance à opérateur. Il en découle deux expressions équivalentes du comportement du système, et respectivement leur représentation graphique : le système nominal accompagné des organes actifs d'assistance (représentation cyber-physique) et le comportement du système assisté dans sa globalité (représentation synthétique du comportement). A partir d'un critère de transparence, les conditions de validité de la représentation sont précisées. L'approche est ici enrichie dans une démarche de conception : à partir d'un comportement spécifié, nous déterminons où doivent agir les organes actifs, selon quelles mesures et suivant quelles lois de commande. Enfin, la méthodologie est vérifiée sur une structure physique générique, formellement et par simulation numérique.

Dans le dernier chapitre, la méthode est appliquée à une chaîne de commande de vol de fort tonnage. A partir d'un modèle dénué d'organes d'assistance et d'un cahier des charges, nous obtenons un ensemble de solutions structurelles satisfaisant le cahier des charges : la solution industrielle actuelle fait partie de cet ensemble de solutions ; les comportements simulés et réels sont proches.

Ces travaux de recherche se sont initialement appuyés sur un outil électroportatif d'aide à la coupe en partenariat avec la société Pellenc. Ce dernier a été le support d'illustrations lors de trois publications en conférences (voir ci-dessous). Les méthodologies ont été enrichies et développées sur les commandes de vols d'un hélicoptère. Elles sont l'objet de deux articles en cours de rédaction : « *A port-Hamiltonian framework for operator force assisting systems* » et « *Towards an energetic design of helicopter flight axis control* ».

- [1] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Interaction homme-machine : Utilisation des formalismes graphiques pour l'analyse des schémas de commande. Application à un outillage électroportatif*, Journées Doctorales Modélisation, Analyse, Conduite des Systèmes dynamique, JDMACS 2011, Marseille, France, 2011.
- [2] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Conception architecturale d'un système mécatronique d'assistance à opérateur par Bond - Graph*, septième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 2012.
- [3] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Modeling of inertial and compliance parametric uncertainties in Port-Hamiltonian Systems using LFR*, Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), International Conference on , Hammamet, 2013.

1 L'approche multi-physique pour l'ingénierie de l'hélicoptère

1.1 Problématiques générales soulevées par le développement d'un hélicoptère

La société *Airbus Helicopters* développe et industrialise des hélicoptères depuis le début du XXème siècle. Elle a su acquérir l'expertise scientifique, technique, et industrielle qui en fait un acteur majeur du secteur au niveau international. Avec plus de vingt modèles à son catalogue, elle continue de développer sa gamme avec le nouvel H160 (ou X4). Elle cherche aussi à étendre le champ d'application de ses produits, ce qui passe par des prototypes innovants comme le X3, premier aéronef de type gyrodyne à atteindre une vitesse d'avance de près de 500 km/h.

Cependant, les freins à ces développements restent nombreux. En effet, les comportements qui régissent un hélicoptère sont complexes, très souvent non linéaires. De plus, sa structure se compose de nombreux organes, conférant à ce système une grande dimension. Les liens d'interaction entre ces organes sont nombreux, difficiles à identifier, qualifier, quantifier et représenter. Enfin, notons que nombre des organes présents sur un hélicoptère ont pour finalité de maîtriser, souvent localement, un comportement spécifique. Alors, s'ajoute à la difficulté d'explicitation des phénomènes physiques, un obstacle de représentation et d'analyse des solutions technologiques utilisées pour maîtriser ces comportements dans un système de grande dimension.

La spécificité d'un aéronef à voilure tournante réside dans la présence d'un (ou plusieurs) rotor(s) de forte inertie et tournant à grande vitesse. Ses pales, fixées au mât par liaison élastique, transmettent la puissance nécessaire à la portance, mais aussi interagissent avec la structure porteuse. Ces interactions engendrent de nombreux phénomènes vibratoires conduisant à des instabilités. Les plus connus d'entre eux sont la « *Résonance Air* » et la « *Résonance Sol* » [4]. Le pilote non plus n'est pas isolé de certains couplages mécaniques. Ces couplages sont regroupés sous l'appellation « *Rotorcraft Pilot Couplings* » [5], [6]. On comprend alors la criticité de la nécessaire qualité de l'interaction pilote-machine, à travers les manches de pilotage comme via les effets dynamiques du vol.

Afin de cibler les freins à la modélisation et à la maîtrise de ces comportements, la fondation d'entreprises Airbus Group a mis en place, en partenariat avec l'équipe INSM du laboratoire LSIS et les écoles d'ingénieurs Arts et Métiers ParisTech et Centrale-Marseille, la chaire industrielle intitulée « Dynamique des systèmes mécaniques complexes », qui vise à la modélisation et l'amélioration des comportements de ce type de système. Dans ce cadre, deux thèses ont été soutenues [7] et [8], une troisième prévue pour fin 2015. Ces travaux s'articulent selon l'axe de recherche *Maîtrise des phénomènes multi-physiques couplés* de l'équipe INSM.

Afin de répondre au besoin de description des interactions entre les organes constitutifs d'un hélicoptère, les premiers travaux ont visé à proposer une décomposition structurelle d'un aéronef à voilure tournante, et de la représenter à l'aide d'un outil adapté. Tout d'abord, notons que comme tout aéronef, son vol est permis grâce à l'interaction entre une voilure mécanique et des efforts aérodynamiques (voir fig. 1-1). La puissance nécessaire à générer ces efforts aérodynamiques est obtenue par combustion d'hydrocarbures. Enfin, pour maîtriser cette puissance, de nombreux organes actifs (électriques ou hydrauliques) sont présents. Force est de constater que cette grande diversité de domaines de la physique impose des expertises métiers complémentaires.

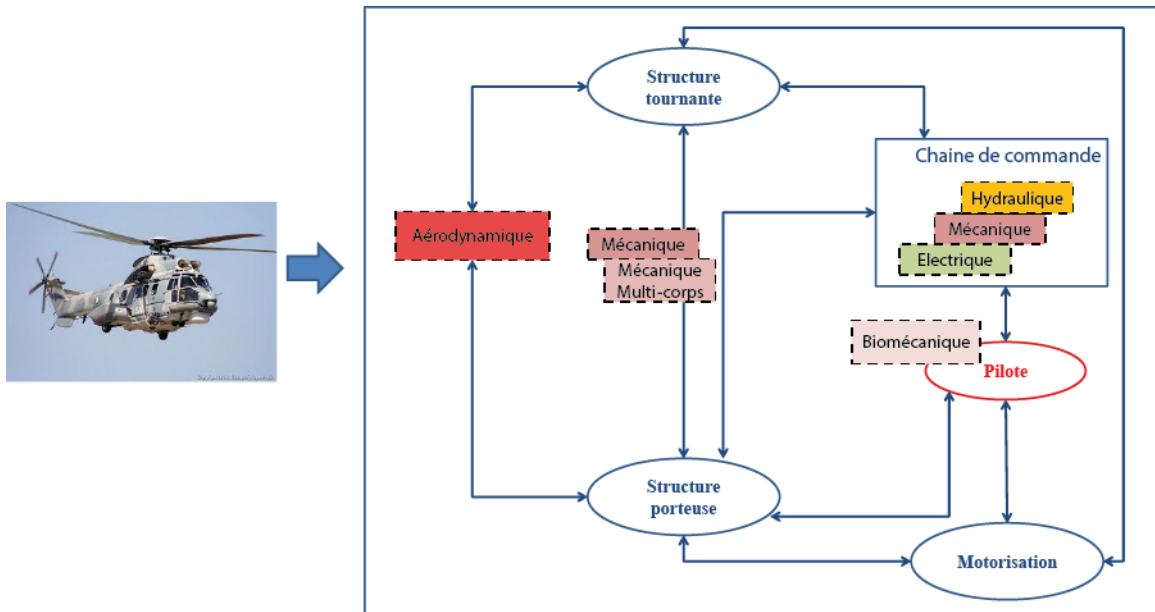


fig. 1-1 – Représentation organique à grande échelle [7]

A partir de la représentation proposée fig. 1-1, il faut noter que les organes sont liés par de nombreuses interactions dont la plupart se traduisent à travers un échange de puissance entre ceux-ci. *A fortiori*, les interactions homme-machine se traduisent elles aussi par des échanges de puissance mais ces puissances appartiennent à des domaines physiques différents. Aussi, le paradigme de modélisation multi-physique a semblé le plus adapté à ce type de problème. Toutefois, cette représentation macroscopique n'est pas suffisamment détaillée pour atteindre la finesse d'analyse nécessaire. D'autre part, une représentation détaillée et exhaustive serait d'une dimension trop importante pour permettre une analyse aisée. Donc, l'outil de modélisation utilisé doit permettre des représentations à échelles différentes. Il sera alors qualifié de multi-échelle [8].

Au-delà de sa capacité à décrire le système, l'outil de modélisation doit aussi permettre les activités nécessaires à l'ingénierie, notamment la conception et la vérification, que ce soit au niveau structurel ou au niveau comportemental. Il doit posséder les qualités nécessaires à l'analyse structurelle et permettre le dimensionnement. Si la complexité (structurelle, comportementale) est un obstacle à ces activités, l'outil de modélisation doit permettre l'explicitation des complexités. Le paradigme énergétique (§1.2) est une approche de modélisation multi-physique qui permet cette explicitation. L'outil de modélisation doit aussi pouvoir simuler le comportement du système. Cette capacité passe par un outil logiciel : le modèle doit pouvoir être supporté et simulé informatiquement sans altérer les lois de comportement. Enfin, afin de pouvoir s'intégrer dans une démarche industrielle de conception, l'outil de modélisation doit permettre l'évolution et la réutilisation du modèle. Il doit posséder une qualité de modularité.

Afin de répondre à ces exigences de moyens méthodologiques, le paradigme de modélisation énergétique, et les différents outils logiciels qui lui sont associés, apparaît le plus adapté. Les fondamentaux de cette approche sont développés §1.2.1, une illustration est présentée §1.2.3. Il présente aussi l'intérêt d'être le support méthodologique de synthèse de commande (voir §1.2.4).

1.2 La modélisation multi-physique pour une approche modulaire

1.2.1 Modélisation multi-physique : le paradigme énergétique

De par la nature de ses organes et de ses interactions avec l'environnement, un hélicoptère fait appel à des équations de comportement issues de différents domaines de la physique. Il fait partie des systèmes pluri-technologiques (mécanique, électrique, hydraulique, etc.).

Il existe de nombreux formalismes qui permettent de modéliser les comportements dans différents domaines de la physique. Ils ne seront pas explicités ici, car la bibliographie dédiée est riche [9], [10], [11], [12], [13]. Néanmoins ils reposent tous sur certains principes fondateurs. Après avoir posé ces principes de la modélisation des comportements à travers le paradigme énergétique (§1.2.1), nous exposerons comment ce formalisme peut être mis sous forme de représentation graphique structurée (§1.2.2). Puis, nous illustrerons la méthodologie appliquée à deux cas d'étude et à travers deux outils de représentation graphique : la dynamique du vol dans le cas de la *Résonance Air* (§1.2.3) et la synthèse des lois de commande des organes de la chaîne de commande de vol (§1.2.4).

Une grandeur est commune aux différents domaines de la physique (fig. 1-2) : l'énergie (une même unité, le joule J). Cette notion, introduite sous une autre appellation par Lagrange permet d'obtenir les équations du comportement par une approche variationnelle. Ses travaux sont repris par Hamilton (début XIX^e) qui proposa une expression plus décomposée du comportement, mais surtout introduit la définition de l'énergie totale d'un système mécanique. Joule (1843) propose la première extension de l'énergie à un autre domaine de la physique : l'énergie calorifique. Planck (1887) généralisa le concept à tous les domaines de la physique, et par cela posa les bases de la mécanique quantique.

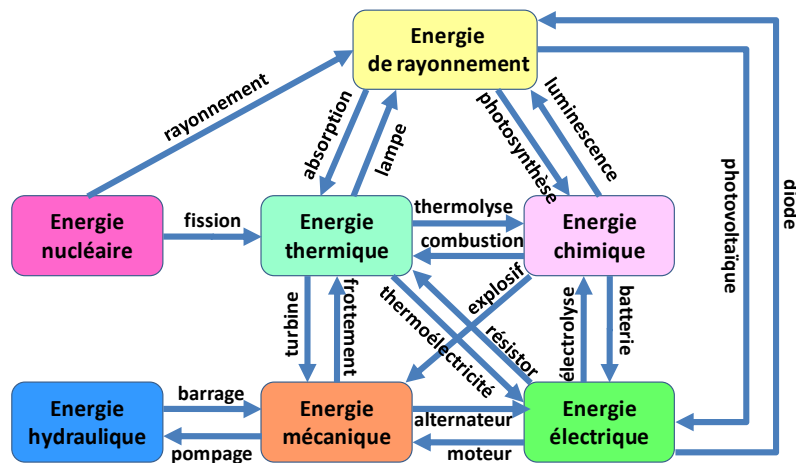


fig. 1-2 – Les domaines de la physique [14]

Il aura donc fallu attendre le XIX^{ème} siècle pour que le principe de conservation de l'énergie soit envisagé dans tous les domaines de la physique. Ce principe dit : « tout ensemble ou système isolé a une quantité d'énergie H qui se conserve ». Au sein du système, cette énergie n'est pas forcément figée. Elle peut évoluer d'un lieu à un autre. Mais, globalement, elle est constante.

Système Σ
 $H = cst.$

fig. 1-3 – Système isolé

Si l'on considère deux sous-ensembles (Σ_1 et Σ_2), une énergie peut être transmise de l'un à l'autre (en un point, à travers une surface, etc.). Le transfert (ou flux) d'énergie par unité de temps est défini par la puissance P : (unité : le watt W).

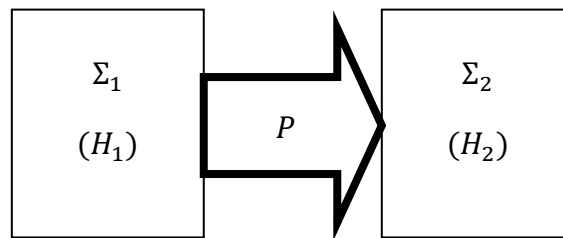


fig. 1-4 – Transfert de puissance

Dans ce cas, P sera définie positive pour Σ_2 : puissance entrante ; et négative pour Σ_1 : puissance sortante. Sous l'effet de ce transfert d'énergie, les propriétés de Σ_1 et de Σ_2 sont modifiées. L'énergie peut alors être définie au sens physique comme quantifiant la capacité de Σ_1 à modifier Σ_2 . Notons qu'un système non isolé échange donc de l'énergie avec son environnement. Elle suit la loi :

$$\frac{dH}{dt} = \sum P_{\text{échangées}} \quad (1-1)$$

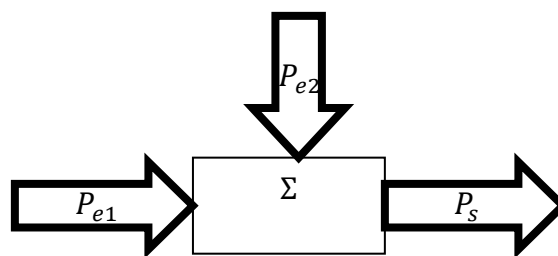


fig. 1-5 – Transfert multiple de puissance

On utilise aussi l'expression : « dissipation d'énergie ». L'énergie ne disparaît pas ainsi. A travers cette expression, on précise qu'une quantité de l'énergie disponible est transformée sous forme de chaleur (d'énergie calorifique). Dans de très nombreuses applications, cette chaleur n'est pas exploitable. Elle est donc « perdue », évacuée pour éviter d'endommager certains composants. Finalement, l'énergie peut être stockée dans un organe, transmise d'un organe à un autre, dissipée au sein d'un organe. Ce qui suit est donc vrai pour tous les domaines physiques.

Au-delà du sens physique qu'il est possible d'attribuer à la notion d'énergie, cette dernière doit être mathématiquement définie. Nous allons préciser cette définition dans le cadre de comportements élémentaires (simplistes), puis généraliser cette définition aux cas plus compliqués. Pour mettre en évidence un comportement élémentaire, nous partons d'une équation différentielle d'ordre 1 linéaire (à coefficient constant).

Supposons une loi de comportement élémentaire (relation constitutive) entre deux grandeurs $u(t)$ et $y(t)$ d'un composant décrivant $y(t)$ comme étant proportionnelle à l'intégrale première de $u(t)$.

Définition 1-1 : *Comportement élémentaire de type intégral*

$$b \cdot \frac{d y(t)}{dt} = u(t) \quad (1-2)$$

Introduisons une nouvelle grandeur $x(t)$, appelée variable d'état énergétique, telle que :

$$\frac{dx}{dt} = b \cdot \frac{d y(t)}{dt} = u(t) \quad (1-3)$$

Alors :

$$x(t) = \int_0^t u(t)dt + x(0) \quad (1-4)$$

où $x(0) = x_0$ est la condition initiale sur x .

Pour la suite, nous considérerons cette condition initiale nulle (état énergétique nul à l'instant initial). Les démonstrations restent vraies en cas de condition initiale non nulle.

Le comportement s'écrit sous la forme intégrale (relation constitutive du comportement) :

$$y(t) = \frac{1}{b} \int u(t)dt = \frac{1}{b} x(t) \quad (1-5)$$

L'énergie peut alors être introduite.

Définition 1-2 : *L'énergie associée à un comportement élémentaire de type intégral est définie par une fonctionnelle $H(x)$ de classe C^2 , si elle existe, telle que :*

$$y(t) = \frac{dH}{dx} \quad (1-6)$$

$H(x(t))$ est appelée l'énergie stockée dans le composant.

On démontre alors :

$$dH = y(t)dx \quad (1-7)$$

$$H = \int y(t)dx = \int \frac{1}{b} x(t)dx = \frac{1}{2} \frac{x^2(t)}{b} \quad (1-8)$$

Le comportement du composant est alors régi par les équations (1-9) :

$$\begin{cases} x(t) = \int u(t)dt \\ H(x) = \frac{1}{2} \frac{x^2(t)}{b} \\ y(t) = \frac{dH}{dx} \end{cases} \quad (1-9)$$

Ou plus simplement, sans faire apparaître l'expression de l'énergie :

$$\begin{cases} x(t) = \int u(t)dt \\ y(t) = \frac{x(t)}{b} \end{cases} \quad (1-10)$$

C'est sous l'une des trois formes (1-2), (1-9) ou (1-10) que les équations d'un comportement élémentaire de type stockage d'énergie seront renseignées dans les outils de modélisation multi-physique. Si les démonstrations se sont limitées au cas linéaire (b constant), elles peuvent tout à fait être développées au cas non linéaire où $b(x)$ dépend de l'état x , l'équation (1-8) devant tenir compte de l'expression de $b(x)$.

Ces expressions du comportement sont exprimées sous forme explicite, autrement dit causale. Il est aussi possible de les exprimer sous forme implicite ou acausale. En effet, l'expression explicite ou implicite du comportement conditionne d'une part la modularité du modèle, et d'autre part l'algorithme de simulation du comportement. Le principe de la causalité physique stipule qu'un effet ne peut précéder la cause qui l'engendre. L'effet est lié à sa cause par une relation algébrique (instantanée) ou intégrale. On parle de **causalité intégrale**. C'est la forme de l'expression causale du comportement exprimé équation (1-10) : $u(t)$ est la cause, $y(t)$ est l'effet. Ici, le signe *égal* prend le sens d'affectation.

Numériquement, la **causalité intégrale** est calculable. D'autres cas sont envisageables. Un comportement exprimé en **causalité dérivée** correspond alors à l'expression inverse de la précédente : $y(t)$ est la cause, $u(t)$ est l'effet.

$$\begin{cases} x(t) = b.y(t) \\ u(t) = \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (1-11)$$

Elle trouve son utilité par exemple dans le cas d'une inversion de modèle. Cette démarche peut servir à la définition de commande par anticipation ou pour le dimensionnement. Dans le cas d'une utilisation d'un outil de simulation, formellement la dérivation ne pose aucun problème (outil MapleSim, par exemple). Numériquement, l'erreur de calcul reste bornée. Reste à définir les paramètres de simulation de façon à ce que cette erreur soit raisonnable. En revanche, il peut être utile de rappeler que l'usage d'une dérivée numérique dans une boucle d'asservissement reste à utiliser avec vigilance, à cause du déphasage qu'elle introduit en se rapprochant de la fréquence de repliement de spectre.

Pour ne pas contraindre le comportement trop tôt dans la démarche de modélisation en spécifiant une cause et un effet, certains outils de modélisation multi-physique utilisent une description **acausale** du comportement : parmi les deux grandeurs $u(t)$ et $y(t)$, la cause et l'effet ne sont pas précisés *a priori*. Ne sont spécifiées que les relations nécessaires à décrire le comportement. Elles peuvent prendre la forme implicite :

$$\begin{cases} 0 = x(t) - \int u(t)dt \\ 0 = b.y(t) - x(t) \end{cases} \quad (1-12)$$

1.2.1.2 Energie, puissance et tables d'analogie.

L'expression de ces comportements élémentaires étant identique pour tous les domaines de la physique, il est donc possible de mettre en évidence une analogie entre certaines variables spécifiques au domaine technologique concerné.

| Composant | | Grandeur descriptive du stockage d'énergie : b | Variable d'énergie : $x(t)$ | Expression de l'énergie stockée H [J] | (dans le cas d'une causalité intégrale) | |
|------------|--------------|--|---|--|---|---------------------------------|
| | | | | | Grandeur cause : $u(t)$ | Grandeur effet : $y(t)$ |
| Mécanique | Ressort | Compliance : C [m/N] | Allongement $q(t)$ [m] | $\frac{1}{2} \frac{q(t)^2}{C}$ | Vitesse de déplacement $V(t)$ [m/s] | Effort du ressort $F(t)$ [N] |
| | Inertie | Masse inertielle : m [kg] | Quantité de mouvement $p(t)$ [kg · m/s] | $\frac{1}{2} \frac{p(t)^2}{m}$ | Effort extérieur $F(t)$ [N] | Vitesse inertielle $V(t)$ [m/s] |
| Electrique | Bobine | Inductance : L [H] | Flux magnétique ϕ [Wb] | $\frac{1}{2} \frac{\phi(t)^2}{L}$ | Tension $v(t)$ [V] | Courant $i(t)$ [A] |
| | Condensateur | Capacité électrique : C [F] | Charge q [C] | $\frac{1}{2} \frac{q(t)^2}{C}$ | Courant $i(t)$ [A] | Tension $v(t)$ [V] |
| Etc. | | | | | | |

tab. 1-1 – Analogie sur l'énergie

On remarque que pour chaque domaine de la physique, deux types de stockage sont définis. L'appellation générale pour ceux-ci est respectivement stockage capacitif et stockage inertielle. Un stockage d'énergie peut accumuler la puissance qu'il reçoit (stockage d'énergie) ou la restituer (déstockage d'énergie).

Définition 1-3 : La puissance $P(t)$ échangée par le composant est la variation de son énergie par rapport au temps.

$$P(t) = \frac{dH}{dt} \tag{1-13}$$

$$P(t) = \frac{dH(x(t))}{dt} = \frac{dH}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = y(t) \cdot u(t)$$

La puissance instantanée est donc directement exprimée par le produit des grandeurs en interaction. Si elle est positive, $H(x)$ augmente avec le temps. $P(t)$ est l'énergie par unité de temps entrante dans le composant.

S'il a été abordé le cas d'une loi de comportement liant $u(t)$ et $y(t)$ de type différentiel, il est aussi nécessaire d'expliciter le comportement énergétique dans le cas d'une équation algébrique :

Définition 1-4 : *Un comportement élémentaire de type algébrique s'écrit :*

$$y(t) = c \cdot u(t) \quad (1-14)$$

Où c est une constante et $u(t)$ et $y(t)$ sont deux grandeurs d'un composant, paramétrées avec cohérence (même orientation). Le produit $D(t) = y(t) \cdot u(t) = c \cdot u^2(t)$ est homogène à une puissance. Autrement dit, $D(t)$ est la puissance traversant la frontière définissant le composant.

Cette puissance n'est pas stockée au sein du composant, puisque nous ne pouvons pas définir d'état énergétique $x(t)$, ni d'énergie $H(x)$. Elle est donc dissipée ou « créée ».

Deux cas sont envisageables :

- $D(t) \geq 0$, la puissance est reçue par le composant, qui ne la stocke pas. Il la dissipe. La puissance disparaît sous forme de chaleur (ce qui peut être décrit comme une élévation de la température). Le comportement est dit **passif** ou **dissipatif**. Forcément, $c > 0$;
- $D(t) < 0$, la puissance est sortante du composant. Le composant est une source de puissance. Cela implique une hypothèse sur celui-ci, comme par exemple une pile de capacité infinie. L'introduction de cette typologie de comportement dans un système est qualifiée de source active.

Remarquons que $P(t)$ est le produit de deux grandeurs quel que soit le domaine physique considéré. Voilà le point de départ qui permet de faire des analogies entre les comportements dans les différents domaines. Des tables d'analogie existent donc, mais ne respectent pas la même convention. Les formalismes de modélisation énergétique utilisent l'une de ces conventions. Selon une première convention (tab. 1-2), afin de faciliter les analogies, ces deux grandeurs $u(t)$ et $y(t)$ seront classées selon deux catégories : grandeur de flux $f(t)$ et grandeur d'effort $e(t)$.

| Domaine de la physique | Mécanique en translation rectiligne | Mécanique en rotation autour d'un axe fixe | Electrique | Hydraulique | Chimique | Etc. |
|--------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------|--|----------------------------------|------|
| Variable de flux $f(t)$ | Vitesse : $V(t)$ [m/s] | Vitesse angulaire : $\omega(t)$ [rad/s] | Courant : $i(t)$ [A] | Débit volumique : $Q(t)$ [m ³ /s] | Flux molaire \dot{n} [mol/s] | |
| Variable d'effort $e(t)$ | Force : $F(t)$ [N] | Couple : $C(t)$ [N·m] | Tension : $v(t)$ [V] | Pression : $p(t)$ [N/m ²] | Potentiel chimique μ [J/mol] | |
| Expression de la puissance [W] | $F \cdot V$ | $C \cdot \omega$ | $v \cdot i$ | $p \cdot Q$ | $\mu \cdot \dot{n}$ | |

tab. 1-2 – Analogie flux-effort

Cette classification présente l'intérêt de refléter une convention physique : dans les différents domaines de la physique, parmi les deux stockages d'énergie possibles, l'un est dit potentiel, l'autre est dit cinétique. L'énergie est dénommée potentielle lorsqu'elle ne dépend que de la configuration et de l'état physique et chimique du système. L'énergie est dénommée cinétique lorsqu'elle ne dépend que des mouvements de ses différentes parties. Dans les différents domaines de la physique, la grandeur « effet » sortante d'un stockage d'énergie potentielle est définie comme la variable d'effort.

La deuxième convention généralement utilisée est héritée des notations électriques (tab. 1-3) : la puissance aux bornes d'un composant électrique s'écrit $P_e(t) = v(t) \cdot i(t)$.

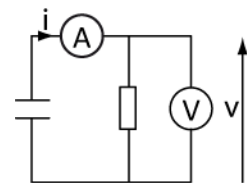


fig. 1-6 – Circuit électrique

- $i(t)$ traverse le composant. Elle se mesure en un point (en série avec le composant). Elle sera appelée variable **traversante**, ou *Through* en anglais ;
- $v(t)$ est définie comme une différence de potentiel aux bornes du composant. Elle se mesure entre 2 points (en parallèle avec le composant). Elle sera appelée variable **encadrante**, ou *Across* en anglais.

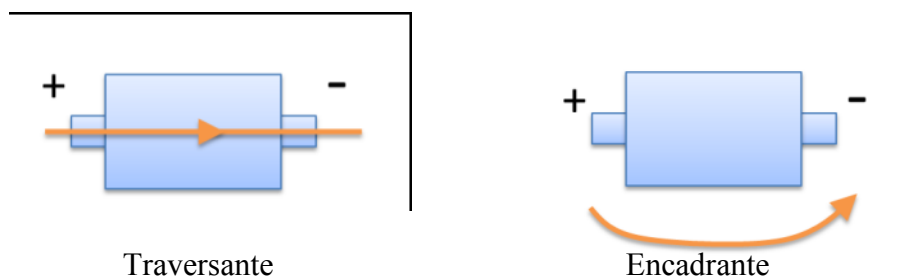


fig. 1-7 – Grandeurs traversante et encadrante

| | | | | | |
|----------------------|-------------------------------------|--|----------------------|--|------|
| Domaine du réel | Mécanique en translation rectiligne | Mécanique en rotation autour d'un axe fixe | Electrique | Hydraulique | Etc. |
| Variable encadrante | Vitesse : $V(t)$ [m/s] | Vitesse angulaire : $\omega(t)$ [rad/s] | Tension : $v(t)$ [V] | Pression : $p(t)$ [N/m ²] | |
| Variable traversante | Force : $F(t)$ [N] | Couple : $C(t)$ [N · m] | Courant : $i(t)$ [A] | Débit volumique : $Q(t)$ [m ³ /s] | |

tab. 1-3 – Analogie traversante-encadrante

Les différents formalismes et outils de représentations utiliseront l'une ou l'autre des tables d'analogies. Par exemple, la représentation bond graph utilise la convention *effort-flux* (tab. 1-2). Le langage Modelica utilise, lui, la convention *encadrante-traversante* (tab. 1-3). Cette distinction de convention aura une conséquence sur l'usage de l'outil de représentation utilisé. Mais, notons que l'approche multi-physique reste identique dans les deux cas.

1.2.1.3 Comportements non élémentaires : formalisme hamiltonien à ports

A ce stade, nous avons défini deux équations de comportements élémentaires : relation algébrique ou intégrale entre les grandeurs $u(t)$ et $y(t)$ indépendante des variables d'espace. Si le système considéré est en interaction avec l'extérieur, selon les hypothèses, il sera en interaction en un point, à travers une surface ou sur tout un volume. Nous nous limitons au cas d'interactions colocalisées en un ou plusieurs points. Le cas de lois de comportement sur une surface ou un volume faisant apparaître des équations aux dérivées partielles par rapport aux variables d'espace ne sera pas abordé. Les comportements seront aussi limités à des modèles à paramètres localisés. Le cas de la modélisation multi-physique répartie sur des volumes ou à travers des surfaces n'est pas développé dans ce présent mémoire.

Définition 1-5 : Port : Représentation ponctuelle d'un lieu physique d'interaction entre une grandeur notée $u(t)$ et une autre grandeur notée $y(t)$. Il est situé à la frontière d'un ensemble isolé.

Le couple $\{u, y\}$ forme les grandeurs en interaction au port, $\{u\}$ étant le vecteur des variables d'action et $\{y\}$ étant le vecteur des variables de réaction. Le produit scalaire $\{y\}^T \cdot \{u\}$ représente la puissance échangée au port.

Les équations issues des principaux fondamentaux de la physique régissant les comportements ne sont que rarement élémentaires. Le modèle associé présentera un niveau de complication supérieur et sera décrit par une équation différentielle d'ordre supérieur ou égal à 1, à coefficients variants ou constants. Si ce type de modèle est tout à fait acceptable pour être simulé numériquement, l'analyse du comportement n'est pas immédiate car le contenu de l'expression mathématique du comportement n'est pas explicite.

Afin de dégager une expression au contenu plus explicite, il est tout à fait possible de retranscrire un comportement compliqué en une composition de comportements élémentaires dans une démarche de modélisation [15]. Dans le cas d'une équation différentielle à coefficients constants, cette décomposition peut prendre la forme d'une représentation d'état à matrice compagne. Notons que cette représentation ne respecte pas forcément le paradigme énergétique. Le formalisme adapté à cette expression mathématique du comportement d'un ensemble isolé porte le nom de *formalisme hamiltonien à ports*.

Comme précédemment, la démarche de modélisation s'appuie sur l'expression de l'énergie totale contenue dans l'ensemble isolé, qui peut comprendre plus d'un stockage. Si cet ensemble isolé ne fait pas apparaître de dissipation, l'énergie totale stockée dans l'organe est constante (avec H explicitement indépendant du temps ($\frac{\partial H}{\partial t} = 0$)).

Afin d'exprimer H , nous définissons $\{x_g\}$ le vecteur d'état généralisé associé au système étudié, et dont les variables sont judicieusement choisies parmi les variables d'énergie du tab. 1-1. $H(\{x_g\})$ est de classe C^2 . $\{x_g\} = \{q_g, p_g\}$ est formé des variables d'état énergétique associées respectivement à des stockages d'énergie inertielle et potentielle d'un mécanisme et est de dimension $2n$.

Les équations canoniques de Hamilton, initialement obtenues par approche variationnelle sur le lagrangien d'un mécanisme [16], prennent la forme de l'équation (1-15) :

Définition 1-6 : *Equations canoniques de Hamilton :*

$$\{\dot{x}_g\} = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -I_n & 0 \end{bmatrix} \nabla H(\{x_g\}) \quad (1-15)$$

Propriété 1-1 : *La matrice hessienne de $H\{x_g\}$ (ou $J_{\nabla H}$) est symétrique*

Preuve : Le théorème de Schwarz rappelle : si $H(x)$ est C^2 , pour $i \neq j$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \quad (1-16)$$

Cette propriété s'illustre par exemple dans le cas de la matrice d'inductance d'un moteur synchrone à aimant permanent (stockage d'énergie magnétique), ou pour la matrice d'inertie d'un corps (stockage d'énergie cinétique).

Propriété 1-2 : *Dans le cas d'un comportement linéaire : $J_{\nabla H} = [Q] = cst$, et :*

$$H = \frac{1}{2} \{x_g\}^T \cdot [Q] \cdot \{x_g\} \quad (1-17)$$

$[Q]$ est la matrice jacobienne des équations constitutives du comportement.

Preuve : si le comportement est linéaire, d'après (1-15) :

$$\nabla H(\{x_g\}) = [Q] \cdot \{x_g\}$$

Propriété 1-3 : *Le système est conservatif si : $\frac{dH}{dt} = 0$*

Preuve :

$$\frac{dH}{dt} = \left\{ \frac{\partial H}{\partial x_g} \right\}^T \cdot \left\{ \frac{dx_g}{dt} \right\} = \nabla H^T \cdot \dot{x}_g \quad (1-18)$$

$$\frac{dH}{dt} = \nabla H^T \begin{bmatrix} 0 & Id \\ -Id & 0 \end{bmatrix} \nabla H = 0$$

Lors du paramétrage du mécanisme, ou pour un système autre que mécanique, les coordonnées mises en place ne correspondent pas forcément aux coordonnées généralisées. Il est alors plus aisé d'utiliser les coordonnées locales. Le vecteur d'état s'écrit alors $\{x\}$. Les équations de Hamilton deviennent alors :

Définition 1-7 : *Formalisme hamiltonien associé à un système conservatif isolé :*

$$\{\dot{x}\} = [J(x)] \cdot \nabla H(\{x\}) \quad (1-19)$$

Où $[J(x)]$ est la matrice de structure énergétique de l'ensemble isolé. Elle décrit les échanges d'énergie possibles entre les différents stockages. La structure est dite conservative.

Propriété 1-4 : *$[J(x)]$ est une matrice anti-symétrique*

Preuve : Cf [16], chapitre 6, p. 143

Définition 1-8 : *Formalisme hamiltonien associé à un système non isolé, dont la structure est conservative et affine par rapport aux excitations $\{u\}$:*

$$\{\dot{x}\} = [J(x)] \cdot \nabla H(\{x\}) + [g(\{x\})] \cdot \{u\} \quad (1-20)$$

où $[g]$ est la matrice reliant les actions $\{u\}$ aux stockages d'énergie.

Propriété 1-5 : *Les réactions aux ports s'expriment par la relation :*

$$\{y\} = [g(x)]^T \cdot \nabla H(\{x\}) \quad (1-21)$$

Preuve : La structure étant conservative ($[J(x)]$ anti-symétrique) :

$$\frac{dH}{dt} = \{y\}^T \cdot \{u\} \quad (1-22)$$

Or :

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \nabla H^T \cdot \{\dot{x}\} = \nabla H^T ([J(x)] \cdot \nabla H + [g(x)] \cdot \{u\}) \\ &= \underbrace{\nabla H^T [J(x)] \nabla H}_{=0} + \nabla H^T ([g(x)] \cdot \{u\}) = \{y\}^T \cdot \{u\} \end{aligned} \quad (1-23)$$

Donc : $\nabla H^T [g(x)] = \{y\}^T$

Les systèmes conservatifs sont rares dans notre environnement proche. Dans la majorité des cas, les systèmes physiques sont dits passifs.

Définition 1-9 : Système passif : un système est passif s'il ne stocke pas plus d'énergie que celle fournie par son environnement, la différence entre les deux étant l'énergie dissipée :

$$H(x(t)) - H(x(0)) \leq \int_0^t \{y\}^T \cdot \{u\} d\tau \quad (1-24)$$

ou :

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \leq \{y\}^T \cdot \{u\} \quad (1-25)$$

Introduisons dans l'expression hamiltonienne les comportements non conservatifs à travers une matrice de dissipation $[R(x)]$:

Définition 1-10 : Formalisme Hamiltonien à ports (ISO PHS)

$$\begin{aligned} \{\dot{x}\} &= [J(x) - R(x)] \cdot \nabla H(x) + [g(x)] \cdot \{u\} \\ \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \end{aligned} \quad (1-26)$$

Propriété 1-6 : Le système est passif si et seulement si $[R(x)]$ est une matrice définie positive.

Preuve :

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \nabla H^T \cdot \dot{x} = \nabla H^T ([J(x) - R(x)] \nabla H(x_g) + [g] \cdot \{u\}) \\ \frac{dH}{dt} &= \underbrace{\nabla H^T [J(x)] \nabla H(x_g)}_{=0} - \nabla H^T [R(x)] \nabla H(x_g) + \{y\}^T \cdot \{u\} \end{aligned} \quad (1-27)$$

Donc $\frac{dH}{dt} \leq \{y\}^T \cdot \{u\}$ si et seulement si $R(x)$ est définie positive.

Un comportement physique exprimé dans le formalisme hamiltonien à ports est donc défini *a minima* par l'équation (1-26) et :

- une matrice de structure $[J(x)]$;
- une matrice de dissipation $[R(x)]$;
- une matrice sur les entrées $[g(x)]$;
- un Hamiltonien $H(x)$;

où $x \in X$, coordonnées locales, $\{u\}$ les grandeurs d'action aux ports, $\{y\}$ les grandeurs effet. Si l'introduction du formalisme s'est focalisée sur l'expression d'un comportement linéaire, le formalisme peut être généralisé à un comportement dynamique invariant par rapport au temps et affine par rapport aux entrées et non linéaires par rapport à l'état, c'est-à-dire une représentation d'état de type de l'équation (1-28)).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t)) \cdot \{u\} \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (1-28)$$

1.2.2 Structure du système et sa représentation graphique

L'approche de modélisation énergétique est donc particulièrement adaptée à la description des comportements physiques des organes. Cependant l'objet d'étude n'est ici pas un simple organe, mais un système. Rappelons une définition de système : ensemble d'éléments en interaction, organisés pour atteindre un ou plusieurs résultats déclarés [17]. Dans la mesure où la connaissance *a priori* du système décrit un tout composé d'organes interagissant à travers des flux de puissances (échangeant de l'énergie), il peut être mis sous la forme d'un réseau d'organes liés par des flux d'énergie. Les liens entre ces organes définissent la structure énergétique du système. La modélisation de ces éléments de connaissance amène au modèle structurel du système. De même, dans une démarche de conception d'un nouveau système, une des premières étapes est la conception de l'architecture du système, c'est-à-dire la définition du réseau d'organes et de sa structure énergétique, et l'émergence du modèle structurel.

Définition 1-11 : Modèle structurel : « modèle [...] où l'on ne retient du modèle de comportement que l'existence ou l'absence (1 ou 0) de liens, de contraintes entre les variables de description du système. Il est de nature qualitative, c'est le plus simple, mais aussi le plus pauvre, que l'on puisse élaborer par abstraction des relations du modèle de comportement. » [18]

De par sa nature binaire (existence ou absence de lien), un modèle structurel peut facilement être décrit par un graphe (au sens de la théorie mathématique du même nom). Or, à un graphe est associée une représentation symbolique où les nœuds ou sommets sont reliés par des liens ou arcs. La représentation graphique d'un système découle naturellement de son modèle structurel : les liens physiques sont représentés par des arcs, les organes ou comportements par des nœuds dont le symbole varie selon l'outil. L'association de nombreux composants forme un réseau. Les composants présentent des ports qui sont les points de connexion au réseau. Ces ports modélisent deux grandeurs physiques (flux/effort ou encadrante/traversante selon la convention). Le réseau lie les ports, et indirectement les comportements de chaque composant, indépendamment de toute étude causale. Il peut servir à obtenir le comportement global qui sera l'objet de l'étude. Les représentations graphiques des systèmes sont depuis très longtemps utilisées pour représenter des domaines spécifiques (tel qu'illustré fig. 1-8 et fig. 1-9).

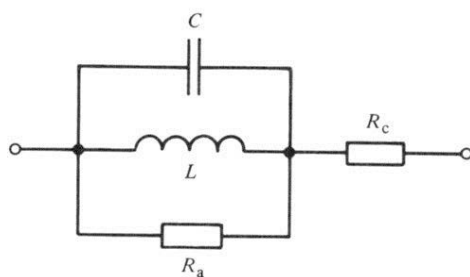


fig. 1-8 – Schéma électrique

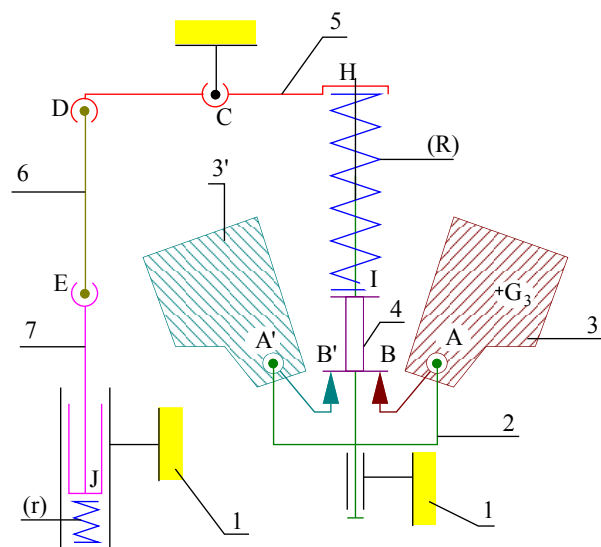


fig. 1-9 – Schéma cinématique d'un régulateur de Watt

Un point fondamental distingue les outils de représentation graphique : l'orientation ou la non-orientation des arcs du graphe. Dans le cas où un graphe est orienté, le lien entre deux composants est dit causal. L'information relative à une grandeur physique supportée par le lien est émise par un nœud et reçue par un autre. A un nœud, modélisant un composant ou un comportement, est donc associée une loi de comportement exprimée sous forme explicite ou causale, dans la grande majorité des cas en causalité intégrale. Un exemple d'outil de représentation présentant cette caractéristique est le Graphe Informationnel Causal [19], [20].



fig. 1-10 – Représentation graphique (a) et comportement associé (b) d'un modèle causal

Les deux grandeurs u et y forment l'interaction de l'organe avec le réseau. L'ensemble des organes formant le système peut être représenté par un réseau de comportements causaux (fig. 1-11).

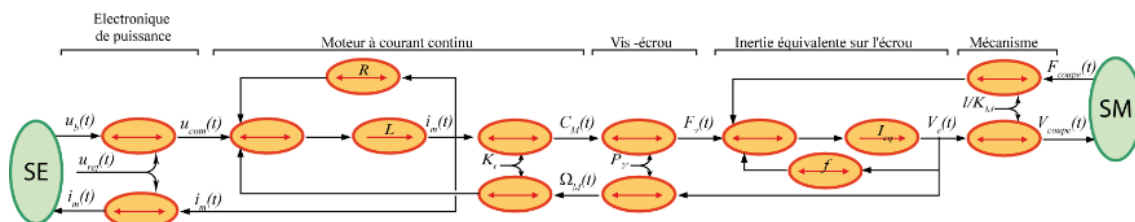


fig. 1-11 – Représentation graphique causale d'un réseau d'une chaîne électro-mécanique

Il existe de nombreux outils de représentation graphique causaux. Le plus répandu d'entre eux est le schéma bloc. On peut aussi citer la Représentation Énergétique Macroscopique ou *R.E.M.* [21], [22]. Mais, de par leur nature causale (cheminement orienté d'une information modélisant un phénomène), ils peuvent être utilisés pour modéliser d'autres types de flux que ceux de puissance, notamment des flux de matières ou d'informations. Dans notre cas d'étude, la modélisation de ce dernier type de flux est tout aussi nécessaire que celle d'un flux de puissance. Pour maîtriser des comportements, des capteurs et le traitement des informations délivrées par ceux-ci sont nécessaires. Un outil de représentation causal permet donc la double représentation des phénomènes physiques et de leurs liens, ainsi que des informations, leurs cheminements et leurs traitements.

Dans le cas d'un graphe non orienté représentatif des phénomènes physiques à travers le paradigme énergétique, l'appellation dédiée est la modélisation multi-physique. Il existe de nombreux formalismes et outils logiciels associés. On peut citer *Scilab/Xcos/Coselica*, *Matlab/Simulink/Simscape*, *ImagineLAB/AMESim*, *MapleSim/Modelica*, *Dymola/Modelica*, *20-Sim/Bond-Graph*, *OpenModelica/Modelica*, etc. Ils fonctionnent presque tous sur les mêmes principes de modélisation et d'utilisation. Toutefois, il convient de différencier deux catégories selon la symbolique utilisée : un symbole (signifiant) peut faire référence à un organe ou un comportement. Dans le premier cas, celui de *Modelica* par exemple, le signifié est avant tout un composant appartenant à un domaine technique ou physique ; son comportement, encapsulé dans sa description, n'est utile qu'à la simulation numérique. Dans le deuxième cas, celui du *bond graph*, le signifié est un comportement ; une annotation pourra préciser le composant concerné. L'usage du modèle sera alors différent, ce qui sera détaillé plus loin.

Dans les deux cas, la nature cause et effet du couple d'interaction $\{u, y\}$ reste *a priori* indéterminée. La notation u pour la cause et y pour l'effet est alors inadaptée. Aussi, nous utiliserons la convention d'analogie *effort-flux* (voir tab. 1-2). Ces deux grandeurs apparaissant en un même point, elles sont représentées graphiquement en un même port. L'arc ayant pour extrémité ce port contient donc deux informations : le couple $\{e, f\}$. Une (demi-)flèche pourra apparaître pour préciser la convention de signe utilisée (fig. 1-12).

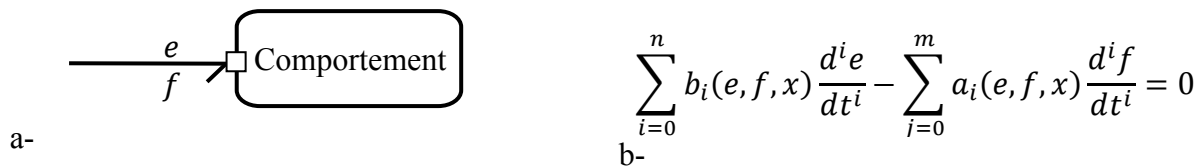


fig. 1-12 – Représentation graphique (a) et comportement associé (b) d'un modèle acausal

(cas du bond graph)

La représentation graphique met donc en évidence une structure énergétique du modèle.

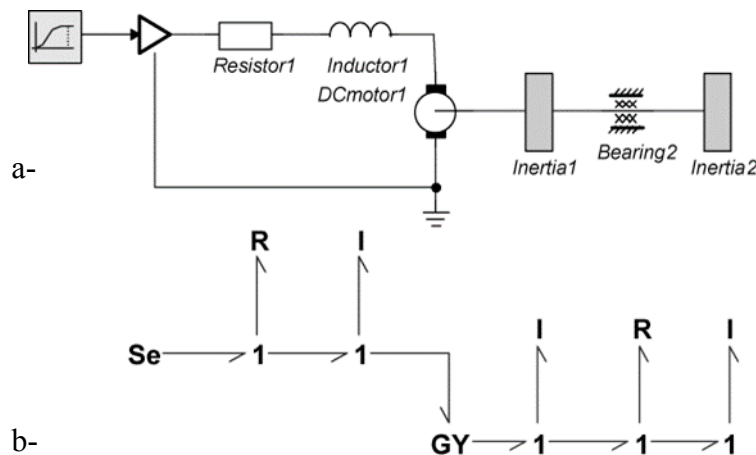


fig. 1-13 – Représentation graphique acausale d'un réseau (a- modelica b- bond graph)

Propriété 1-7 : *La structure énergétique du système est une structure de Dirac [23]. Les transferts de puissance au sein du système se font sans perte. La somme des puissances aux n ports des composants du système est nulle.*

$$\sum_{i=0}^n e_i \cdot f_i = 0 \text{ (où } i \text{ est l'indice du port)} \tag{1-29}$$

Propriété 1-8 : *A un bond graph correspond à une représentation hamiltonienne à ports [24] .*

Propriété 1-9 : *L'interconnexion de deux systèmes hamiltoniens à ports est un système hamiltonien à ports (fig. 1-14 et fig. 1-15). [25], [26], [27]*

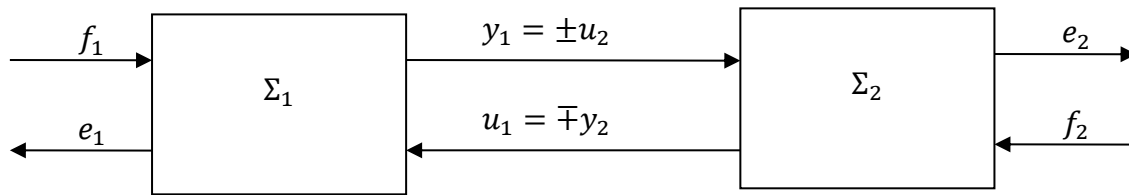


fig. 1-14 – Interconnexion de systèmes hamiltoniens

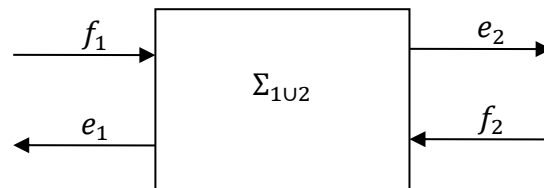


fig. 1-15 – Représentation macroscopique de l'interconnexion

Chaque comportement étant modélisable dans le formalisme hamiltonien à ports, le comportement global peut être obtenu par interconnexion des comportements. De façon inverse, il est aussi possible de décomposer un comportement exprimé dans le formalisme hamiltonien à ports en un réseau de comportements élémentaires (stockage d'énergie ou dissipation) reliés par une structure d'énergie. Tout comportement physique, même complexe, peut trouver une représentation graphique mettant en évidence ses comportements élémentaires. C'est le principe du formalisme bond graph [11] qui décompose tout système en comportements élémentaires liés par une structure (fig. 1-13-b) et peut être complété par un formalisme moins détaillé, le bond graph à mot, pour lequel un bloc peut modéliser un comportement non élémentaire. Rappelons que l'extension à certains domaines (cinétique chimique, thermodynamique, etc.) présentent des divergences par rapport aux définitions précédentes. On utilise alors des pseudo bond graph et ou un formalisme pseudo hamiltonien.

1.2.3 Illustration 1 : cas de la dynamique du vol d'hélicoptère - résonance Air

Comme précisé précédemment, un hélicoptère est un système dont les principaux organes sont en interaction physique. Il est donc possible de représenter ce dernier par une approche énergétique. Dans un premier temps, afin de proposer un synoptique global de la structure physique liant les principaux organes, les travaux réalisés dans le cadre de la Chaire [7] ont choisi le formalisme bond graph à mots (fig. 1-16). Le détail de ce formalisme, non explicité ici, peut être retrouvé dans [11] ou [27]. L'intérêt de ce formalisme est de représenter les principaux organes par des blocs encapsulant leurs constituants et comportements ; les liens d'interaction sont explicitement représentés par un arc entre deux blocs. Le caractère acausal des liens permet une souplesse et une modularité dans l'usage de cet outil. La représentation obtenue est une représentation macroscopique de haut niveau.

Un hélicoptère en phase de vol (fig. 1-16) se caractérise donc par une structure porteuse (fuselage), supportant et interagissant avec un certain nombre d'organes. D'une part, le moteur principal ou turbine transmet sa puissance aux rotors, principal et de queue, par des liens mécaniques (transmission et liaisons). Les interactions aérodynamiques assurent la sustentation

de l'engin. D'autre part, le pilote assure à travers les commandes de vol les modulations d'interactions nécessaires à atteindre les dynamiques et trajectoires souhaitées.

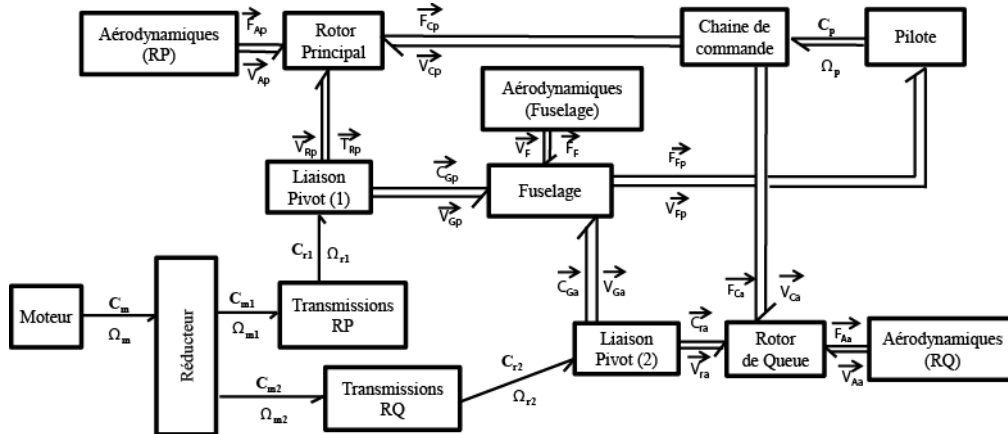


fig. 1-16 – Représentation macroscopique d'un hélicoptère [7]

Afin de compléter cette représentation macroscopique, nous devons détailler le contenu de chaque bloc. Rappelons (fig. 1-17 et fig. 1-18) la structure mécanique du rotor principal d'un hélicoptère, principale difficulté de modélisation, car elle constitue un mécanisme multi-corps complexe.

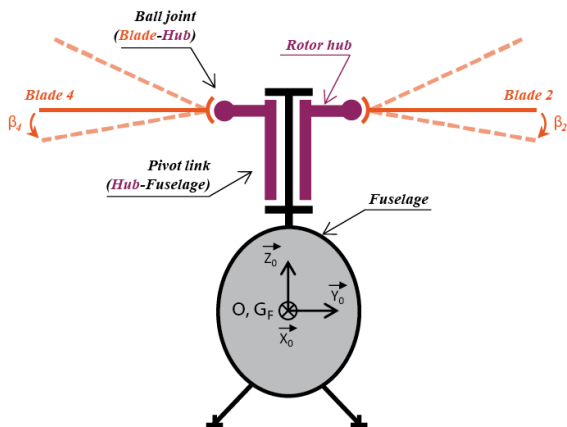


fig. 1-17 – Synoptique de la cinématique d'un hélicoptère en vol [7]

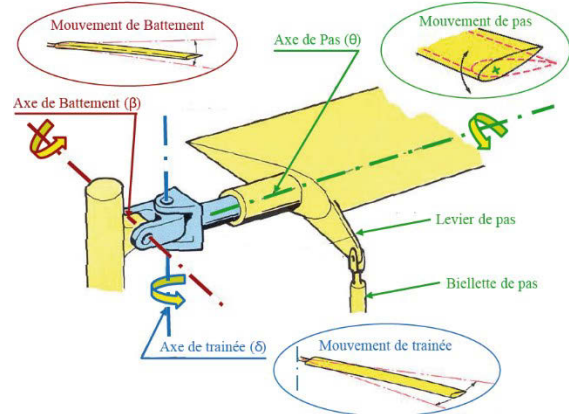


fig. 1-18 – Détail de l'articulation pale-mât [7]

Il est alors possible de représenter cette structure mécanique en utilisant un formalisme dédié aux problèmes mécaniques : le multi-bond graph [28]. Il est alors proposé une représentation intermédiaire de la structure du rotor principal (fig. 1-19), représentant corps et liaisons. Chaque bloc peut être représenté au plus haut niveau de détail, faisant apparaître une structure de comportements élémentaires symbolisés par trois lettres : **I** pour un stockage inertiel, **C** pour un stockage capacitif, et **R** pour une dissipation d'énergie (fig. III-23 et III-24 dans [7]). La mise en évidence des comportements élémentaires et de leur qualité est un atout essentiel du bond graph, car elle permet d'une part la mise en avant des comportements pour leur analyse, et borne d'autre part la modélisation à des comportements purement physiques. Enfin, elle matérialise les hypothèses de modélisation.

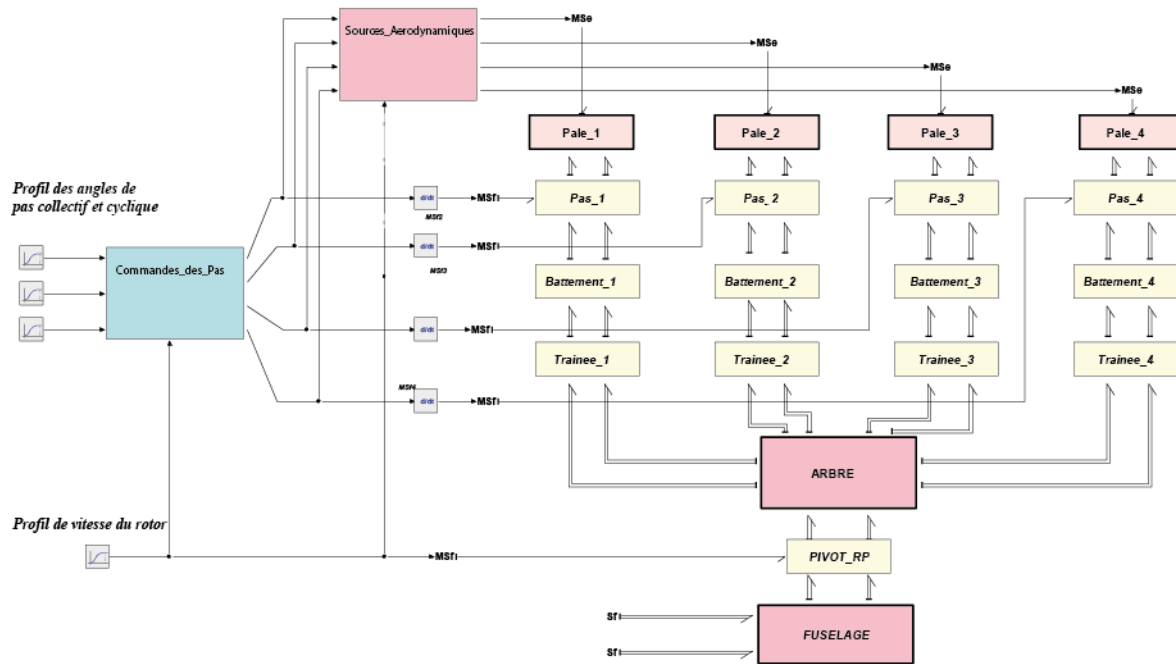


fig. 1-19 – Modèle multi-bond graph de l'hélicoptère [7]

Globalement, le modèle obtenu est acausal et présente trois niveaux de granularité complémentaires et nécessaires à la description de tous les phénomènes. Il peut être utilisé pour analyser ses propriétés [29], vérifier le comportement global à travers une simulation numérique, et/ou améliorer ses performances à travers une reconception. Pour pouvoir mener ces activités, il reste nécessaire de rendre le modèle causal en privilégiant la causalité intégrale pour faciliter la simulation. La procédure SCAP [30], par exemple, permet l'affectation des causalités dans le réseau et pour chaque comportement. D'autres procédures existent, plus adaptées selon le problème [28]. Dans notre cas d'étude, l'affectation de causalité fait apparaître des causalités dérivées, ce qui traduit des boucles algébriques ou relations non-holonomes entre les états, mais qui n'est pas un frein à la simulation ni à l'analyse.

La capacité du modèle multi-physique à simuler numériquement un comportement complexe a été évaluée dans le cas de figure de la « Résonance Air ». En effet, l'interaction entre les pales et le fuselage via le mât fait apparaître un mode vibratoire dû au couplage dynamique entre ces corps par effet gyroscopique. Ce mode oscillant critique de la structure mécanique n'apparaît que pour certaines conditions de vol bien précises. Les résultats de cette démarche originale de modélisation ont été validés par comparaison des résultats de simulation du modèle proposé avec des résultats expérimentaux : la modélisation multi-physique est donc adaptée pour représenter, communiquer, analyser et simuler les dynamiques complexes des aéronefs à voilure tournante.

1.2.4 Illustration 2 : chaînes de commande de vol d'hélicoptère

Dans l'illustration précédente, les modèles présentés ne mettent en œuvre que des organes passifs, mis à part le moteur principal. L'approche multi-physique est aussi utilisée pour la modélisation d'organes actifs, source de puissance [20]. Dans le cas d'un hélicoptère, ses organes sont majoritairement commandés pour maîtriser les comportements, ce qui implique un traitement de l'information. Certains se retrouvent à l'interface avec le pilote. Or, il a été discuté de la criticité du rôle du pilote dans la maîtrise de la dynamique du vol, car c'est à lui que revient la tâche de moduler, via les commandes de vol, les efforts aérodynamiques de la voilure tournante. L'ensemble des organes (actifs ou passifs) permettant au pilote d'agir sur les orientations des pales est appelé *Chaîne de commande de vol* (CdV).

Il a été illustré que chaque pale est reliée au mât du rotor par une liaison à trois degrés de liberté en rotation. Afin d'en limiter les déplacements, des rigidités sont associées à chacune de ces degrés de liberté. Pour moduler la portance de chaque pale, la rotation de pas est pilotée, via une biellette de pas et un plateau cyclique (voir fig. 1-20). L'intérêt du plateau cyclique est de piloter l'angle de pas de chaque pale en fonction de sa position relativement au fuselage, afin d'atteindre un comportement moyen indépendant de la position instantanée du rotor [31]. Les commandes de vol visent donc à déplacer le plateau cyclique selon trois degrés de liberté : translation selon le mât (déplacement collectif) et deux rotations (roulis et tangage). Elles se composent d'organes passifs mécaniques (tringleries, renvois d'angle, combinateur, cloches de friction) et d'organes actifs (électriques et hydrauliques).

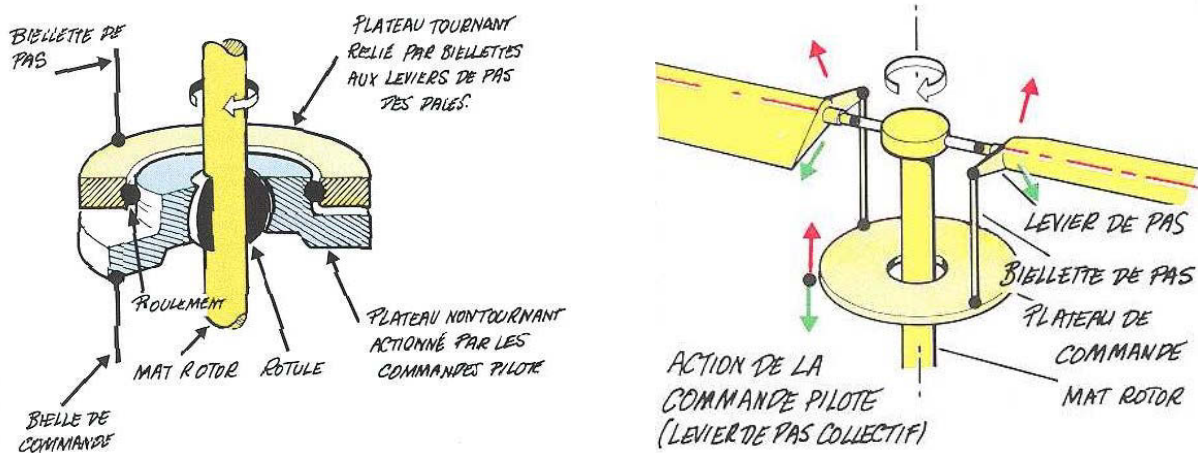


fig. 1-20 – Principe de fonctionnement du plateau cyclique [32]

Les travaux de M. Martin [33] ont visé l'amélioration du comportement de la chaîne actuelle de commande vol par l'amélioration des lois de commande des organes actifs sur la structure prédéfinie correspondant à un hélicoptère de fort tonnage (fig. 1-21). Ces commandes de vol incluent, en tant qu'organes actifs, deux étages d'assistance hydraulique (les servo-commandes principales [34] et le bloc d'assistance hydraulique), un organe de restitution d'effort (le *trim*) et des vérins de stabilisation visant à rejeter certains modes vibratoires.

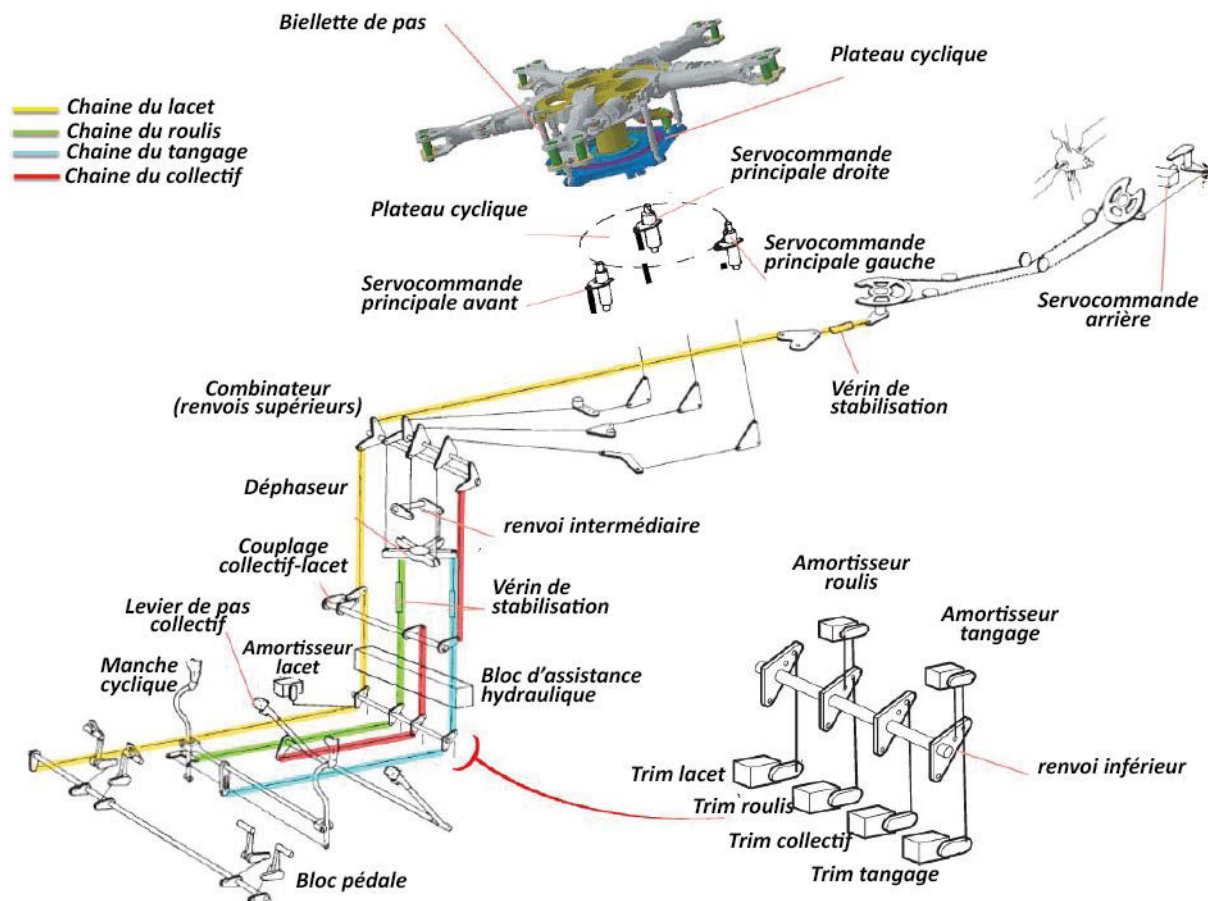


fig. 1-21 – Synoptique de la structure des CdV [33]

Les organes utilisés étant liés à des domaines de la physique différents, le paradigme énergétique a été utilisé. De plus, afin d'analyser et de représenter les cheminements et traitements des informations nécessaires au contrôle-commande, une représentation causale a été choisie : la Représentation Énergétique Macroscopique (voir p. 24). L'intérêt de cette approche est, d'une part, de cibler les comportements complexes, définis par des équations différentielles et donc modélisables par des stockages d'énergie, à travers un symbole dédié. D'autre part, afin de maîtriser au plus près les comportements complexes, une méthode de définition de loi de commande est associée à cet outil de représentation : l'inversion directe/indirecte [21]. On obtient alors un modèle multi-domaine (fig. 1-22) de la structure physique et de la structure du contrôle-commande. Cette représentation est qualifiée de cyber-physique (*cyber-physical* en anglais). Ce dernier fait apparaître un générateur de trajectoire. Pour définir la trajectoire, une commande à modèle de référence interne a été utilisée.

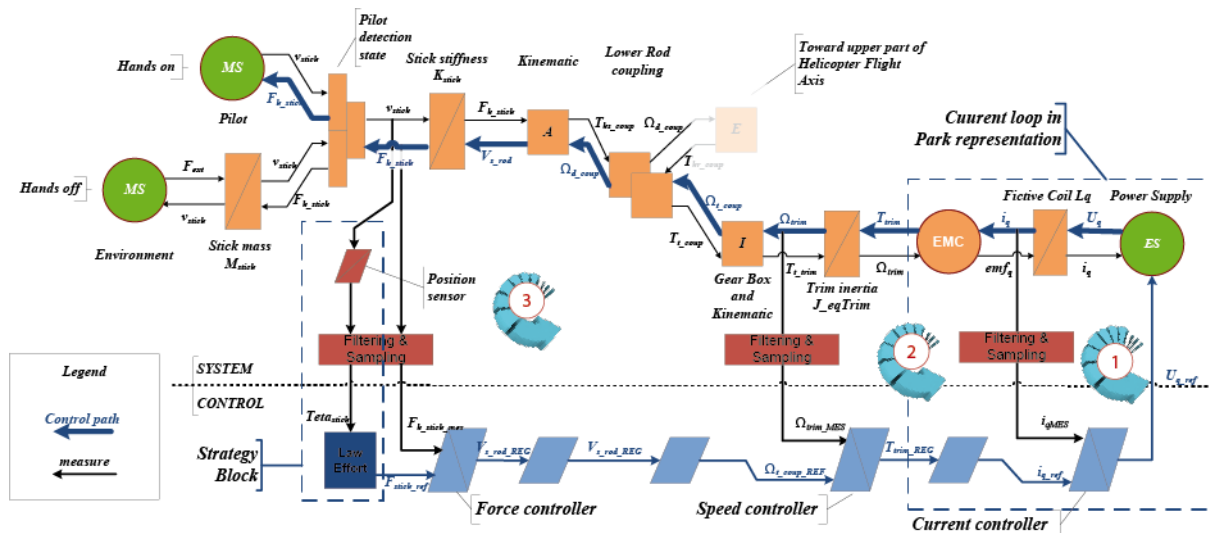


fig. 1-22 – Structure de contrôle obtenue par inversion du modèle [33]

1.3 Conclusion : des besoins méthodologiques

Un aéronef à voilure tournante est un système complexe de grande dimension. Le développement d'un tel produit s'appuie sur des activités d'ingénierie qui prennent place dans une démarche globale qui peut être celle du cycle de vie en V [35]. Parmi ces activités, les plus importantes sont d'une part la modélisation, la conception (architecture et dimensionnement) et l'intégration du produit et, d'autre part, la spécification et la vérification des performances. Les travaux de la Chaire ont mis en évidence qu'une approche modulaire multi-physique basée sur l'expression énergétique de la structure et des comportements permet de faciliter ces activités.

En effet, cette approche propose, sur une base commune d'appréhension des phénomènes physiques, deux descriptions complémentaires du système : l'expression mathématique de son comportement et la représentation graphique de sa structure. Cette double description peut être réalisée à différents niveaux de granularité ou d'échelle : niveau macroscopique ou système, niveau organique et niveau élémentaire (fig. 1-23).

Ainsi, la représentation de l'architecture est structurée. Un bloc d'un niveau donné porte un symbole, un nom ou une annotation, qui pourra référer au nom de l'organe ou à son comportement. A ce bloc est associée une expression mathématique de son comportement, permettant simulation, dimensionnement, etc. Il est alors possible de détailler ce bloc en décomposant son comportement en une structure de comportements plus élémentaires, et en représentant graphiquement cette structure détaillée. On passe alors d'un niveau supérieur de représentation à un niveau plus détaillé. Inversement, un bloc prendra place dans une structure plus large du système. On passe alors d'une représentation détaillée à une représentation macroscopique, le comportement général pouvant être obtenu par interconnexion.

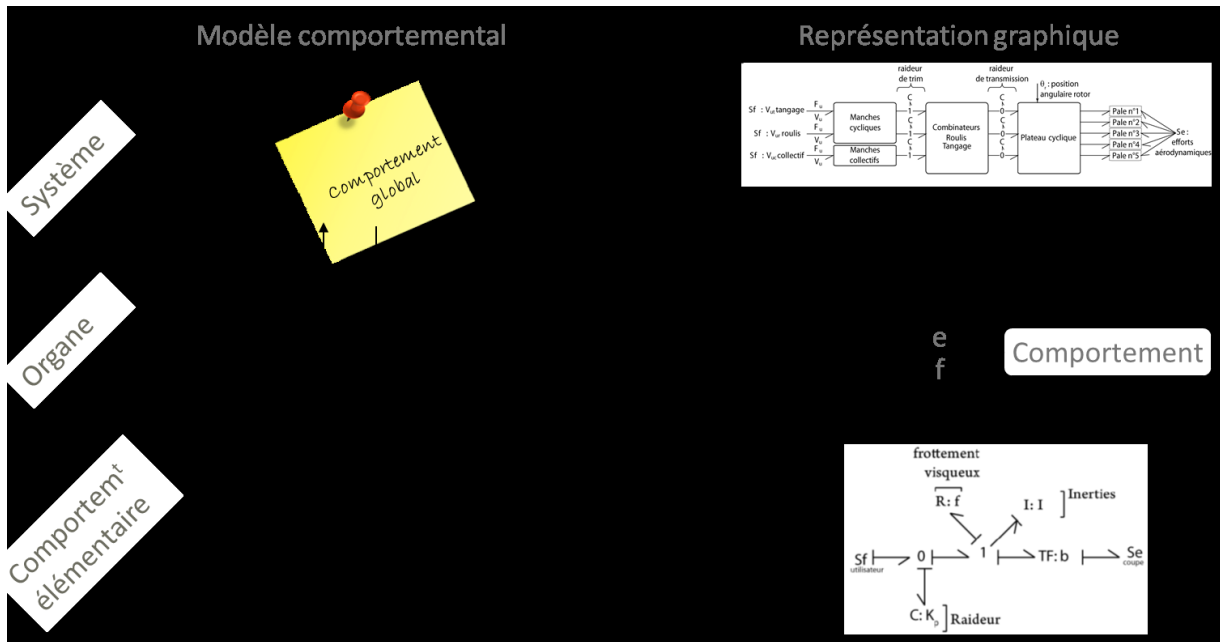


fig. 1-23 – Cartographie des représentations d'un système

Evidemment, toutes ces représentations aboutissent au même contenu sémantique de modèle. Le langage de modélisation reste indépendant de l'activité de modélisation ou de conception, même si ce premier influence le déroulement de cette dernière. L'ingénieur choisit alors la perspective adaptée à son besoin. L'approche énergétique a prouvé son efficacité à soutenir ces activités dans le cas de la dynamique du vol d'un aéronef à voilure tournante.

L'approche de modélisation multi-physique peut aussi être avantageusement utilisée pour la définition des structures des commandes : une représentation acausale permet d'enrichir la modularité du modèle, mais ne permet pas la représentation des cheminements d'informations. En utilisant de manière complémentaire une représentation acausale, utile dans une démarche de modélisation, et une représentation causale pour la définition d'une structure de commande telle que réalisée dans [33], il est possible de réaliser la modélisation et le contrôle-commande dans un même formalisme. Mais, cette démarche inclut une transformation d'une représentation acausale à une représentation causale, ce qui est tout à fait possible puisque les fondamentaux sont communs aux outils de représentation multi-physique [1].

Ces derniers travaux répondent au besoin de définition d'une structure de l'information. Mais, ils ne répondent pas aux questions : Où placer les organes actifs dans une structure complexe de grande dimension ? Ces organes et leur loi de commande peuvent-ils être représentés à un niveau de granularité plus grossier ?

Le présent rapport, en se focalisant sur une chaîne organique incluant de nombreux organes actifs, c'est-à-dire les commandes de vol, propose à travers une méthode originale une solution à ces préoccupations. Dans un premier temps, les particularités des commandes de vol assistées, leur modélisation et leur spécifications par le paradigme multi-physique, seront détaillées (chapitre 2). Ensuite, sera développée la méthodologie originale permettant de définir la localisation des organes actifs et leur loi de commande, ainsi que la représentation macroscopique qui peut en être faite (chapitre 3). Enfin, la méthodologie sera appliquée aux commandes de vol d'un hélicoptère de fort tonnage afin de vérifier sa pertinence (chapitre 4).

2 Systèmes d'assistance à opérateur : structure, modèles et spécifications

L'approche énergétique permet la modélisation multi-physique des structures et des comportements des systèmes, notamment des hélicoptères. Le pilote est en interaction physique avec son engin, à travers les commandes de vol mais aussi parce qu'il en est passager. A partir d'une certaine puissance motrice de l'aéronef, il est nécessaire d'assister le pilote dans son rôle. Les commandes de vol sont alors vues comme des Systèmes d'Assistance à Opérateur.

Après un rapide état de l'art de ce type de système §2.1, l'interaction physique et l'assistance sont définies §2.2. La modélisation et la spécification des comportements et des interactions à travers le paradigme énergétique est faite §2.3.

2.1 Les interfaces homme-machine en interactions physiques

Un pilote maîtrise son aéronef à travers trois commandes : le levier de pas collectif, le manche cyclique et le pédalier (fig. 1-21). L'influence de ces commandes sur la dynamique du vol n'est pas détaillée ici (voir [33] et [32]). Sur chacune des commandes de vol, le pilote applique un mouvement et un effort. Autrement dit, le pilote fournit une puissance musculaire physique pour les déplacer. L'interaction entre le pilote et les commandes de vol est de type physique. *A fortiori*, notons qu'un pilote normalement constitué possède une puissance musculaire moyenne inférieure à la centaine de Watt et que, à partir de celle-ci, il doit moduler la puissance transmittant au niveau du plateau cyclique du rotor principal, qui elle est de l'ordre du mégaWatt pour un hélicoptère de fort tonnage (fig. 2-1). On comprend aisément que la simple puissance musculaire du pilote ne peut permettre de moduler la puissance motrice du rotor. D'où la nécessité de fonctionnalité d'assistance : apporter un soutien à l'action musculaire à l'opérateur, échangeant énergie et information, à travers son ressenti, avec les commandes de vol.

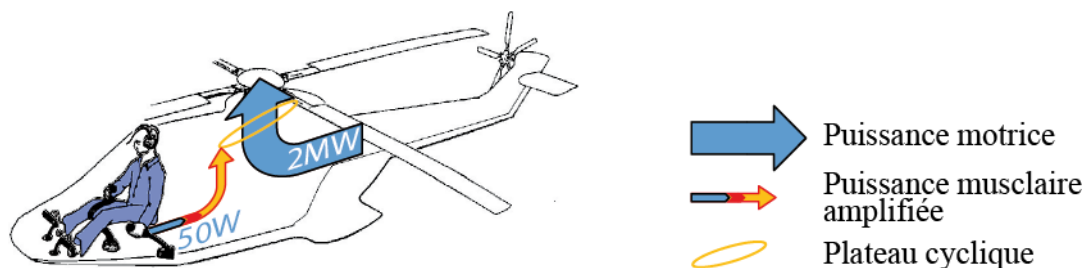
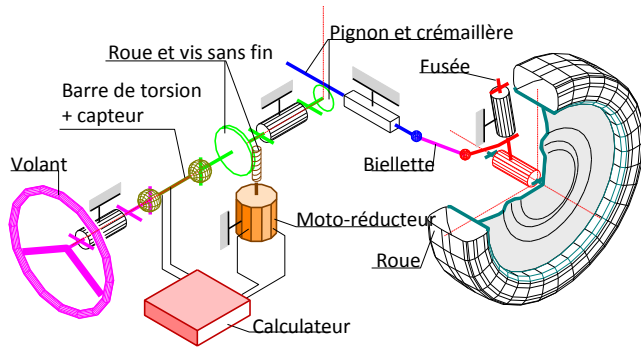


fig. 2-1 – Ordre de grandeur des puissances dans l'hélicoptère

Mais, ce problème n'est pas nouveau. De nombreux systèmes existent dans notre quotidien, sous l'appellation *systemes d'aide à l'action* (*Intelligent Assist Devices* (ou I.A.D. en anglais)). Ils visent à nous assister lors de notre action sur un objet ou charge, appelée **Matière d'Œuvre** par la suite. Les illustrations de la fig. 2-2 en présentent quelques exemples. A travers l'évolution de la robotique et surtout à cause des nouveaux besoins en termes d'assistance à la personne, le concept d'Interface Homme-Machine (I.H.M.) a été affiné pour tenir compte des interactions physiques à travers l'appellation *Physical Human-Robot Interaction* (phri) [36].



a – Direction Assistée Electrique (Renault)



c – Outil électroportatif d'aide à la coupe (Pellenc)



b – Vélo à assistance au pédalage (Yamaha)



d – Manipulateur Ergonomique (Sapelem)

fig. 2-2 – Exemples de systèmes d'aide à l'action

Une première classe de structure de *phri*, fortement répandue dans le domaine de la chirurgie, est la téléopération (fig. 2-3). Dans ce contexte, les mains de l'opérateur sont en interaction physique avec la partie « maître » du système, mais physiquement indépendantes de l'environnement distant. Les parties « maître » et « esclave » sont physiquement indépendantes, uniquement liées par une communication numérique. L'interaction physique opérateur-système ne dépend que d'un organe de restitution de ressenti, dit *retour haptique* (fig. 2-4). La fonctionnalité première de ce type de systèmes est d'une part la transmission de l'action (sous-cutanée, à distance, etc.) et, d'autre part, la restitution d'un ressenti à l'opérateur correspondant au comportement distant. Ils se distinguent des systèmes d'aide à l'action : les fonctionnalités d'assistance viennent en second lieu.

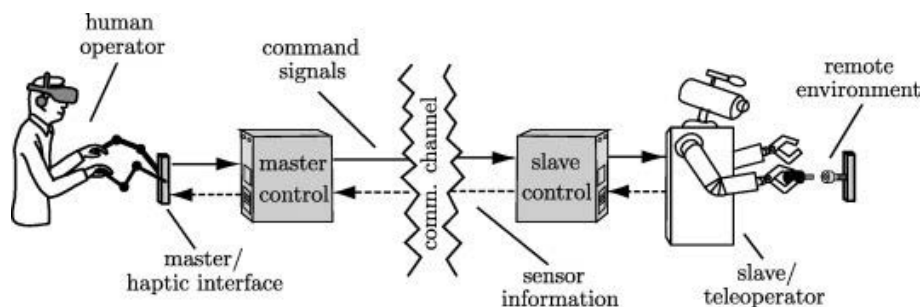


fig. 2-3 – Synoptique de la téléopération [37]



fig. 2-4 – Organe de retour haptique Falcon (Novint Inc.)



fig. 2-5 – Exemple de comanipulation Homme-Machine [38]

La structure d'un système de téléopération est basée sur une architecture en série de ses organes. Une autre structure envisageable est rencontrée dans le cas de la coopération ou comanipulation [38], où le lien physique entre utilisateur et robot passe par la matière d'œuvre.

Enfin, une dernière classe de système d'assistance est qualifiée à interactions multiples entre utilisateur, charge et assistance, comme dans le cas d'un exosquelette motorisé (fig. 2-6). Celle-ci est l'objet des travaux présentés dans ce mémoire.



fig. 2-6 – Exosquelette Hercule (RB3D)

Toutes les illustrations précédentes présentent des interactions simples ou multiples avec un utilisateur ou opérateur. Afin de préciser le couple des grandeurs formant le lien d'interactions, nous utiliserons les définitions suivantes (fig. 2-7) :

Définition 2-1 : Intention : grandeur physique émise par l'opérateur, action de celui-ci ;

Définition 2-2 : Ressenti : grandeur physique de réaction, reçue par l'opérateur.

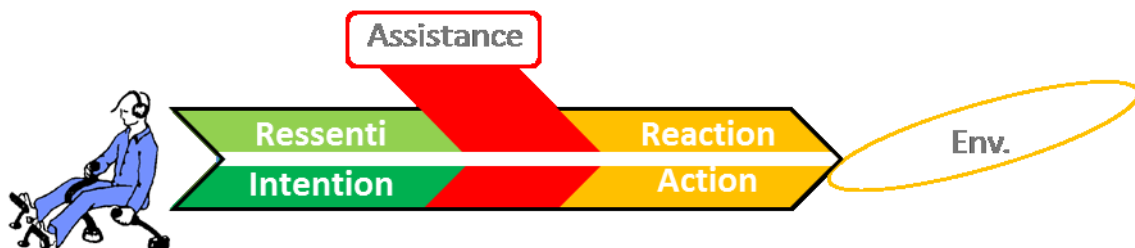


fig. 2-7 – Définitions des grandeurs d'interaction

Si nous cherchons à préciser le contexte d'utilisation d'un I.A.D., rappelons que H. Kazerooni [39] proposa dès 1990 une structuration des interactions et une représentation des échanges définies par le schéma de la fig. 2-8.

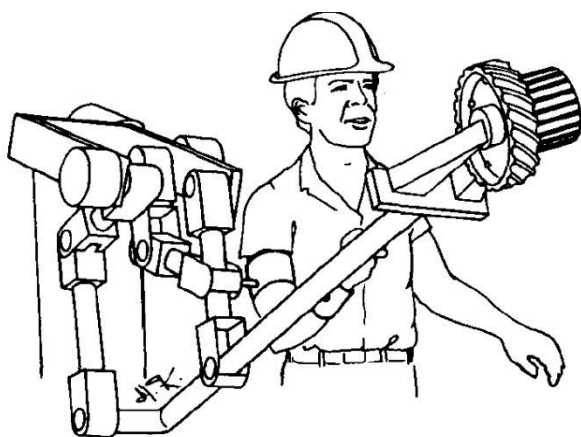
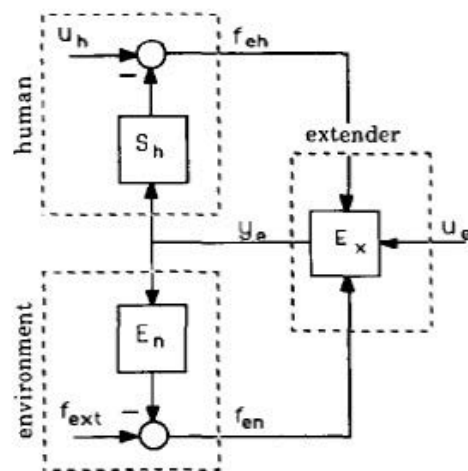


fig. 2-8 – Human Extender [39]



Notons que l'assistance à opérateur se distingue de la structure plus ancienne maître-esclave (fig. 2-3), caractéristique de la téléopération [40], introduite dans les années 60. Dans le cas d'une téléopération, l'utilisateur n'est plus en interaction physique avec la matière d'œuvre – ce qui est la principale distinction structurelle entre la téléopération et l'aide à l'action. Notons aussi que la structure proposée par H. Kazerooni intègre l'opérateur et son comportement, qui devient une partie de l'ensemble du système à travers des liens d'interaction physique. A travers ce schéma, nous mettons en avant que dans ce contexte d'assistance, l'étude ne se réduit pas au seul système d'assistance, mais considère trois sous-ensembles échangeant entre eux des grandeurs physiques :

- *Human* [utilisateur] ;
- *Environment* [environnement] ;
- *Extender* [S.A.O.] .

Par contre, dans cette définition, l'auteur ne s'intéresse pas à la quantité d'énergie échangée ou dépensée par l'utilisateur. Il se limite par hypothèse à un seul cas d'interaction homme-machine, c'est-à-dire le cas où l'utilisateur fournit un effort (noté f_{eh} sur la fig. 2-8) et ressent un déplacement (noté y_e). Enfin, l'auteur propose quelques lois de commande définissant l'action de l'assistance (noté u_e) par une commande basée sur un modèle de référence et tenant compte du comportement de l'opérateur. Nous proposerons donc une approche d'analyse permettant de déterminer la grandeur *intention* et complémentirement la grandeur « *le ressenti* ».

Afin de compléter cette représentation de l'assistance par une approche énergétique, nous rappelons les travaux de N. Hogan sur le contrôle d'impédance [41], que l'on pourra retrouver dans [42]. S'appuyant sur un formalisme adapté, ces travaux proposent une modélisation qui tient compte de la quantité d'énergie fournie à travers l'interaction. Ce formalisme, en l'occurrence le bond graph, présente aussi l'intérêt de s'affranchir de la contrainte d'une hypothèse sur la nature de l'intention et du ressenti par une approche acausale, tout en restant dans le cadre d'une action-réaction physique.

Le contexte de ces travaux est le pilotage d'un bras manipulateur dans un environnement qui peut être humain ou matériel (fig. 2-9). L'objectif est de piloter ce bras manipulateur dont la structure est proche de celle de la morphologie humaine. Une problématique habituelle de ce type de problème est de découpler le pilotage en position et en effort, autrement dit, de lever le dilemme d'un asservissement en force ou en position.

« A solution to this problem is to modulate and control the dynamic behavior of the manipulator in addition to commanding its position or velocity. » [41]

Puisque l'effort et la position peuvent être liés par une loi de comportement, par exemple, de type raideur (*impedance*), maîtriser et moduler cette raideur permet de maîtriser la loi d'interaction en bout de bras. **Par extension au cas des systèmes d'aide à l'action, la maîtrise de l'interaction homme-machine pourra être assimilée à la maîtrise du comportement entre la grandeur d'intention et la grandeur de ressenti.**



fig. 2-9 – Principe du contrôle d'impédance

Nous cherchons donc à maîtriser les performances à travers le prisme du comportement. Le comportement réel doit correspondre au comportement spécifié. Nous avons donc besoin d'un cadre mathématique rigoureux permettant de spécifier, modéliser et maîtriser le(s) comportement(s). Willems propose ce cadre dans [43], [44] et [45]. Comme introduit §1.2.1, un comportement du système peut être représenté avec ou sans causalité explicite, avec ou sans expression explicite d'un vecteur d'état. Nous rappelons la définition ci-dessous 2-3 des systèmes dont le comportement est représenté sans causalité explicite par équations différentielles et dans l'espace d'état. La fig. 2-10 permet une représentation graphique du comportement : les deux trajectoires $w_1(t)$ et $w_2(t)$ appartiennent à \mathcal{W} et respectent l'équation différentielle imposée par le comportement \mathcal{B} . [43] définit de manière analogue les comportements causaux représentés par équations différentielles (modèle *input/output* (I/O)) ou représenté dans l'espace d'état (modèle *input/state/output* (I/S/O)). C'est à cette dernière classe de représentation que se rapporte le formalisme hamiltonien à ports utilisé.

Définition 2-3 : Système dynamique représenté sans causalité par équations différentielles:

Un système dynamique est défini par le triplet $\Sigma_L = (\mathbb{R}, \mathcal{W}, \mathcal{B})$

- \mathbb{R} est l'espace du temps ;
- \mathcal{W} l'espace des signaux traversant la frontière du système ($e(t)$ et $f(t)$ dans notre cas) ;
- \mathcal{B} est le comportement, sous-espace de \mathcal{W} ($\mathcal{B} \subseteq \mathcal{W}$), représenté par un système de n équations différentielles s'il existe une fonction continue $\Delta^{\mathcal{B}}: \mathbb{R} \times \mathcal{W}^{(d)} \rightarrow \mathbb{R}^n$, appelée système d'équations différentielles associée à \mathcal{B} et :

$$\mathcal{B} = (t, w^{(d)} | \Delta^{\mathcal{B}}(t, w^{(d)}) = 0^n) \tag{2-1}$$

où l'exposant $^{(d)}$ dénote les dérivées temporelles de $w(t)$.

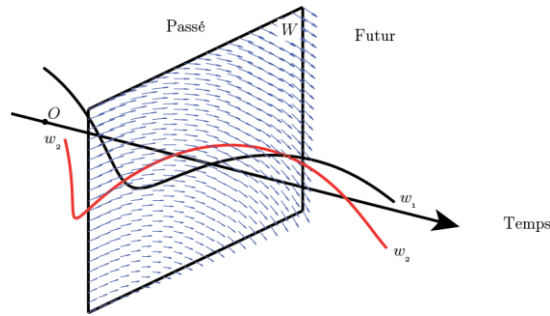


fig. 2-10 – Représentation synoptique d'un comportement

2.2 Organisation et fonctionnalités d'un Système d'Assistance à Opérateur

Afin de préciser les différents types de système d'aide à l'action, nous retenons trois structures organiques élémentaires. Dans le cadre de la téléopération (fig. 2-11), la transmission de l'opération se fait par l'intermédiaire du système de transmission de l'information, généralement numérique. Le comportement de l'interface Homme-Machine ne dépend plus que de ce dernier, quelle que soit la nature de l'environnement (Environn^t) et de la matière d'œuvre (M. Œ.).

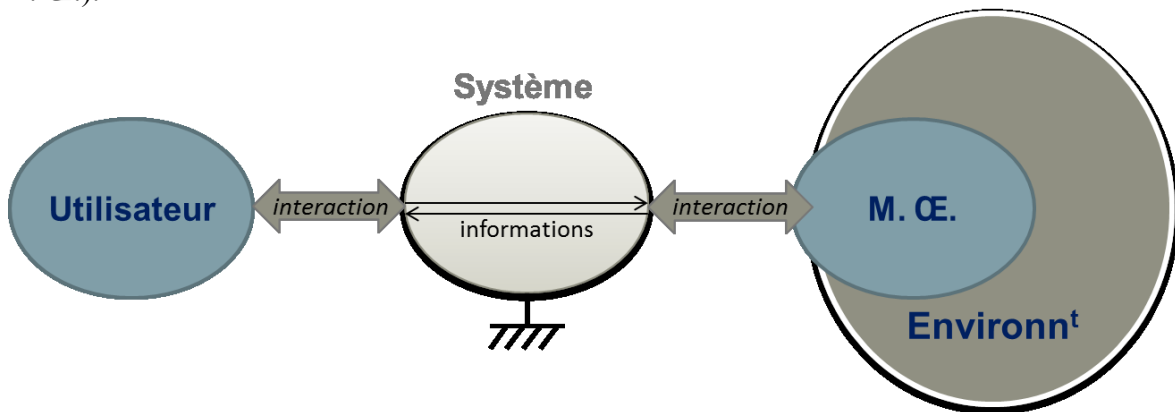


fig. 2-11 – Structure organique : cas de la téléopération

La coopération ou comanipulation se différencie du schéma précédent par une structuration parallèle au lieu de la structure sérielle de la téléopération : utilisateur et système interagissent en parallèle sur la matière d'œuvre.

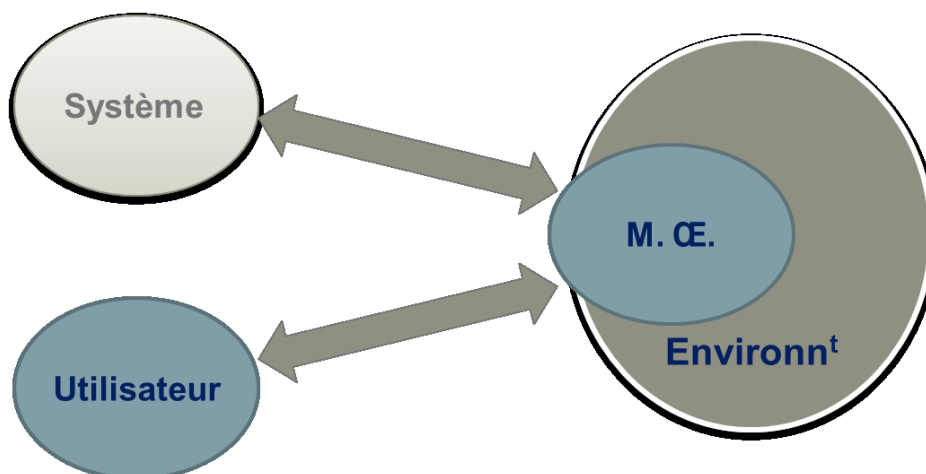


fig. 2-12 – Structure organique : cas de la coopération

Ces deux premiers schémas ne couvrent pas tous les systèmes d'aide à l'action qu'il est possible de rencontrer. Les exemples des fig. 2-2 et fig. 2-6 ne peuvent pas tous être mis sous la forme des deux structures précédentes (fig. 2-11 ou fig. 2-12). Nous proposons donc une troisième structure organique (fig. 2-13) pour laquelle l'utilisateur interagit physiquement avec la matière d'œuvre par l'intermédiaire du système. Les systèmes respectant cette structure seront qualifiés de **Système d'Assistance à l'Opération**, noté S.A.O. par la suite.

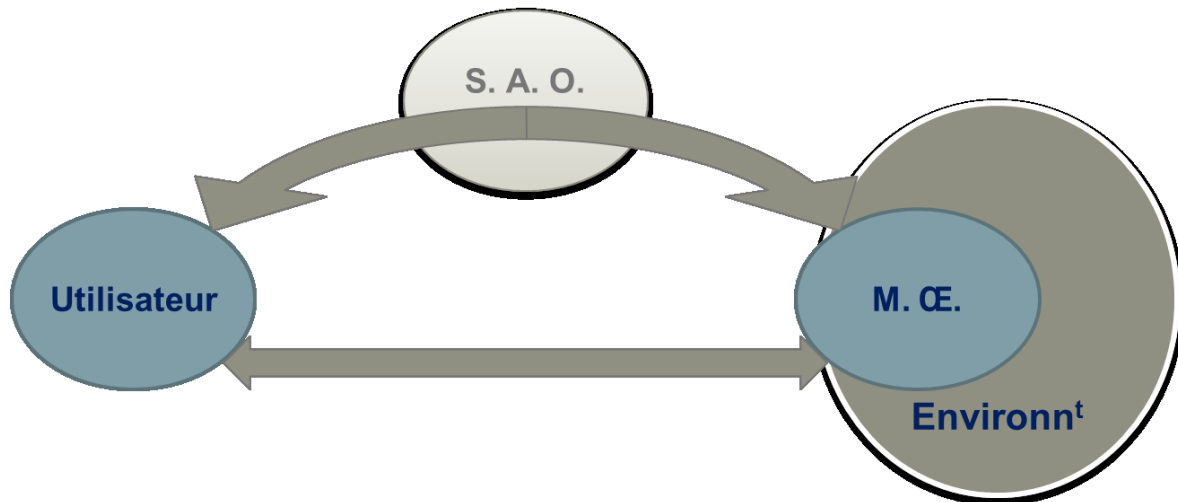


fig. 2-13 – Structure organique : cas d'un S.A.O.

En effet, un nombre important de systèmes d'aide à l'action est à considérer comme une évolution ou amélioration d'un système initialement non assisté. En cas d'absence d'assistance, l'action sur une matière d'œuvre utilise la puissance musculaire de l'opérateur pour réaliser la fonction. L'utilisateur fournit donc puissance de fonctionnement et consigne de fonctionnement (intention) à travers les grandeurs physiques de sa puissance musculaire.

L'objectif d'une assistance est donc de « moduler » la puissance fournie par l'utilisateur, sans altérer son intention. Plusieurs questions se posent alors. La première est de définir à travers quelle grandeur l'utilisateur exprime son intention. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode d'analyse permettant de définir, sans les confondre, puissance fournie par l'utilisateur et grandeur d'intention. La deuxième est « comment moduler la puissance fournie par celui-ci ? ». Rappelons que cette puissance est le produit de l'intention par le ressenti. L'intention étant fixée par l'utilisateur, moduler la puissance de l'utilisateur revient à moduler son ressenti. Il s'agit donc de maîtriser, pour une intention donnée, le ressenti. Le ressenti dépendant du comportement de l'interaction homme-machine et du comportement distant, notre objectif est de maîtriser ces comportements. Selon ce point de vue, un SAO nécessite une motorisation et une intelligence pour fournir la puissance nécessaire à l'activité sans dégrader l'intention. Dans une interaction musculaire, l'utilisateur fournit l'effort adapté au mouvement souhaité, ou inversement. Une partie de ce mémoire est donc consacrée aux méthodologies nécessaires à la spécification, à la définition structurelle et à la synthèse des S.A.O. dans le cadre des commandes de vol.

Afin de préciser la composition organique d'un S.A.O., nous définissons (fig. 2-14) :

Définition 2-4 : Système nominal : ensemble des organes permettant à l'utilisateur d'agir sur la matière d'œuvre grâce à sa puissance musculaire seule. Il correspond à un système dénué d'assistance ;

Définition 2-5 : Système assisté : système nominal auquel ont été adjoints les organes nécessaires à l'assistance ;

Définition 2-6 : Eléments d'assistance : ensembles des organes et des traitements de l'information nécessaires à l'assistance, à ajouter au système nominal.

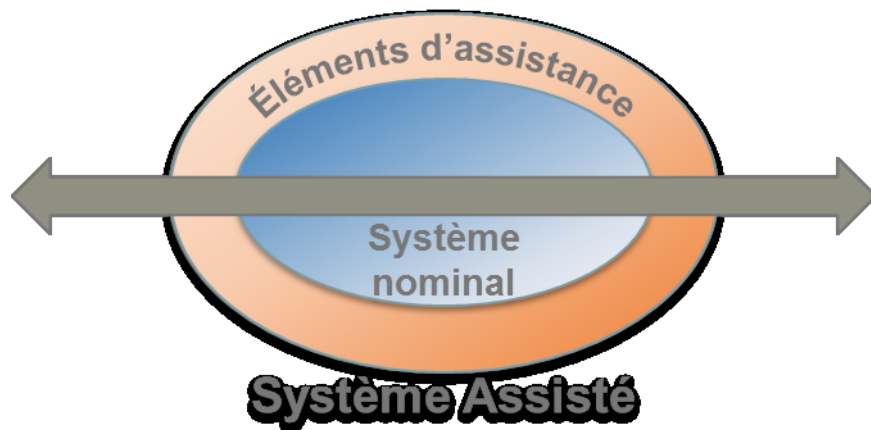


fig. 2-14 – Composition d'un S.A.O.

Définition 2-7 : Assistance : différence de comportement entre le comportement du système nominal B_n et le comportement du système assisté B_a .

Pour aller plus loin dans la description de l'interaction homme-machine, il est nécessaire de définir quelle est la grandeur physique porteuse de l'intention, et celle porteuse du ressenti. En effet, l'opérateur interagit avec le système par sa puissance musculaire à travers des objets mécaniques. Il fournit donc une puissance mécanique, produit d'une vitesse et d'un effort. Une des principales difficultés est de modéliser cette interaction : le pilote impose-t-il un effort ou un mouvement à son manche ? Notons que l'information de position absolue n'est que peu importante dans le cas du pilotage. Ce qui importe, c'est le déplacement relatif suivant un profil de vitesse donné. A titre d'exemple, il suffit d'observer l'utilisation d'une souris d'ordinateur ou d'un menu déroulant de smartphone : l'intention passe par l'effort ou la vitesse, et non par une position absolue. Pour tenter de répondre à cette question, nous postulons :

Postulat 1 : Un S.A.O. est l'évolution d'un système non assisté. Afin de conserver l'ergonomie pour l'opérateur, l'assistance ne doit pas modifier la nature de l'interaction entre l'utilisateur et le système, elle ne doit qu'en moduler les intensités. La causalité des phénomènes physiques n'est pas modifiée par l'assistance.

A partir de la connaissance et de l'étude du système non assisté et du comportement de la matière d'œuvre, il est donc possible mener une analyse de la causalité (outil bond graph et SCAP - §1.2.3) et de déterminer si, dans sa puissance musculaire, l'utilisateur impose la vitesse ou l'effort. Le formalisme bond graph est adapté à une telle analyse des transferts d'énergie, qui n'est pas forcément naturelle à d'autres représentations causales telles que le Graphe Informationnel Causal ou la Représentation Énergétique Macroscopique. Par contre, il est ensuite aisé de déduire la représentation causale du système par transformation du bond-graph dans la mesure où tous les stockages sont représentés en causalité intégrale (voir [1] pour le détail de la méthodologie).

Donc, la description de l'interaction entre un système d'assistance et l'utilisateur découle de la description de l'interaction entre l'utilisateur et le système nominal : elles doivent être de même nature, de qualité identique. Les grandeurs « *l'intention* » et « *le ressenti* » peuvent être parfaitement définies.

Enfin, notons que les fonctionnalités attendues pour les S.A.O. peuvent avoir des intitulés différents. Leur expression peut être, pour les exemples de la fig. 2-2-(a à c), celle d'un multiplicateur d'effort dont le coefficient varie avec les conditions d'utilisation ; la fonctionnalité associée à l'exemple fig. 2-2-c s'exprime comme un filtrage en effort (basse-fréquence pour supprimer les composantes continues ; haute fréquence afin de limiter les troubles musculo-squelettiques engendrés par la manutention). De très nombreux autres cas peuvent être rencontrés [46].

2.3 Modélisation et spécification multi-physique des S.A.O.

Afin de pouvoir spécifier quantitativement les comportements, il est nécessaire d'associer un modèle au système étudié. Etant donné le contexte multi-physique, nous appliquons le formalisme hamiltonien à ports à la structure organique retenue pour un SAO. Le système nominal possède donc trois ports d'interaction avec ses interacteurs (fig. 2-15) : avec l'opérateur (port g), avec la matière d'œuvre dans son environnement (port l) et avec les éléments d'assistance (port h). Le comportement du système nominal est défini en formalisme hamiltonien par $\{x\}$, $H(x)$, $J(x)$ et $R(x)$.

L'analyse causale ayant été faite en amont, les grandeurs d'interactions au ports sont notées : l'intention $u(t)$; le ressenti $y(t)$; l'action sur l'environnement $e(t)$ et la réaction de l'environnement $d(t)$. L'ensemble des actions d'assistance sera noté $a(t)$; les réactions du système à l'assistance notées $b(t)$. Notre objectif est donc de définir h , lieux où une puissance d'assistance est nécessaire et $a(t)$ quantité d'action nécessaire. La grandeur $b(t)$ peut être utile pour le dimensionnement des éléments d'assistance. Le comportement s'exprime alors par l'équation (3-1)

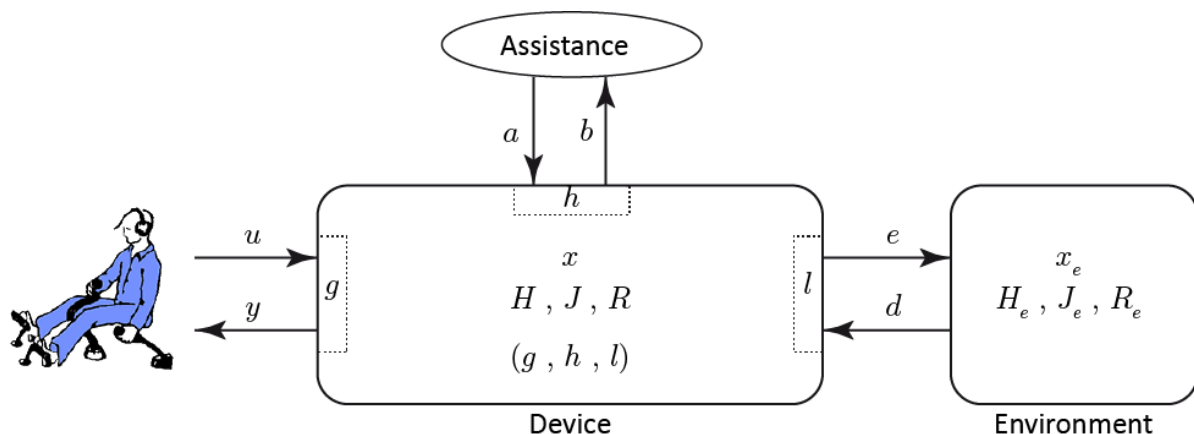


fig. 2-15 – Représentation des interactions physiques d'un SAO

$$\begin{aligned}\{\dot{x}\} &= [J(x) - R(x)] \cdot \nabla H(x) + [g(x)] \cdot \{u\} + [l(x)] \cdot \{d\} + [h(x)] \cdot \{a\} \\ \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{e\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{b\} &= [h(x)]^T \cdot \nabla H(x)\end{aligned}\tag{2-2}$$

L'assistance doit permettre au système d'atteindre un comportement en boucle fermée représentant une valeur ajoutée pour l'utilisateur. Puisque l'objectif du S.A.O. n'est pas simplement de reproduire le comportement de l'environnement au niveau du ressenti de l'opérateur, il est nécessaire de spécifier ce comportement à atteindre. Le S.A.O. global fera alors apparaître deux ports (fig. 2-16) : l'un pour l'interaction avec l'opérateur, noté g ; l'autre avec l'environnement noté l . Une nouvelle question se pose : comment exprimer la spécification des comportements dans le cas d'un système multi-ports ?

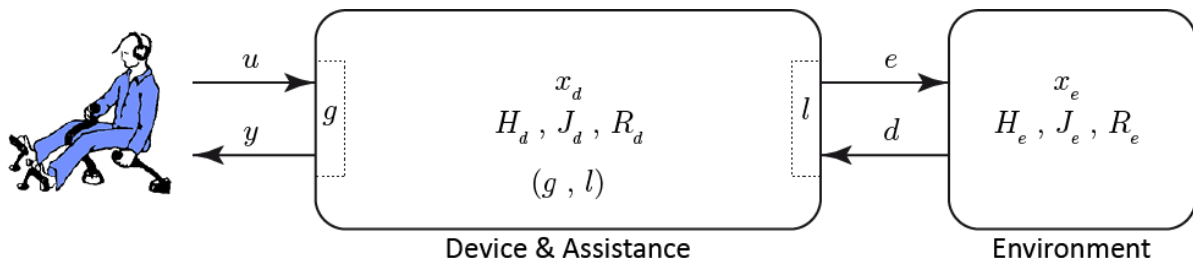


fig. 2-16 – Représentation du comportement spécifié

Postulat 2 : La spécification globale du S.A.O. est envisagée dans une approche linéaire : ressenti et action sont des combinaisons linéaires des comportements liant ces premières à l'intention et au ressenti. Chacun des comportements peut être non linéaire avec l'état.

Définition 2-8 : *Le comportement global spécifié après analyse causale est une combinaison linéaire de comportements notée dans la matrice de comportement :*

$$\begin{Bmatrix} y \\ e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} CI_u & ME_r \\ ME_i & CI_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix}\tag{2-3}$$

Où:

- CI_u : contrôle d'impédance côté utilisateur, *comportement liant intention et ressenti* ;
- CI_e : contrôle d'impédance côté environnement, *comportement liant action et réaction* ;
- ME_i : Mise à l'échelle de l'intention, *comportement liant intention et action* ;
- ME_r : Mise à l'échelle du ressenti, *comportement liant réaction et ressenti*.

Nous avons posé le comportement global à atteindre (spécifié) comme une combinaison linéaire de comportements liant :

- Les grandeurs des ports traversant le S.A.O. du côté maître au côté esclave (termes anti-diagonaux de la matrice (2-3)) ;
- Les grandeurs en un même port (termes diagonaux de la matrice (2-3)).

Chacun des comportements spécifiés sera exprimé, s'il est passif, dans le formalisme hamiltonien à ports. Dans le cas où chacun des 4 comportements sont linéaires, le comportement global se ramène à une matrice de transfert :

$$\begin{Bmatrix} y \\ e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{yu}(s) & Z_{yd}(s) \\ Z_{eu}(s) & Z_{ed}(s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix} \quad (2-4)$$

Les comportements spécifiés par les termes diagonaux de la matrice de comportement lient entre elles les deux grandeurs de chacun port. Le comportement est colocalisé au port, on parle de contrôle d'impédance. Rappelons que l'interaction homme-machine est de type mécanique. L'intention, dans une approche énergétique, se traduit soit par une vitesse soit un par effort. La spécification de ces derniers comportements doit rester dans un intitulé simple, par exemple, celle d'un comportement élémentaire. L'expression d'un comportement élémentaire à atteindre peut être linéaire (voir tab. 2-1) ou à paramètres variant avec l'état. Dans un cas comme dans l'autre, l'interprétation énergétique du comportement peut être un éclairage complémentaire à l'expression fonctionnelle du comportement. Le comportement peut aussi être une combinaison de comportements élémentaires. Il peut être alors représenté dans une structure de comportements élémentaires. Dans le cas linéaire, il peut être aussi traduit sous forme de fonction de transfert, utile à la spécification d'un filtrage. Enfin, la spécification la plus complexe sera celle d'une combinaison de comportements élémentaires non linéaires. Le formalisme hamiltonien à ports et sa représentation graphique permettent alors une expression aisée de ce type de spécification.

| Comportement élémentaire linéaire | Interprétation énergétique associée | |
|---|--|--|
| | dans le cas où l'intention est une vitesse | dans le cas où l'intention est un effort |
| Ressenti proportionnel à l'intention | Dissipation de Rayleigh | |
| Ressenti proportionnel à l'intégrale de l'intention | Raideur | Inertie |
| Ressenti proportionnel à la dérivée de l'intention | Inertie | Raideur |

tab. 2-1 – Expression fonctionnelle des comportements élémentaires

Par ailleurs, pour les termes anti-diagonaux de la matrice de comportement, nous avons retenu le terme « mise à l'échelle ». En effet, bien que de très nombreux comportements soient envisageables, nous nous limitons au cas où la spécification du lien comportemental entre intention et action d'une part, et réaction et ressenti d'autre part, est un lien de proportionnalité. Les termes Z_{eu} et Z_{yd} sont alors constants. Autrement dit, le système a une fonctionnalité de transmission bilatérale, avec des facteurs d'échelle qui peuvent être différents selon le sens de transmission. On peut envisager des comportements moins simplistes, comme par exemple un filtrage d'une certaine bande fréquentielle, utile pour la prévention des troubles musculo-squelettiques. Même si ces cas de figure ne sont pas abordés ici, la méthodologie originale développée chapitre 3 peut aussi être appliquée à ce type de fonctionnalité.

Le lien entre ces grandeurs situées en des ports différents est donc un facteur d'échelle, une homothétie. En ne considérant que les termes anti-diagonaux de la matrice (2-4), le bilan de puissance effectué équation (2-5) met en évidence un facteur de multiplication α entre la puissance P_g au port g et la puissance P_l au port l . Il y aura alors création de puissance au sein du système. Sa structure n'est plus conservative. Le comportement global du système d'assistance n'est plus passif.

$$P_l = e \cdot d = \frac{Z_{eu}}{Z_{yd}} \cdot u \cdot y = \frac{Z_{eu}}{Z_{yd}} \cdot P_g = \alpha \cdot P_g \quad (2-5)$$

Cette nature de spécification doit pourtant pouvoir être représentée graphiquement. [47] propose deux symboles dans le formalisme bond-graph associé à ce comportement : *power scaling transformers* (**PTF**) et *power scaling gyrators* (**PGY**). Ces symboles ont une signification analogue à celle des symboles plus communs **TF** et **GY** : si les grandeurs physiques d'intention et d'action sont de même nature (vis-à-vis de la table d'analogie tab. 1-2), et donc de même pour les grandeurs de réaction et de ressenti, le symbole est **PTF**. De manière complémentaire, le **PGY** définit une mise à l'échelle entre les grandeurs intention et action de nature différente. La fig. 2-17 illustre un cas d'usage du **PTF**. Les équations (2-6) traduisent le comportement de celui-ci, où m est le rapport de multiplication d'effort et α est le rapport de multiplication de puissance.

$$\frac{u}{y} \text{ PTF } (m, \alpha) \frac{e}{d}$$

fig. 2-17 – Exemple d'usage de l'élément PTF

$$\begin{cases} u = m \cdot e \\ d = m \cdot \alpha \cdot y \end{cases} \quad (2-6)$$

Enfin, nous rappelons que, dans une démarche d'ingénierie, il est nécessaire de vérifier, à différentes étapes du cycle de vie, que le système conçu ou réalisé répond bien à la spécification. Il est donc nécessaire de préciser les critères de vérification des fonctionnalités. A travers la vérification des performances dans le cadre de notre approche par le comportement, nous cherchons à vérifier que le comportement atteint par le système (comportement théorique \mathcal{B}_{ath} en phase de conception et comportement réel \mathcal{B}_{ar} en phase de vérification) correspond bien au comportement spécifié \mathcal{B}_{as} . Comparer deux comportements implique un critère de comparaison adéquat. Un critère utilisé dans le cadre de la téléopération est celui de la transparence. On retrouve de nombreux intitulés pour celui-ci : « *Capacité du système d'assistance à ne pas être ressenti par l'utilisateur* » [48] ou « *la transparence quantifie la capacité du système à produire une assistance programmée* » [49]. Stramigioli propose dans [44] une définition mathématique de la transparence à partir d'un critère de déviation entre l'expression du comportement spécifié \mathcal{B}_{as} défini par $\Delta^{\mathcal{B}_{as}}$ (équation (2-1)) et les grandeurs aux ports effectivement atteintes $w_{ar}(t)$. Si les grandeurs effectivement atteintes n'annulent pas les équations différentielles du comportement spécifié, le système n'est pas *transparent*.

Définition 2-9 : Indice de déviation : la perte de transparence peut être quantifiée par l'indice de déviation entre le comportement spécifié \mathcal{B}_{as} défini par $\Delta^{\mathcal{B}_{as}}$ et les grandeurs aux ports effectivement atteintes $w_{ar}(t)$. Il est défini par :

$$\varepsilon(t) = \left\| \Delta^{\mathcal{B}_{as}} \left(t, w_{ar}^{(d)}(t) \right) \right\| \quad (2-7)$$

Ce critère prend toute sa richesse dans le cas d'une approche théorique, où les grandeurs $w(t)$ et leurs dérivées peuvent être connues. En effet, en s'appuyant sur les équations différentielles du comportement, il permet de tenir compte de la dynamique, même si l'interprétation physique de $\varepsilon(t)$ n'est pas évidente (quantité à l'unité mal définie puisque hétérogène). Par contre, dans une démarche expérimentale, où seuls $e(t)$ et $f(t)$ sont connus et non leurs dérivées, le critère devient plus difficile à exploiter, ce qui sera développé plus longuement au chapitre 4.

Dans le cadre de la téléopération, un système est *transparent* si le système est capable de restituer, au niveau de l'interface avec l'opérateur, le comportement réel de l'environnement. Il n'y a alors pas de spécification de comportement. La principale difficulté à atteindre une restitution fidèle à l'original est due à la numérisation des échanges opérateur-système et système-environnement.

Dans notre cadre d'étude *MIMO*, comme nous nous plaçons dans le cadre d'une combinaison linéaire des comportements traversants et aux ports, la quantification des performances globales sera une combinaison linéaire de la quantification des performances associées à chaque comportement. Le critère de transparence ne peut s'appliquer qu'à la fonctionnalité de la mise à l'échelle : le comportement ressenti par l'utilisateur doit être celui de l'environnement à un facteur d'échelle près, spécifié en amont. L'appellation transparence sera donc utilisée pour la vérification des comportements anti-diagonaux de la matrice de comportements. Pour les comportements diagonaux, se pose la question de savoir si l'assistance est capable de créer un ressenti conforme à la spécification. Dans la mesure où l'assistance est parfaite, le ressenti doit être celui spécifié. Mais la structure physique et d'autres contraintes peuvent altérer ce retour à l'utilisateur. Apparaît alors une perte de réalisme. Le critère de vérification pour les termes diagonaux sera appelé le réalisme. La perte de réalisme sera quantifiée de la même façon par l'indice de déviation du comportement (2-7).

Définition 2-10 : Réalisme : capacité du système à produire un comportement aux ports conforme à celui spécifié.

2.4 Conclusion : les spécificités des S.A.O.

La bibliographie sur la téléopération est très dense. Elle permet de définir clairement la structure et les comportements des systèmes de téléopération, leurs spécifications et les critères de vérifications de performances. La principale fonctionnalité de ceux-ci reste la transmission des intentions et ressentis (avec une possible mise à l'échelle). Aucun contrôle d'impédance aux ports n'est requis. Ceci est facilement mis en place par le découplage physique entre les parties maître et esclave, remplacé par un système de transmission des informations.

Dans le domaine de l'aéronautique, elle apparaît sous la dénomination « *Fly by wire* ». Mais, dans le cas d'étude des commandes de vol d'un hélicoptère de fort tonnage, l'architecture présentée fig. 1-21 ne peut pas être considérée comme une structure de téléopération. Il existe un lien physique (tringlerie mécanique) entre le manche et le plateau cyclique. Cette structure se ramène à celle présentée fig. 2-13, que nous avons désignée par l'appellation « Système d'Assistance à Opérateur »

A contrario d'un système de téléopération, un S.A.O. est caractérisé par une chaîne physique continue entre l'utilisateur et la matière d'œuvre. Une source d'énergie auxiliaire supplée celle de l'utilisateur. Un traitement de l'information est nécessaire à la perception de l'intention de l'utilisateur dans son interaction avec le système et, en fonction, à injecter la puissance nécessaire pour que la puissance musculaire à fournir soit bien moindre. La question en suspens est de définir où et dans quelle mesure apporter cette puissance d'assistance. Enfin, la présence d'un lien physique continu entre utilisateur et matière d'œuvre reste une contrainte importante. Les comportements en bout de tringlerie risquent d'être ressentis par le pilote. Nous devons aussi répondre à la question : dans quelle mesure les comportements spécifiés sont-ils réalisables ? Pour répondre à ces questions, nous utiliserons l'outil de représentation bond graph et le formalisme hamiltonien afin de déterminer la structure de l'assistance nécessaire et réaliser la synthèse des lois de commande. Les limites aux comportements accessibles seront précisées.

3 Conception structurelle d'assistance à opérateur par approche énergétique

3.1 Introduction du cas d'étude générique

Nous avons donc défini le cadre général de l'assistance à opérateur et sa description à travers le paradigme énergétique, selon deux points de vue : structurel et comportemental. Afin de développer les méthodologies nécessaires à la structuration et à la synthèse de l'assistance, nous introduisons un exemple simple de système non assisté, que nous chercherons à rendre assisté. Ce cas d'étude générique (fig. 3-1) sera utilisé pour illustrer les différentes facettes de la méthodologie proposée. Il est constitué d'une chaîne de transmission mécanique composée d'une succession de souplesses (C_g et C_d) et d'inerties (m_t), localisées et constantes. Une dissipation de Rayleigh f_v est introduite entre la masse et le bâti.

Cette chaîne relie le pilote au plateau cyclique. Notre objectif étant de définir l'assistance indépendamment des comportements du pilote et du plateau cyclique, nous nous limitons à la modélisation de leur nature causale. D'une part, nous faisons l'hypothèse que le pilote impose son intention sous forme d'une vitesse V_u . Autrement dit, il met en mouvement le manche. D'autre part, le plateau cyclique présente une inertie matérielle qui le rend modélisable par une source de vitesse V_e . Le modèle bond graph associé, présenté fig. 3-2, précise les notations des différentes grandeurs intermédiaires. Les deux sources représentées modélisent les ports d'interaction avec l'environnement, soit avec l'utilisateur, soit avec la matière d'œuvre. Notre objectif est donc de définir où placer les organes d'assistance et de synthétiser leur loi de commande. Ces derniers ne sont pas représentés fig. 3-1 et fig. 3-2 puisqu'ils ne sont pas, pour l'heure, définis.

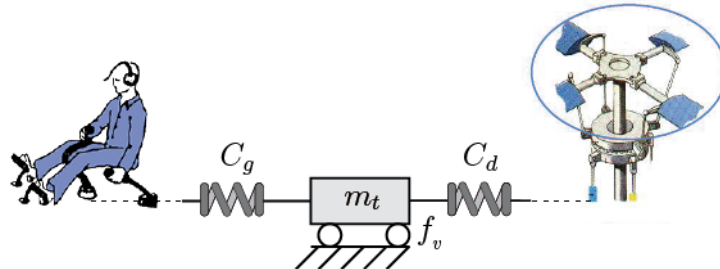


fig. 3-1 – Cas d'étude générique utilisé pour les développements

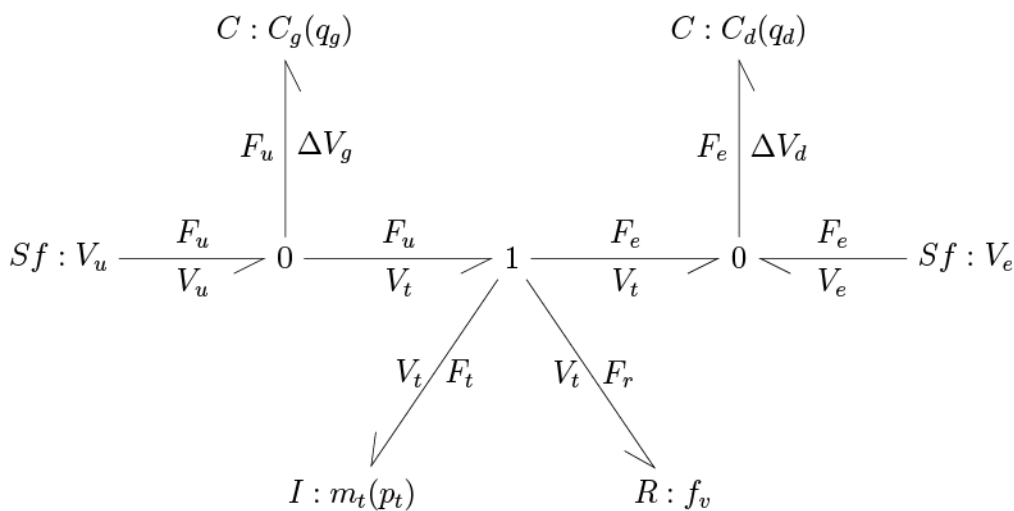


fig. 3-2 – Bond-graph associé au cas d'étude

Sur cet exemple, l'expression hamiltonienne et linéaire du comportement non assisté s'exprime sous la forme des équations (2-2), où $[h(x)]$ et $\{a\}$ restent à déterminer et où le détail du paramétrage est donné équations (3-1) :

$$\begin{cases} V_u = u \\ F_u = y \end{cases}; \begin{cases} V_e = d \\ F_e = e \end{cases}; \{x\} = \begin{cases} q_g \\ p_t \\ q_d \end{cases}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; [R] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [Q] = \begin{bmatrix} 1/C_g & 0 & 0 \\ 0 & 1/m_t & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_d \end{bmatrix};$$

$$[g] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; [l] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (3-1)$$

$$H(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{q_g^2}{C_g} + \frac{p_t^2}{m_t} + \frac{q_d^2}{C_d} \right) = \frac{1}{2} \{x\}^T [Q] \{x\}$$

$$\nabla H = \begin{Bmatrix} \frac{q_g}{C_g} \\ \frac{p_t}{m_t} \\ \frac{q_d}{C_d} \end{Bmatrix} = [Q] \{x\}$$

A partir de ce comportement physique, et après avoir mis en place les méthodologies nécessaires, nous chercherons à déterminer l'assistance nécessaire pour atteindre deux nouveaux comportements, un « contrôle d'impédance » (noté *C.I.* par la suite) et une « mise à l'échelle de puissance » (*power scaling* ou *P.S.*). Ils sont respectivement définis par les matrices de comportement (3-2) et (3-3). Nous choisissons ces deux cas de spécification du comportement car ils présentent plusieurs intérêts. D'une part, en abordant des comportements, colocalisé aux ports pour l'un et traversant le système pour l'autre, nous découplons deux problématiques bien distinctes. D'autre part, ces comportements peuvent être facilement réinterprétés dans le domaine physique. Ces illustrations sont développées § 3.5.2 et § 3.5.3.

$$\begin{cases} y \\ e \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_g^* s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_d^* s} \end{bmatrix} \begin{cases} u \\ d \end{cases} \quad (3-2)$$

(où $C_g^* \neq C_g$ et $C_d^* \neq C_d$ sont deux souplesses de référence à atteindre)

$$\begin{cases} y \\ e \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & m \\ m \cdot \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} u \\ d \end{cases} \quad (3-3)$$

(où α est un facteur de multiplication de puissance associé à un comportement global idéal de type **PGY**, voir p.44)

3.2 Approches de commandes dans le formalisme hamiltonien à ports

Afin d'atteindre les fonctionnalités spécifiées, nous cherchons à déterminer d'une part $[h(x)]$, qui décrit les liens d'interactions physiques entre les éléments d'assistance et le système nominal, autrement dit où la puissance d'assistance doit être injectée ; d'autre part $\{a\}$, qui correspond à la quantité d'action d'assistance nécessaire. Nous ne nous situons donc pas dans une simple démarche d'asservissement.

En effet, asservir un système correspond, sur la base d'une structure actionnée, à la mise en place d'une structure d'organe et au dimensionnement d'une commande qui vise à la maîtrise de certaines grandeurs, appelées sorties. L'objectif est qu'elles soient au plus proche de valeurs de référence appelées consignes. Afin d'assurer une bonne performance globale, un correcteur mesurant la différence entre les sorties et leur consigne est introduit afin d'assurer des bonnes performances en terme de stabilité, rapidité, précision, robustesse, etc. Le choix et le dimensionnement de ce correcteur dépendront du modèle du système étudié et de son environnement. La consigne peut varier en fonction d'un scénario d'usage. Un bloc est nécessaire, déterminant la consigne en fonction des spécifications. Ce bloc est souvent appelé générateur de trajectoire.

Nous nous plaçons dans une perspective différente, puisque d'une part nous cherchons où et quelle quantité d'actionnement est nécessaire et, d'autre part, les spécifications sont précisées en termes de comportement à atteindre. Dans cette approche, on cherche à façonner le comportement du système et non à asservir les sorties du système. Evidemment, à travers la maîtrise du comportement, ce sont les sorties (ressenti de l'utilisateur et action sur l'environnement) qui sont indirectement pilotées. Les critères de performance en stabilité, rapidité, précision, etc. deviennent implicites. Nous utiliserons le critère plus adapté de l'indice de déviation de comportement (définition 2-9). La démarche vise donc à façonner le comportement global, à travers le façonnement des comportements locaux (stockages et dissipations d'énergie : H_d et R_d) et/ou à travers la modification des interactions entre ces comportements locaux (à travers une structure désirée J_d). On peut alors mettre en place les comportements souhaités comme un contrôle d'impédance ou une mise à l'échelle. Les notions d'erreur, de correcteur et de générateur de trajectoire n'apparaissent pas explicitement dans cette approche.

Notons deux spécificités de notre approche. D'une part, dans une certaine mesure, nous nous contraignons, dès la recherche de solutions, à ne mettre en place les solutions qui ne permettront d'atteindre que des comportements passifs. Ce point de vue est appelé *Passivity Based Control* (PBC). D'autre part, la mise en place des éléments de contrôle ou d'assistance se fait à travers l'*interconnexion* physique des organes. La représentation graphique multi-physique en découle naturellement. Une structure d'information pourra être nécessaire.

Les approches de commande associées au façonnement du comportement énergétique (formalisme hamiltonien à ports) sont nombreuses : [50], [25], [51], [52] ou [53]. Elles s'appliquent à tout système dont le comportement est exprimé dans le formalisme hamiltonien à ports. Dans un premier temps, nous rappelons deux méthodologies dans un cadre d'usage général : l'approche colocalisée de l'équilibrage d'énergie (*Energy Balancing EB*) et l'approche par retour d'état associé au façonnement d'énergie (*Energy Shaping ES*) ou plus généralement l'interconnexion et l'assignation de dissipation (*Interconnection and damping assignment passivity-based control IDA-PBC*). Dans un second temps (§3.3), nous exposerons une approche originale dans le cas des S.A.O. et leurs spécificités.

3.2.1 Energy balancing (EB)

La méthodologie *EB* répond au besoin de maîtriser une grandeur qui ne correspond pas à un état dans le comportement du système physique réel. Si nous souhaitons introduire une nouvelle variable x_c à contrôler, nous devons créer un nouveau stockage virtuel associé à x_c . Par exemple, si l'on cherche à positionner une inertie, la grandeur position $q(t)$ n'apparaît pas dans les équations de comportement. L'expression de l'énergie H ne dépend pas de q , mais uniquement de p . Si nous souhaitons faire apparaître q dans les équations de comportement, il est nécessaire de compléter $H(p)$ par un stockage virtuel d'énergie $H_c(q)$, de type énergie potentielle. Les stockages $H(p)$ et $H_c(q)$ seront interconnectés en un même port. Une raideur virtuelle, couramment appelée raideur d'asservissement, est alors introduite.

L'approche met donc en interconnexion un système physique Σ_{phys} , modélisé par $[J(x)]$, $[R(x)]$, et $H(x)$, et des organes Σ_c de contrôle-commande (capteurs et actionneurs), qu'il est aussi possible de définir par un comportement physique par $[J_c(x)]$, $[R_c(x)]$, $H_c(x)$. On introduit un nouveau stockage virtuel et sa dynamique associée. Le nouveau stockage d'énergie $H_c(x)$ et le stockage physique d'énergie $H(x)$ doivent interagir pour atteindre un nouveau point d'équilibre x^* (consigne sur l'état à l'équilibre). Les termes $[J_c(x)]$, $[R_c(x)]$, $H_c(x)$ doivent être choisis pour assurer la passivité du comportement de Σ_c . Globalement, par interconnexion, nous obtenons un nouveau système hamiltonien dont l'ordre est la somme des ordres de chacun des deux premiers systèmes interconnectés. Le comportement global est donc dissipatif, $H(x)$ pouvant faire office de fonction de Lyapounov. Bien évidemment, l'interconnexion doit respecter la causalité des liens. Notons que dans cette interconnexion, le nouvel ensemble n'est plus en interaction avec l'environnement. Il est complètement autonome.

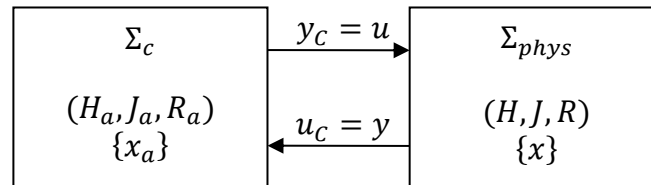


fig. 3-3 – interconnexion pour *Energy Balancing*

L'interconnexion pour l'*EB* trouve son équivalent graphique en formalisme bond-graph au travers du *Physical Model Based Control (PMBC)* [27] [54]. En effet, mesure et commande sont colocalisées en un même port, ce qui trouve plusieurs représentations (fig. 3-4) : dans le formalisme bond-graph, l'interconnexion peut être modélisée comme parfaite (fig. 3-4-a) ou faisant apparaître l'association moteur et capteur permettant le passage entre domaine physique et le domaine informationnel, noté **Tra** (fig. 3-4-b). Dans le formalisme schéma bloc, la représentation dépendra de la causalité du lien d'interconnexion (fig. 3-4 c et d).

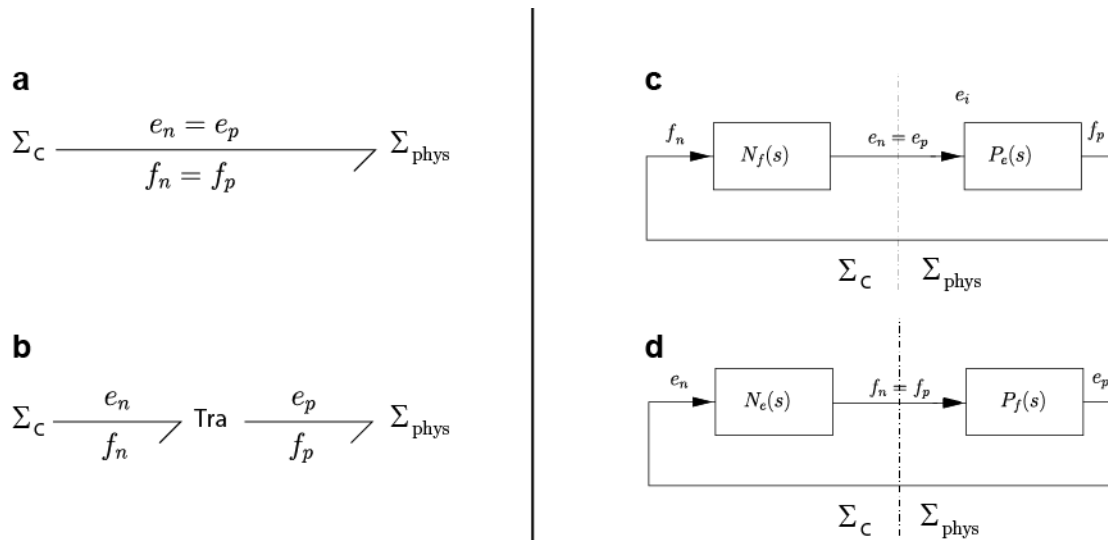


fig. 3-4 – Structuration des domaines informationnels et physiques en Bond-Graph (a,b), en schéma blocs (c,d) [54]

La démarche permet donc de représenter graphiquement les structures d'actionnement et de commande d'un asservissement en position sous la forme d'une interaction physique. Elle peut être alors utilisée dans une démarche de conception de système d'assistance à opérateur [2].

3.2.2 Energy shaping (ES) et IDA-PBC

Toutefois, l'objectif du contrôle commande peut être plus que l'introduction d'un nouvel état énergétique. L'objectif peut être de maîtriser les comportements physiques existants en maîtrisant les stockages d'énergie. L'approche est le **façonnement** d'énergie largement développé dans ([25], [40]). Pour contourner des structures inadaptées (*dissipation obstacle*) ou pour atteindre certaines performances, il est aussi nécessaire de « modifier virtuellement » la structure énergétique interne au système et les dissipations présentes dans celui-ci. Ceci est accessible via l'approche : *Interconnection and damping assignment passivity-based control IDA-PBC*. Nous ne rappellerons que cette deuxième méthode, qui inclut la première.

Comme pour le cas de l'*Energy Balancing*, les éléments du contrôle-commande sont vus comme un sous-système interconnecté avec le système physique [40]. Par contre, la définition de la commande $u(t)$ se fait uniquement en fonction de la mesure de l'état énergétique $\{x(t)\}$ du système, et non à partir de $y(t)$ (voir fig. 3-5). La mesure n'est plus colocalisée à la commande. Il faut interpréter cette structure de commande comme un retour d'état, le sous-bloc $\beta(x)$ étant équivalent au correcteur et au générateur de trajectoire.

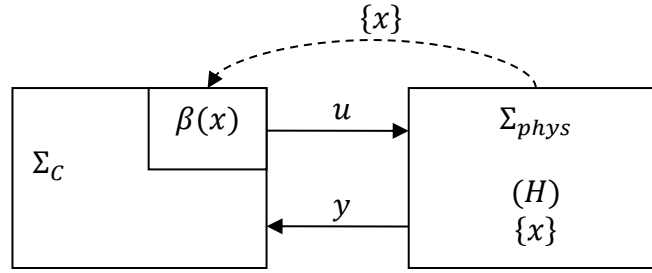


fig. 3-5 – Synoptique du principe de l'IDA-PBC

L'équation pertinente du comportement de Σ_c se ramenant à $u = \beta(x)$, le comportement global de l'interaction Σ_{phys} et Σ_c est décrit par les équations (3-4).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}\} &= [J(x) - R(x)] \cdot \nabla H(x) + [g(x)] \cdot \{\beta(x)\} \\ \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \end{aligned} \quad (3-4)$$

Nous cherchons donc à atteindre un nouveau comportement global du système. Doivent donc être spécifiés les éléments désirés descriptifs du comportement à atteindre : les stockages d'énergie $H_d(x)$, la structure énergétique interne $[J_d(\{x\})]$ et les dissipations $[R_d(\{x\})]$. Le point d'équilibre à atteindre x^* est directement lié à l'expression de $H_d(x)$ par $\nabla H_d(x^*) = \{0\}$. Le comportement global à atteindre s'exprime sous la forme de l'équation (3-5).

$$\{\dot{x}\} = [J_d(x) - R_d(x)] \cdot \nabla H_d(x) \quad (3-5)$$

Nous avons donc défini le comportement en boucle fermée (équations (3-4)) et le comportement à atteindre (équation (3-5)). La performance est satisfaisante si les deux comportements sont égaux. L'identification des deux comportements permet de déterminer $\beta(x)$ à travers l'équation de correspondance (*Matching equation* (3-6)). La résolution de cette équation est une condition nécessaire pour déterminer la loi de commande $\beta(x)$.

$$[J_d(x) - R_d(x)] \cdot \nabla H_d(x) = [J(x) - R(x)] \nabla H + g(x) \cdot \beta(x) \quad (3-6)$$

Afin de simplifier l'équation de correspondance (*Matching equation* (3-6)), nous introduisons :

- $H_a = H_d - H$: l'énergie nécessaire adjointe à l'énergie nominale ;
- $J_a = J_d - J$: la structure énergétique complémentaire nécessaire ;
- $R_a = R_d - R$: les dissipations complémentaires nécessaires.

Nous pouvons écrire l'équation de correspondance simplifiée (3-7). L'équation exprime la loi de commande $\beta(x)$ en fonction des modèles (réel et spécifié) et des mesures de l'état.

$$g(x) \cdot \beta(x) = [J(x) - R(x)] \nabla H_a(x) + [J_a(x) - R_a(x)] \nabla H_d(x) \quad (3-7)$$

Néanmoins, pour que le comportement en boucle fermée puisse correspondre à un celui d'un système hamiltonien à ports dissipatif, il reste nécessaire de respecter certaines contraintes, notamment la dissipativité. En effet, La puissance échangée reste le produit $u(t) \cdot y(t)$. La loi d'interaction entre $u(t)$ et $y(t)$ définie par le comportement $\beta(x)$ de Σ_c ne correspond plus forcément à un sous-système dissipatif. La question de la dissipativité du comportement global

doit être soulevée. Il faut donc choisir $\beta(x)$ afin que le comportement global vérifie les propriétés intrinsèques de passivité des systèmes hamiltonien à ports vues chapitre 1. Il suffit donc de spécifier un comportement assimilable à un système physique.

Propriété 3-1 : *Le comportement global est assimilable à celui d'un système hamiltonien à ports si et seulement si :*

- i. $H_d(x)$ est C^2 ;
- ii. J_d anti-symétrique ;
- iii. R_d symétrique définie positive ;
- iv. $J_{\nabla H_d}$ est symétrique ;

Propriété 3-2 : *Le comportement converge vers un état d'équilibre (local) x^* si et seulement si :*

- i. $\nabla H_d(x^*) = \{0\}$: x^* est l'état d'un extremum énergétique ;
- ii. $J_{\nabla H_d}(x^*) > 0$: la matrice hessienne de $H_d(\{x\})$ est définie positive ;

3.2.3 Synthèse bibliographique

Les approches de commandes dans le formalisme hamiltonien à ports sont donc basées sur une spécification du comportement énergétique à travers le façonnement de l'énergie incluse dans le système (*energy shaping*), de l'énergie virtuellement introduite (*energy balancing*) ou de l'énergie échangée (*power shaping*), non développée ici. Elles sont donc adaptées à l'étude des systèmes modélisables dans le paradigme énergétique. Par cette approche de commande à modèle spécifié, dans la mesure où ce dernier est passif, le comportement atteint est intrinsèquement passif, ce qui libère de toute étude complémentaire de stabilité.

Notons que ces approches amènent à un contenu sémantique très riche. D'abord parce qu'elles sont adaptées aux comportements non linéaires, elles permettent d'aborder les problèmes à un haut niveau de complexité. Ensuite, à travers les représentations graphiques [51] à plusieurs niveaux, elles permettent de représenter la structure du problème, permettant l'analyse structurelle ou la conception architecturale du système. Les cheminements de puissance et d'information sont explicitement représentés, les comportements élémentaires également.

Une difficulté reste la résolution de l'équation de correspondance (3-6), les solutions n'étant pas évidentes, surtout si le problème est mal ou partiellement posé. Mais cette équation permet de définir l'espace des solutions, information très importante pour la démarche de conception.

Remarquons que ces méthodologies de commande se ramènent à un retour d'état (qui peut être non linéaire) dans le cas de l'*Energy Shaping* et à un retour de sortie dans le cas de l'*Energy Balancing*. Le générateur de trajectoire se détermine à travers l'équation de correspondance (3-6), mais n'apparaît plus explicitement. Complémentairement, la dynamique peut être aussi spécifiée à travers les valeurs propres de $[J - R]$, conformément à une démarche de placement de pôles.

Enfin, ces méthodologies sont surtout développées dans le cadre d'un façonnement de comportement autonome. L'ensemble en interaction $\{\Sigma_{phys} \cup \Sigma_C\}$ devient un système autonome. Il n'existe plus de port vers l'environnement, utilisateur inclus. Ces méthodes nécessitent donc un développement complémentaire dans le cadre des S.A.O., objet du paragraphe ci-dessous.

3.3 Conception structurelle et formelle de l'assistance à opérateur

Aucune de ces méthodologies n'a été mise en œuvre dans le cas de l'assistance, dont les spécificités résident dans un système nominal possédant plusieurs ports avec l'environnement, liés par un lien physique. Le schéma original d'assistance proposé fig. 2-15 permet de poser les interactions que nous souhaitons mettre en place et de décrire un comportement spécifié. Cette description met en évidence que le système d'assistance à opérateur n'est pas, comme ceux présentés § 3.2, un système autonome. Les méthodologies présentées ne peuvent plus être directement appliquées, et doivent être complétées (§3.3.1). Leur validité dans ce nouveau contexte doit aussi être vérifiée (§3.3.2). Certaines propriétés et une synthèse seront exposées §3.3.3 et §3.4.

Les lieux des actions d'assistance, c'est-à-dire la conception architecturale du produit, dépendront de l'espace des solutions trouvées par application de la méthodologie. De même, la synthèse des lois de commande en découle aussi. Les points de départ de la méthode restent le modèle du système nominal et la définition du comportement spécifié du S.A.O.

3.3.1 Obtention de la structure et synthèse de l'assistance

Nous avons défini (définition 2-8) l'expression du comportement global dans une matrice de comportement. Pour pouvoir appliquer les méthodologies précédemment rappelées, il est nécessaire de réexprimer ce comportement dans le formalisme hamiltonien sous la forme de l'équation (3-8). Dans le cas d'une spécification simple (interprétable sous forme de comportements physiques élémentaires décrits dans le tab. 2-1, l'expression hamiltonienne peut facilement être déduite. L'expression du comportement spécifié (3-8) découle donc d'une retranscription d'une structure désirée de comportements élémentaires.

$$\begin{aligned}\dot{\{x\}} &= [J_d(x) - R_d(x)] \cdot \nabla H_d(x) + [g(x)] \cdot \{u\} + [l(x)] \cdot \{d\} \\ \{y_d\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) \\ \{e_d\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H_d(x)\end{aligned}\tag{3-8}$$

Dans notre étude des S.A.O., nous nous plaçons donc dans un cas multiport défini par la fig. 2-15. Cette figure rappelle les interactions retenues aux ports du système non assisté. Les lois de comportement de ce dernier ont été définies par les équations (2-2) et le comportement spécifié à atteindre formalisé par les équations (3-8). Notre objectif est de déterminer $\{h(x)\}$ d'une part, et $\{a(x)\}$ d'autre part, qui caractérise les comportements des éléments d'assistance nécessaires. Avec les notations spécifiques définies dans ce cadre, l'expression de la commande (3-7) devient (3-9) :

$$\{f_a(x)\} = [J(x) - R(x)]\nabla H_a(x) + [J_a(x) - R_a(x)]\nabla H_d(x)\tag{3-9}$$

L'équation (3-9) permet de déterminer le terme $\{f_a(x)\}$ définissant l'assistance, c'est-à-dire les lieux et les lois d'assistance. Ce terme est donc une fonction vectorielle, de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^n , dépendante de l'état $\{x\}$, et de la même dimension n que l'état $\{x\}$. Cette fonction vectorielle, traduit le retour d'état nécessaire afin que l'assistance fasse que le système assistée se comporte comme le système souhaité. Afin de dégager des propriétés sur la structure de l'assistance, il est possible de décomposer $\{f_a(x)\}$ en un produit de plusieurs termes. Ceci peut se faire de différentes manières, chacune portant une signification physique particulière. Nous retenons la décomposition en deux termes : $\{f_a(x)\} = [h] \cdot \{a(x)\}$

- $\{a(x)\}$ est une fonction vectorielle de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^m , où m est le nombre de lois d'assistance distinctes apparaissant dans $\{f_a(x)\}$;
- $[h]$ est une matrice $(n \times m)$, formée de 0 et de 1, précisant les lieux où les actions d'assistance sont nécessaires.

Il n'y a pas unicité de cette décomposition, qui dépend du contenu choisi pour $\{a(x)\}$. Mais, l'important est d'être en mesure de déterminer les lignes non nulles de $[h]$. Cette information permet de définir les lieux d'assistance, qui restent indépendants du choix de décomposition fait précédemment.

Remarquons qu'à travers l'analyse de $[h]$, nous sommes en mesure de qualifier la topologie nécessaire à l'actionnement (voir aussi [2]). En effet, le choix de l'actionnement doit être cohérent avec le type de stockage sur lequel agit l'assistance. S'il s'agit d'un stockage inertiel, l'actionnement doit être source d'effort. Dans le cas complémentaire d'un stockage capacitif, ce dernier doit être source de flux.

Le comportement global atteint par le système assisté devient alors (3-10) :

$$\begin{aligned}
 \{\dot{x}\} &= [J_d(x) - R_d(x)] \cdot \nabla H_d(x) + [g(x)] \cdot \{u\} + [l(x)] \cdot \{d\} \\
 \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\
 \{e\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\
 \{b\} &= [h]^T \cdot \nabla H(x)
 \end{aligned}
 \tag{3-10}$$

3.3.2 Validité théorique de la méthodologie

Afin de vérifier la qualité de l'assistance, nous devons mettre en place un critère de vérification. La définition 2-9 rappelle le critère de déviation proposé par [44]. Celui-ci, basé sur une expression du comportement sous forme d'équations différentielles des entrées et sorties, n'est pas bien adapté au formalisme hamiltonien à ports, qui fait apparaître l'état. Même s'il est possible d'exprimer une représentation d'état sous forme d'équations différentielles des entrées-sorties, la démarche n'est pas aisée, surtout dans le cas d'un comportement non linéaire. Nous proposons donc une définition du comportement hamiltonien (définition 3-1) et un critère de déviation sur le comportement hamiltonien (définition 3-2). Il implique d'avoir accès à l'état et à sa dérivée temporelle, ce qui est envisageable dans une approche théorique ou dans une approche par simulation.

Définition 3-1 : *Système dynamique représenté avec causalité dans le formalisme hamiltonien à ports :*

Un système dynamique représenté causalement dans le formalisme hamiltonien à ports est défini par le quadruplet $\Sigma_L = (\mathbb{R}, \mathcal{J} \times \mathcal{O} = \mathcal{W}, \mathcal{X}, \mathcal{B}_f)$

- \mathbb{R} est l'espace du temps
- $\mathcal{J} \times \mathcal{O} = \mathcal{W}$, une partition entrée/sortie de l'espace des signaux traversant la frontière du système
- \mathcal{X} est l'espace d'état

- \mathcal{B}_f est le comportement complet, sous-espace de $\mathcal{J} \times \mathcal{O} \times \mathcal{X}$ ($\mathcal{B}_f \subseteq \mathcal{J} \times \mathcal{O} \times \mathcal{X}$) tel que (u, y, x) respecte les lois de comportement $\Delta_{PH}(u, y, x, \dot{x}) = 0$:

$$\mathcal{B}_f = \{(u, y, x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{J} \times \mathcal{O} \times \mathcal{X} \mid \{x(t)\} \text{ continu et } \Delta_{PH}(u, y, x, \dot{x}) = 0\}$$

Où :

$$\{\Delta_{PH}(u, y, x, \dot{x})\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{x}\} - [J(x) - R(x)] \cdot \nabla H(x) - [g(x)] \cdot \{u\} \\ \{y\} - [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \end{Bmatrix}$$

Définition 3-2 : Indice de déviation de comportement complet : la perte de transparence ou de réalisme peut être quantifiée par l'indice de déviation entre le comportement spécifié complet \mathcal{B}_f^s et les grandeurs effectivement atteintes $\{u_a(t), y_a(t), x_a(t), \dot{x}_a(t)\}$. Il est défini par :

$$\varepsilon(t) = \|\Delta_{PH}^s(u_a(t), y_a(t), x_a(t), \dot{x}_a(t))\|_2 \quad (3-11)$$

Le comportement spécifié est défini par un système d'équations différentielles. Les variables du comportement effectif du système doivent vérifier ce système. Si ce n'est pas le cas, chaque équation présente une erreur. La déviation de comportement est donc le vecteur formé par les erreurs sur chaque équation. Si nous notons Π_Δ l'espace dans lequel évolue le vecteur $\{\Delta_{PH}^s(u, y, x, \dot{x})\}$, la figure fig. 3-6 illustre la définition du critère de déviation : un critère quantitatif peut être calculé à partir de ce vecteur. Il peut être une norme de ce vecteur. D'autres critères sont envisageables, notamment un critère exprimé en Watt puisque nous utilisons le formalisme à ports. Rappelons que $\{\Delta_{PH}\}$ est homogène en dimension à $\{\dot{x}, y\}$. En utilisant le produit scalaire $\{\Delta_{PH}\}^T \cdot \{\nabla H_d, u\}$, nous obtenons un critère $\varepsilon_W(t)$ exprimé en Watt. Mais, l'usage du produit scalaire implique une perte d'information sur la déviation du comportement car les composantes de $\{\Delta_{PH}\}$ orthogonales à $\{\nabla H_d, u\}$ n'apparaissent plus dans le résultat. Donc, conformément aux travaux cités [44], nous avons choisi la norme L_2 de $\{\Delta_{PH}\}$, qui sera sans dimension.

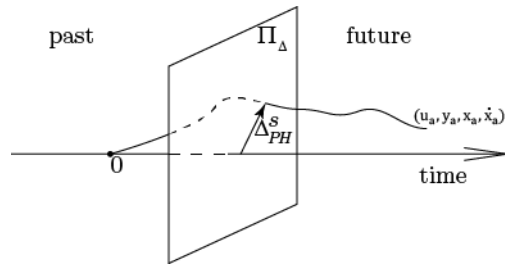


fig. 3-6 – Déviation de comportement

Enfin, nous rappelons que le comportement global spécifié (définition 2-8) définit quatre comportements entre quatre grandeurs. On peut supposer le cas où certains de ces quatre comportements sont *transparents* (pas de déviation de comportement) alors que d'autres dévient de leur comportement désiré. Un critère de déviation sur le comportement global, sur toutes les lois entrées-sorties-états, ne permettrait pas de mettre en évidence la qualité d'un comportement partiel où seule une entrée et une sortie sont considérées. Nous introduisons donc le critère de déviation de comportement partiel, se focalisant sur une entrée et une sortie, l(es) autre(s) entrée(s) étant fixée à 0, et l(es) autre(s) sortie(s) n'étant pas considérée(s).

Définition 3-3 : *Indice de déviation de comportement partiel à $\{u, y\}$:* la perte de transparence ou de réalisme du comportement entre deux grandeurs u_i et y_j , composantes respectivement de $\{u(t)\}$ et de $\{y(t)\}$ est quantifiée par l'indice de déviation de comportement. Il est défini par :

$$\varepsilon_p(t) = \left\| \Delta_{PH}^s \left(u_{ia}(t), y_{ja}(t), x_a(t), \dot{x}_a(t) \right) \right\|_{u_{ka}=0, k \neq i} \quad (3-12)$$

Le système assisté est donc *transparent* si $\varepsilon(t)$ est nul quelque soit la configuration du système. Ceci est vrai si les systèmes d'équations régissant le comportement atteint (équations (3-10)) et le comportement désiré (équations (3-8)) sont identiques. Comparons ces deux systèmes d'équations. A la différence d'un système contrôlé autonome dont le comportement n'est défini que par une équation dynamique (3-5), un S.A.O. en interaction avec son environnement est régi par deux équations de comportement : celle régissant l'état énergétique et celle décrivant les réactions aux ports.

Dans les expressions (3-10) et (3-8), les équations différentielles définissant l'état énergétique sont bien identiques. Nous devons vérifier celles régissant les sorties aux ports. Remarquons que les expressions des sorties désirées dans (3-8) et celles des sorties atteintes dans (3-10) sont différentes. $\{y_d\}$ et $\{y\}$ d'une part, et de $\{e_d\}$ et $\{e\}$ d'autre part, font apparaître des expressions différentes (équations (3-13)). La transparence et le réalisme ne sont pas systématiquement atteints.

$$\begin{aligned} \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \neq \{y_d\} = [g(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) \\ \{e\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H(x) \neq \{e_d\} [l(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) \end{aligned} \quad (3-13)$$

Propriété 3-3 : *Une condition nécessaire assurant transparence et réalisme du système assisté est :*

$$\begin{cases} [g(x)]^T \cdot \nabla H_d = 0 \\ [l(x)]^T \cdot \nabla H_d = 0 \end{cases} \quad (3-14)$$

Preuve : Le système est transparent si l'indice de déviation $\varepsilon(t) = \|(\{y_d\} - \{y\})^2 + (\{e_d\} - \{e\})^2\|$ est nul. Il faut donc que les écarts entre $\{y_d\}$ et $\{y\}$ d'une part, et $\{e_d\}$ et $\{e\}$ d'autre part, soient nuls. D'où :

$$\begin{aligned} &\begin{cases} \{y_d\} - \{y\} = 0 \\ \{e_d\} - \{e\} = 0 \end{cases} \\ &\begin{cases} [g(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) - [g(x)]^T \cdot \nabla H = [g(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) = 0 \\ [l(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) - [l(x)]^T \cdot \nabla H = [l(x)]^T \cdot \nabla H_d(x) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3-15)$$

Remarque : $\nabla H_d(x)$ modélisant les modifications à apporter aux stockages, il découle que, pour atteindre transparence et réalisme, il n'est pas possible de modifier les stockages en lien direct avec l'utilisateur ou la matière d'œuvre. Nous en déduisons la propriété structurelle suivante :

Définition 3-4 : *Un stockage d'énergie dans un bond graph en causalité intégrale uniquement est en lien direct avec une source si le chemin causal qui lie les deux éléments est de longueur 1.*

Propriété 3-4 : *Une condition structurelle nécessaire assurant transparence et réalisme du système assisté est qu'il n'ait aucun lien direct entre les sources modélisant les ports d'interactions et les stockages façonnés.*

Remarque : Le problème soulevé vient essentiellement d'une mise en équation conforme au formalisme hamiltonien à ports mais qui ne permet pas d'atteindre tous les comportements. Pour contourner cette difficulté, nous proposons un formalisme plus complet, présenté équations (3-16) : le formalisme hamiltonien à ports actionnés. De la même façon que nous avons défini des organes d'assistance agissant sur la structure énergétique du système, il est nécessaire d'agir au niveau des ports (termes $h_u \cdot a_u$). Grâce à cette action complémentaire, l'équation (3-13) peut trouver une solution pour atteindre la transparence. Une représentation graphique de cette action supplémentaire est donnée fig. 3-7. Nous faisons le choix de ne pas approfondir cette voie d'amélioration de performances des S.A.O. En effet, l'action sur une grandeur de puissance ($\{y\}$) est différente d'une action sur une variable d'énergie ($\{x\}$). Les conséquences sont importantes sur la causalité de l'interaction et sur la technologie. Cette voie reste toutefois prometteuse.

$$\begin{aligned} \{\dot{x}\} &= [J(x) - R(x)] \cdot \nabla H(x) + [g(x)] \cdot \{u\} + [l(x)] \cdot \{d\} + [h] \cdot \{a(x)\} \\ \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) + [h_u] \cdot \{a_u(x)\} \\ \{e\} &= [h(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{b\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{b_u\} &= [h_u]^T \cdot \{u\} \end{aligned} \tag{3-16}$$

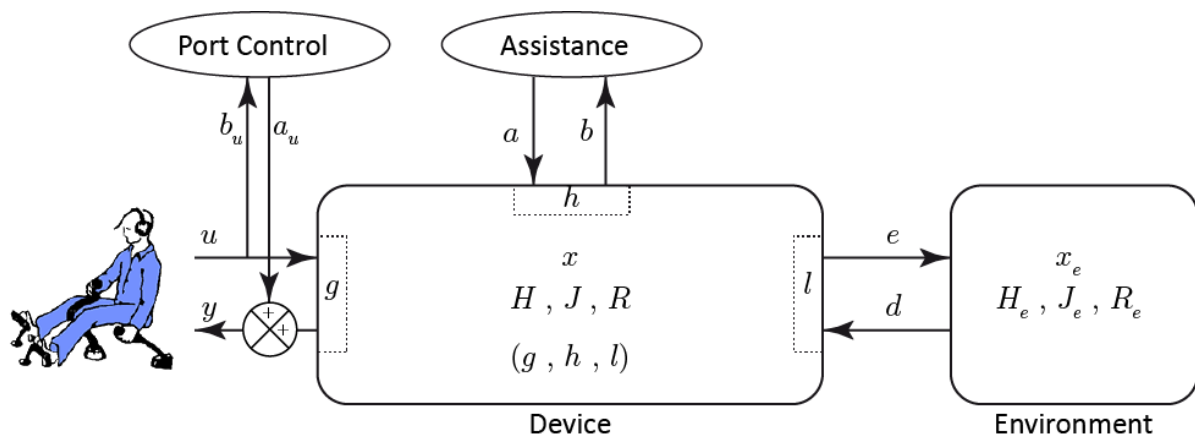


fig. 3-7 – Assistance avec ports actionnés

Enfin, si nous avons pu déterminer les conditions de transparence des S.A.O., il reste à étudier leur passivité. Intrinsèquement, un système hamiltonien à ports se qualifie par sa passivité (propriété 1-6). Autrement dit, au sein du système, il n'y a pas création d'énergie ; elle ne peut être que dissipée. Tant que le comportement spécifié se ramène à celui d'un système hamiltonien à ports, le S.A.O. est passif (équation (3-17)).

$$H_d(x(t)) \leq H_d(x(0)) + \int_0^t (y^T \cdot u + e^T \cdot d) dt \quad (3-17)$$

Dans le cas d'une fonctionnalité de *power scaling*, il y a création d'énergie au sein du système, ou à ses ports. En effet, nous avons précisé, équation (2-5), que la puissance à un port était un multiple de la puissance à l'autre. La différence de puissance vient de la source auxiliaire incluse dans les organes d'assistance. Dans ce cas, le système ne peut plus être qualifié d'hamiltonien. Pourtant, ce comportement reste très usuel dans le cas des systèmes à assistance. S'il ne peut plus être qualifié de passif, il reste sous certaines conditions dissipatif [47]. Nous rappelons la condition de dissipativité équation (3-18). Notons que la passivité est le cas particulier du critère de dissipativité où $s(t) = y^T \cdot u$.

Définition 3-5 : *Un système est dit dissipatif vis-à-vis d'une fonction d'alimentations (u, y) s'il existe une fonction $V(x)$ telle que pour tout x_0 et tout $t > t_0$ et pour toute entrée u :*

$$V(x(t)) \leq V(x(0)) + \int_0^t s(u(t), y(t)) dt \quad (3-18)$$

Afin de dégager des conditions nécessaires à la dissipativité lors de l'usage d'un **PTF** ou d'un **PGY** au sein d'un S.A.O., nous rappelons les travaux détaillés dans [47]. Des conditions sur la structure peuvent être déduites. Deux exemples de systèmes, dissipatifs et non dissipatifs, sont donnés fig. 3-8 et explicités ci-dessous.

Définition 3-6 : [47] *Un bond graph contenant un ou des multiplicateurs de puissance est dit **uniquement connecté** à un de ses **PTF** ou **PGY** si le bond graph est séparé en deux graphes disjoints si ce multiplicateur de puissance est retiré.*

Propriété 3-5 : [47] *Dissipativité d'un système comprenant des éléments d'amplification de puissance : un bond graph comprenant des multiplicateurs de puissances mais uniquement connecté à chacun d'eux est dissipatif vis-à-vis de la fonction d'alimentation adéquat.*

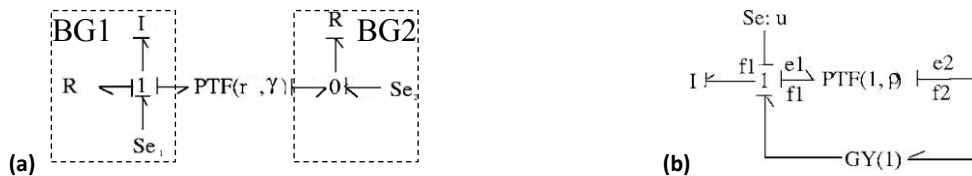


fig. 3-8 – Bond-graph à multiplicateur de puissance (a) dissipatif (b) non dissipatif [47]

En effet, nous pouvons noter que le bond graph de la figure fig. 3-8-a se décompose en deux bond graphs disjoints, noté BG_1 et BG_2 , en retirant le multiplicateur de puissance. Alors, BG_1 définit un hamiltonien $H_1(t)$ et reçoit une puissance $s_1(t)$ de la source Se_1 et une puissance $s_{21}(t)$ de BG_2 . L'équation de la passivité associée à $BG_1(t)$ s'écrit (3-19) :

$$H_1(t) \leq H_1(0) + \int_0^t s_1(t) + s_{21}(t) dt \quad (3-19)$$

De même pour le sous graphe BG_2 :

$$H_2(t) \leq H_2(0) + \int_0^t s_2(t) + s_{12}(t) dt \quad (3-20)$$

Or, le multiplicateur de puissance est défini par la relation $s_{12}(t) = -\gamma \cdot s_{21}(t)$, l'orientation des demi-flèches imposant le signe. Il est alors possible de définir une fonction $V(t)$:

$$\begin{aligned} V(t) &= \gamma H_1(t) + H_2(t) \\ &\leq \gamma H_1(0) + H_2(0) + \int_0^t \gamma s_1(t) + s_2(t) + \gamma s_{21}(t) + s_{12}(t) dt \\ &\leq V(0) + \int_0^t \gamma s_1(t) + s_2(t) dt \end{aligned} \quad (3-21)$$

Le bond graph complet est bien dissipatif vis-à-vis de la fonction d'alimentation $s(t) = \gamma s_1(t) + s_2(t)$.

Par ailleurs, l'exemple de fig. 3-8-b ne respecte pas la condition de connexion unique à un **PTF**. Il peut alors être non-dissipatif. En effet, l'équation d'état associée est donnée (3-22). Le comportement est instable si $\rho > 1$. Cet exemple met en évidence qu'une « boucle de puissance » comprenant un multiplicateur de puissance peut entraîner une augmentation infinie de l'hamiltonien associé au S.A.O.

$$I \frac{df_1}{dt} = \left(1 - \frac{1}{\rho}\right) f_1 + u \quad (3-22)$$

Pour définir les conditions de dissipativité, nous nous limitons à celles exposés ci-dessus. Des conditions de dissipativité moins restrictives pourraient être formulées en tenant compte des dissipations et de la structure énergétique du système. Enfin, notons qu'il est donc nécessaire, pour éviter des comportements instables, que la structure d'interaction homme-assistance-matière d'œuvre ne fasse pas apparaître de retour de puissance par un autre cheminement. Ce cas de figure apparaît notamment dans le pilotage d'un hélicoptère : le pilote interagit avec son aéronef via le manche (et la chaîne de commande de vol assistée), mais subit aussi la dynamique du vol. La puissance d'assistance pourrait alors revenir au pilote et accentuer des instabilités de type « *Rotorcraft Pilot Couplings* ».

Il reste à répondre à la question si l'introduction d'éléments multiplicateurs de puissance est compatible avec l'approche proposée §3.3.1, basée sur l'expression d'un comportement hamiltonien passif, et Si la condition structurelle précisée propriété 3-5 est respectée, le comportement est dissipatif. Le bond-graph peut alors se mettre sous la forme dérivée des équations (3-10) en ajoutant un terme associé aux multiplicateurs de puissances sous la forme d'une matrice $[PS]$. Cette matrice n'est pas anti-symétrique, le comportement n'est pas passif mais dissipatif. Il s'exprime sous la forme des équations (3-23). L'approche par identification et l'usage de l'équation de correspondance reste valable. Pour la suite, l'application de la méthodologie à ce cas de figure introduira la loi d'assistance $[h]\{a(x)\}$ qui dépendra alors de tous les termes $[J_d(x)]$, $[R_d(x)]$, $H_d(x)$ et $[PS]$ (voir §3.5.3 et §4 pour des exemples d'applications).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}\} &= [J_d(x) - R_d(x) + PS] \cdot \nabla H_d(x) + [g(x)] \cdot \{u\} + [l(x)] \cdot \{d\} \\ \{y\} &= [g(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{e\} &= [l(x)]^T \cdot \nabla H(x) \\ \{b\} &= [h]^T \cdot \nabla H(x) \end{aligned} \quad (3-23)$$

3.3.3 Propriétés dans le cas des comportements linéaires

Une autre spécificité de d'un S.A.O. est la présence d'une chaîne de transmission physique. On peut alors se poser la question des conséquences de celle-ci sur les comportements assistés envisageables. En effet, l'existence de cette chaîne impose certains cheminements de puissance auxquels il est impossible de se soustraire. Il est donc nécessaire de spécifier des comportements cohérents avec cette contrainte. Nous cherchons ici à dégager des propriétés sur le système physique ou sur les comportements accessibles du système assisté. Le comportement spécifié doit respecter ces propriétés. En d'autres termes, la spécification est contrainte par ces propriétés. L'étude proposée se limite au cas linéaire. Dans le cas de l'étude du comportement atteint comme dans le cas du comportement spécifié, le passage de l'expression hamiltonienne à la matrice de transfert se fait de la même façon.

Propriété 3-6 : *L'expression de la matrice de transfert du comportement atteint s'écrit à partir du formalisme hamiltonien à ports dans le cas linéaire sous la forme :*

$$\begin{Bmatrix} y \\ e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g^T \\ l^T \end{bmatrix} [Q][sI - [J_d - R_d]Q_d]^{-1} [g \ l] \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix} \quad (3-24)$$

Preuve : A partir de l'expression hamiltonienne du comportement atteint (3-10) en linéaire ($\nabla H_d(x) = Q_d \cdot x$ et $\nabla H(x) = Q \cdot x$), il est possible d'exprimer le comportement par représentation d'état (équation (3-25)), puis sous celle de la matrice de transfert (3-24).

$$\begin{aligned} \{x\} &= [sI - [J_d - R_d]Q_d]^{-1} [g \ l] \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix} \\ \{y\} &= g^T \cdot Q \cdot \{x\} \\ \{e\} &= l^T \cdot Q \cdot \{x\} \end{aligned} \quad (3-25)$$

Remarque : Si la propriété 3-3 est vérifiée, les matrices de transfert des comportements atteint et spécifié sont égales (équation (3-26)) :

$$\begin{bmatrix} g^T \\ l^T \end{bmatrix} [Q][sI - [J_d - R_d]Q_d]^{-1} [g \ l] = \begin{bmatrix} g^T \\ l^T \end{bmatrix} [Q_d][sI - [J_d - R_d]Q_d]^{-1} [g \ l] \quad (3-26)$$

Afin de nous ramener à une expression du comportement sous forme de matrice de transfert, nous introduisons, équation (3-27), $M^d(s)$, la matrice de transfert décrivant la dynamique atteinte par le système assisté. La matrice de transfert $G^d(s)$ décrivant le comportement spécifié en linéaire est rappelée équation (3-28). La mise en correspondance de ces deux expressions est donnée équation (3-29).

$$M^d(p) = [Q_d][sI - [J_d - R_d]Q_d]^{-1} \quad (3-27)$$

$$\begin{Bmatrix} y \\ e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{yu}^d(s) & Z_{yd}^d(s) \\ Z_{eu}^d(s) & Z_{ed}^d(s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix} \quad (3-28)$$

$$\begin{cases} g^T \cdot M^d(s) \cdot g = Z_{yu}^d(s) \\ g^T \cdot M^d(s) \cdot l = Z_{yd}^d(s) \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot g = Z_{eu}^d(s) \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot l = Z_{ed}^d(s) \end{cases} \quad (3-29)$$

Propriété 3-7 : *Dynamique commune aux comportements locaux : les 4 fonctions de transfert $\{Z_{yu}^d(s), Z_{yd}^d(s), Z_{eu}^d(s), Z_{ed}^d(s)\}$ doivent avoir un même comportement dynamique (même dénominateur $D^d(s)$ dans la matrice de transfert $G^d(s)$)*

Preuve : $M^d(s)$ fait apparaître à son dénominateur les mêmes pôles. Or $M^d(s)$ se retrouve dans l'expression des quatre fonctions de transfert. Elles ont donc une dynamique commune, les mêmes pôles dont certains peuvent s'annuler avec les zéros. Le découplage entre les dynamiques peut facilement s'étudier à partir de la représentation bond-graph [55].

Propriété 3-8 : *Contrainte sur le système nominal dans le cas du Contrôle d'Impédance : g et l doivent être orthogonaux vis-à-vis de l'application bilinéaire $M^d(s)$*

Preuve : Dans le cas du contrôle d'impédance, les équations (3-29) deviennent celle présentées en (3-30). La seconde ou la troisième équation impose l'orthogonalité de g et l .

$$\begin{cases} g^T \cdot M^d(s) \cdot g = Z_{yu}^d(s) \\ g^T \cdot M^d(s) \cdot l = 0 \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot g = 0 \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot l = Z_{ed}^d(s) \end{cases} \quad (3-30)$$

Remarque : Dans le cas où $M^d(s)$ est quelconque, g et l orthogonaux revient ce qu'ils n'aient pas de composantes non nulles communes. Physiquement parlant, opérateur et matières d'œuvre n'agissent pas directement sur le(s) même(s) stockage d'énergie. L'exemple de la fig. 3-9 ne respecte pas cette propriété. Le contrôle d'impédance n'est pas possible.

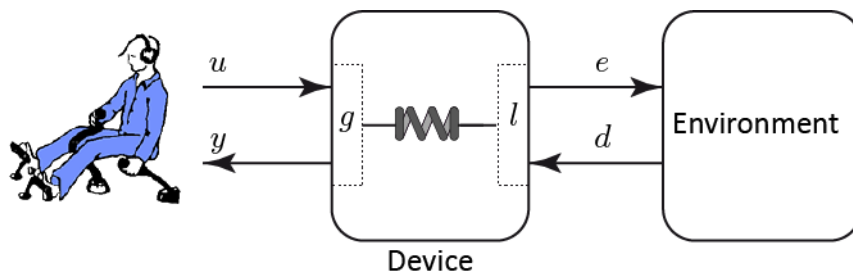


fig. 3-9 – Exemple de structure ne respectant pas la propriété 3-8

Propriété 3-9 : *Contrainte sur le comportement atteint dans le cas du power scaling : les fonctions de transfert aux ports ne peuvent pas être nulles.*

Preuve : Dans le cas d'un *power scaling* pur, les équations (3-29) se réexpriment par (3-30). Les premières et dernières équations ne peuvent être vérifiées.

$$\begin{cases} g^T \cdot M^d(s) \cdot g = 0 \\ g^T \cdot M^d(s) \cdot l = Z_{yd}^d(s) \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot g = Z_{eu}^d(s) \\ l^T \cdot M^d(s) \cdot l = 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

Remarque : Spécifier un *power scaling* pur reviendrait à un espace de solution vide. Il est nécessaire de ne pas les spécifier. Malgré la présence d'un élément de multiplication de puissance, la dynamique des stockages de la transmission physique est ressentie par l'utilisateur.

L'ensemble des propriétés (3-6) à (3-8) définissent, dans le cadre d'un comportement linéaire, des contraintes à respecter pour que l'équation de correspondance (3-6) admette une solution. A défaut, aucune assistance ne pourra être définie. Le comportement spécifié ne peut donc pas être « idéal », au sens d'un intitulé trop simpliste. Il doit pratiquement être dégradé, adapté à la structure existante pour qu'il permette d'atteindre une solution. Nous distinguerons dorénavant le **comportement spécifié idéal** et le **comportement spécifié pratique**. Enfin, les propriétés ont été développées ci-dessus dans le cas linéaire. Elles devront être étayées dans le cas non linéaire.

3.4 Synthèse méthodologique

Maintenant que nous avons présenté les propriétés, contraintes et règles permettant d'assurer la dissipativité et la transparence du S.A.O., il nous semble nécessaire de synthétiser l'approche méthodologique proposée dans le contexte de la conception et du développement de systèmes multi-domaines. Cette synthèse est présentée ci-dessous. La méthodologie est appliquée §3.5. Le lecteur pourra s'y référer pour illustrer les propos.

Comme introduit §1, l'approche voulue est globale, non segmentée. Elle s'appuie sur des modèles à plusieurs niveaux de représentation et multi-domaine pour s'accorder à l'ingénierie basée sur les modèles et ses bonnes pratiques [56]. Nous souhaitons donc introduire des représentations complémentaires, reflétant différents niveaux de détails de représentation d'un même système (voir fig. 3-10 illustrant le cas d'étude développé §3.5.2). Une représentation de plus haut niveau encapsule les caractéristiques d'un modèle, accessible à un niveau de représentation plus détaillée multi-domaine qui pourra contenir les détails technologiques du système.

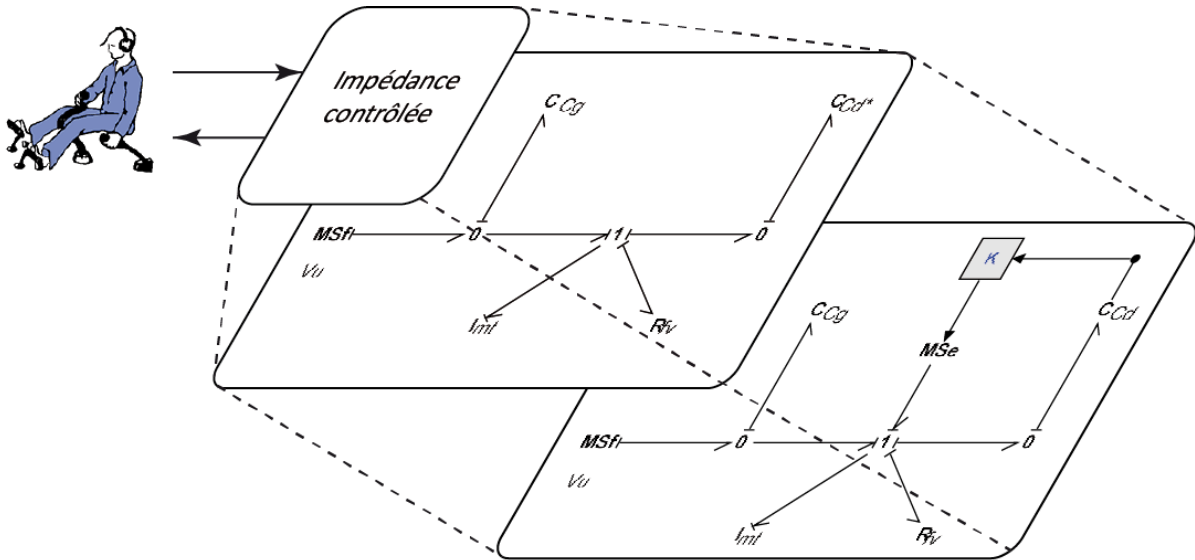


fig. 3-10 – Représentation multi-niveau d'un S.A.O.

L'approche multi-physique dans le paradigme énergétique permet une représentation de haut niveau des différents domaines de la physique sous la forme d'une structure d'organe ou de comportements. En associant à cette représentation les cheminements d'informations permettant la commande, la représentation obtenue est qualifiée de multi-domaine ou cyber-physique. Une représentation plus synthétique trouve un double intérêt : d'une part, elle permet une vision intermédiaire du système ; d'autre part, elle permet d'exprimer le comportement spécifié en accord avec ce même niveau de représentation, c'est-à-dire comme une structure de comportements locaux qui globalement sera dissipative et pourra être non-linéaire. Notre approche est donc basée sur un modèle de comportement spécifié.

La méthodologie de définition de l'assistance repose sur la résolution de l'équation de correspondance rappelée équation (3-32) entre le modèle du système physique assisté et le modèle de comportement spécifié :

$$[h].\{a(x)\} = [J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d(x) - [J(x) - R(x)]\nabla H(x) \quad (3-32)$$

La définition de l'assistance, exprimée par le terme $[h(x)].\{a(x)\}$, revient à supprimer certains comportements et à imposer de nouveaux comportements. La dissipativité et la transparence sont assurées si les contraintes exposées §3.2 et §3.3 sont respectées. Une analyse plus fine peut être menée en retranscrivant l'équation (3-32) sous la forme (3-33), afin de faire apparaître les modifications structurelles et comportementales à introduire.

$$[h].\{a(x)\} = [J(x) - R(x)]\nabla H_a(x) + [J_a(x) - R_a(x)]\nabla H_d(x) \quad (3-33)$$

(3-33) fait apparaître $H_a(x)$, qui correspond à l'énergie à introduire pour modifier les comportements voulus, et $[J_a(x) - R_a(x)]$ qui correspond aux modifications de structure souhaitées. Cette explicitation permet de mettre en évidence les contraintes sur $\nabla H_a(x)$, sur $[J_a(x)]$ et $[R_a(x)]$ supplémentaires à celles définies p. 52. L'assistance s'apparente alors à un retour d'état (les entrées pilotées $\{a(x)\}$ dépendent de l'état) dont l'objectif n'est d'asservir ni l'état ni les sorties mais de faire que le comportement du système assisté corresponde à celui du comportement spécifié.

La méthodologie de définition de l'assistance repose sur la résolution de l'équation de correspondance (3-9). Les contraintes permettant d'assurer la dissipativité et la transparence du S.A.O. sont donc étroitement liées à la structure physique à assister. Amener un système physique à se comporter selon une spécification **idéale** n'est pas toujours possible. Il faut alors envisager un compromis inhérent aux Sciences de l'Ingénieur : en **pratique**, la spécification idéale doit être altérée pour tenir compte de la réalité physique du système et pouvoir trouver une solution à l'équation de correspondance. La fig. 3-11 propose une vision synoptique du contexte dans lequel se fait le choix du comportement spécifié pratique. Se pose alors la question : comment appréhender ce compromis ? L'approche analytique n'est pas privilégiée ici. En effet, l'approche graphique, porteuse du sens physique, est préférée pour mener les analyses. Notons toutefois que la rigueur de l'approche graphique permet tout à fait une mise en place systématique de la méthodologie proposée.

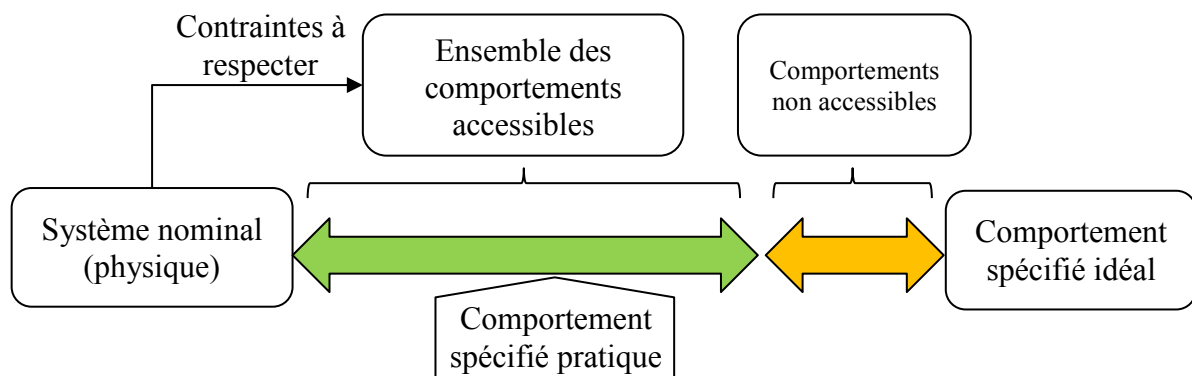


fig. 3-11 – Synoptique : choix du comportement spécifié pratique

La première étape nécessite l'étude de la structure physique existante. L'outil bond-graph reste tout à fait adapté à l'étude de ses propriétés structurelles, notamment de sa commandabilité structurelle [29]. Le système nominal doit être commandable et observable. Le cas inverse implique des contraintes supplémentaires développées plus bas.

La deuxième étape est de définir, à partir d'un comportement spécifié idéal, l'ensemble des comportements accessibles (hamiltonien respectant la propriété 3-1 et/ou à multiplicateur de puissance passif respectant la propriété 3-4) qui permettent la résolution de l'équation de correspondance. Le comportement spécifié pratique doit être choisi dans cet ensemble. Notamment, il doit tenir compte des couplages dynamiques de la structure nominale. L'approche graphique de la représentation de la structure à travers la représentation multiphysique Bond-Graph permet une mise en évidence explicite des couplages. *A fortiori*, l'étude fine des couplages peut être réalisée comme précisé dans [55].

Partant de la représentation graphique du système nominal, telle que présentée par exemple fig. 3-2, le comportement global sera obtenu par modification virtuelle des comportements élémentaires ou de la structure par les quatre outils de modification de comportement ou de lien de structure vus § 3.2 : le façonnement d'énergie d'un ou plusieurs stockage(s) d'énergie ; l'équilibrage d'énergie ; l'assignation et le façonnement de dissipation d'énergie ; la modification de structure. Notons que chaque modification implique l'introduction d'une ou plusieurs chaînes d'actionnement, le nombre maximum d'actionnements nécessaires sera au plus égal à l'ordre de la représentation hamiltonienne à ports du système non assisté. Par cette approche de spécification, il est alors possible de jauger le nombre d'actionnements nécessaires en fonction des modifications apportées.

Le compromis réside dans le choix du comportement spécifié pratique : dans la mesure où il respecte les propriétés nécessaires, plus il est proche du comportement nominal, moins l'action d'assistance sera riche (en terme de quantité d'actionnements et de mesures nécessaires), et plus il est éloigné de la spécification idéale, et inversement. La dégradation d'un comportement idéal en un comportement pratique apparaît sous trois formes : l'existence de modes propres liés à la dynamique des stockages physiques d'énergie, le couplage entre certaines dynamiques du système et le couplage non-souhaité entre certaines grandeurs d'interaction. Les comportements spécifié et pratique sont alors intrinsèquement différents. Une question non élucidée ici est la quantification de cet écart entre comportements spécifié et pratique qui pourrait prendre forme dans un critère de transparence pratique.

Enfin, notons que, puisque le comportement spécifié pratique a été mis sous la forme d'une structure de comportements physiques élémentaires globalement dissipative et transparente, nous obtenons les deux représentations graphiques désirées d'un même S.A.O. (fig. 3-10) : d'une part, la représentation synthétique du comportement, c'est-à-dire celle du comportement spécifié pratique, qui sera théoriquement atteint par le S.A.O. ; d'autre part, la représentation cyber-physique détaillant le système physique lui-même, les actionnements et les cheminements d'informations nécessaires à l'assistance.

Dans une approche de conception « *Top-Down* », maintenant que l'architecture de l'assistance est définie, il est nécessaire de la concrétiser en recherchant les solutions technologiques associées. *A fortiori*, cette définition de l'assistance peut servir à la spécification des solutions technologiques, en termes de dimensionnement, de bande passante, de résolution, etc. Notons aussi que les solutions technologiques ne sont pas forcément actives. Des solutions semi-actives ou des organes passifs peuvent répondre aux comportements nécessaires à l'assistance et exprimés dans le terme $\{h(x)\}. [a(x)]$.

De plus, dans cette approche descendante vers le niveau « composant », des contraintes technologiques supplémentaires peuvent apparaître. Il n'est pas toujours possible d'agir ou de mesurer où nous le souhaitons. Cependant, l'assistance s'apparentant à un retour d'état, elle nécessite certaines mesures et certains actionnements. Les questions de la commandabilité et de l'observabilité se posent. La commandabilité et l'observabilité d'un système non linéaire par une approche graphique et structurelle restent une problématique scientifique qui n'est pas abordée dans ce mémoire. Nous nous limitons à l'usage, dans le cas linéaire, de la commandabilité et de l'observabilité structurelles associées à l'étude des propriétés structurelles permises par le bond graph [15].

La problématique de l'observabilité apparaît si le rang bond graph n'est pas plein. Les paragraphes suivants mettent en perspective les notions de commandabilité et d'observabilité dans le cadre de notre approche basé sur un modèle de comportement spécifié. Rappelons que l'observabilité au sens de Kalman d'un système permet de qualifier la possibilité d'estimer l'état d'un système grâce à un observateur d'état. L'observabilité structurelle permet de qualifier si les capteurs sont suffisamment nombreux et bien situés pour permettre l'estimation de l'état. Si l'état est observable, alors la méthodologie peut être employée. Un observateur d'état pourra être nécessaire pour estimer $\{x\}$, utilisé pour déterminer l'assistance $\{a(x)\}$. L'usage d'un observateur ajoute une dynamique à notre système. Cette dynamique pourra-t-elle être représentée à un niveau synthétique ?

Si le système n'est pas observable, autrement dit, si seule une partie de l'état est estimable par observateur, alors nous pouvons décomposer le vecteur d'état $\{x\} = \{x_o, x_{no}\}$ en deux parties, $\{x_o\}$ les composantes observables et $\{x_{no}\}$ les composantes non observables. Alors, nous

pouvons en déduire que les trois termes de modification de comportement à apporter $\nabla H_a(x_0)$, $J_a(x_0)$, $R_a(x_0)$ ne doivent dépendre que de $\{x_0\}$.

La commandabilité peut aussi être étudiée structurellement par le bond graph. Elle met en évidence les modes dynamiques non commandables. Elle est donc utile pour l'asservissement de l'état ou des sorties du système. Mais, notre approche basée sur un modèle de comportement spécifié ne vise pas à asservir une grandeur. Nous cherchons à maîtriser le comportement, à façonner une structure (passive ou dissipative) et des comportements locaux. La problématique revient à une solution à l'équation de correspondance. Si les lieux d'actionnement, définis par $[h]$, sont imposés, $[h(x)]$ n'est plus quelconque, mais est imposée par les contraintes technologiques. Notons $[h_c]$ la matrice des lieux d'actionnement imposés par la technologie. Certaines de ses lignes seront nulles, traduisant l'absence d'action possible sur certains stockages. L'équation de correspondance s'écrit alors (3-34) et peut ne pas avoir de solution. Les n lignes nulles de $[h_c]$ imposent des contraintes sur $\nabla H_a(x)$, sur $[J_a(x)]$ et $[R_a(x)]$ pour que (3-34) admette une solution.

$$[h_c] \cdot \{a(x)\} = [J(x) - R(x)]\nabla H_a(x) + [J_a(x) - R_a(x)]\nabla H_d(x) \quad (3-34)$$

Les contraintes technologiques peuvent donc avoir des conséquences sur la commandabilité et l'observabilité du système. Ces contraintes peuvent être réexprimées en termes de contraintes sur le comportement spécifié pratique et être intégrées dans une phase amont de conception. Ceci implique que la démarche globale proposée soit intégrée dans une plateforme logicielle adaptée. Ce n'est pas l'objet des travaux présentés qui visent seulement à poser la démarche.

Enfin, notons que nous avons posé des limites à l'assistance en nous imposant une condition suffisante à la dissipativité. En effet, la partie physique est intrinsèquement passive. Mais, l'injection d'énergie par l'assistance peut rendre le système instable. Si la synthèse de l'assistance est réalisée par façonnement d'énergie, les lois d'assistance maintiennent la passivité du S.A.O. Cependant, nous avons illustré que certains comportements spécifiés de type multiplicateur de puissance rendent le système non passif et que, sous une condition de structure, ils restent dissipatifs. Les conditions moins restrictives de dissipativité doivent être approfondies afin de qualifier plus largement les systèmes cyber-physiques.

La robustesse des lois d'assistance doit aussi être abordée. La synthèse de la commande est déterminée à partir du modèle de comportement du système physique. Or tout modèle physique implique des erreurs de modélisation. Ces erreurs paramétriques, sous forme de représentation linéaire fractionnaire, peuvent être modélisées dans le formalisme bond graph [57] et partiellement dans le formalisme hamiltonien à port [3]. Elles auront une conséquence sur la passivité du comportement du S.A.O. En effet, comment choisir $H_a(x)$ qui respecte les propriétés nécessaires si $H(x)$ est incertain ? Si les outils de modélisation des incertitudes existent, il reste à développer les contraintes de passivité avec un modèle incertain dans notre cas d'usage. Remarquons qu'une perturbation n'altère pas le caractère passif ou dissipatif de notre système.

Enfin, les incertitudes paramétriques comme les perturbations peuvent dégrader le comportement. Le critère de déviation de comportement proposé peut alors être utilisé dans ce contexte : la simulation d'un comportement incertain ou perturbé dévie du comportement non perturbé. Le critère de déviation permet de quantifier l'influence des perturbations et des incertitudes. Cependant, son interprétation n'est pas évidente. Il reste nécessaire de renforcer son contenu sémantique.

Nous avons, au cours de cette synthèse, rappelé les outils développés, présenté le contexte de leur utilisation et précisé les limites de leur utilisation. Afin de mettre en évidence leur usage, une étude de cas sur une illustration simple est menée chapitre §3.5.

3.5 Etudes de cas

La méthodologie étant posée, nous proposons de l'appliquer aux deux cas d'assistance spécifiés précédemment introduits : le *Contrôle d'Impédance* et le *Power Scaling*. Mais avant, nous devons étudier la commandabilité et l'observabilité du système à assister.

3.5.1 Commandabilité et observabilité du cas d'étude générique.

Le rang bond-graph du système à assister, présenté fig. 3-2, n'est pas complet. Il est de rang 2. Ce qui se vérifie aussi par le rang de la matrice $[J(x) - R(x)]$ (équation (3-1)) qui est de rang 2. Les dynamiques q_g et q_d sont liées. Le système peut ne pas être structurellement commandable et observable. Supposons le cas où la dynamique q_d n'est pas commandable, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'agir sur ce stockage d'énergie. L'assistance s'exprime alors équation (3-35) :

$$[h]\{a(x)\} = \begin{bmatrix} 0 \\ h_1 \cdot a_1(x) \\ h_2 \cdot a_2(x) \end{bmatrix} = \underbrace{[J(x) - R(x)]\nabla H_a(x)}_{\boxed{1}} + \underbrace{[J_a(x) - R_a(x)]\nabla H_d(x)}_{\boxed{2}} \quad (3-35)$$

Les éléments $\nabla H_a(x)$, $[J_a(x)]$ et $[R_a(x)]$ doivent être choisis pour respecter l'équation (3-35). Ils ne peuvent plus être quelconques. Si l'on souhaite uniquement des modifications de comportements (le terme $\boxed{2}$ serait nul), le terme $\boxed{1}$ impose que ∇H_a soit indépendant de p_t , la quantité de mouvement associée à l'inertie de m_t . Inversement, si l'on souhaite uniquement une modification de structure (le terme $\boxed{1}$ serait nul), le terme $\boxed{2}$ impose que la première ligne de $[J_a(x) - R_a(x)]$ soit nulle. Des modifications comportementales et structurelles entraînent des contraintes moins explicites.

De même, supposons maintenant qu'il n'est pas possible de mesurer q_g , cette variable d'état étant non observable. Les trois termes $\nabla H_a(x)$, $[J_a(x)]$ et $[R_a(x)]$ doivent être indépendants de q_g . Ce qui traduit encore des contraintes sur le comportement spécifié pratique. Globalement, par cette illustration linéaire, nous mettons en évidence que les contraintes de commandabilité et observabilité structurelle, liées à la technologie du S.A.O. se traduisent par des contraintes sur le comportement spécifié pratique. La commandabilité et l'observabilité peuvent être assurées si les contraintes inhérentes sont intégrées au plus tôt dans la démarche de conception. Pour la suite de l'étude de l'illustration, nous supposons qu'il n'existe pas de contraintes technologiques sur l'observabilité et la commandabilité.

3.5.2 Cas du contrôle d'impédance

Notre démarche est celle exposée § 3.4. A partir d'un comportement spécifié idéal, nous choisissons un comportement spécifié pratique tenant compte de la structure physique. La mise en œuvre de la méthodologie *IDA-PBC* permet d'obtenir les lois d'assistance. Nous validerons par simulation les lois obtenues, dans le cas linéaire puis dans le cas non linéaire. Dans le cas linéaire, une analyse des résultats est menée par la comparaison entre les matrices de transfert des comportements spécifiés pratiques et atteint.

Considérons dans un premier temps le comportement spécifié idéal celui décrit par la matrice de transfert (3-36), où les compliances introduites, C_d^* côté utilisateur et C_d^* côté matière d'œuvre, sont linéaires par rapport à l'état. Sa représentation graphique équivalente est donnée fig. 3-12. Nous abordons la méthodologie par l'approche graphique préconisée § 3.4.

$$\begin{Bmatrix} y \\ e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C_g^* p & 1 \\ 0 & \frac{1}{C_d^* p} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix} \quad (3-36)$$

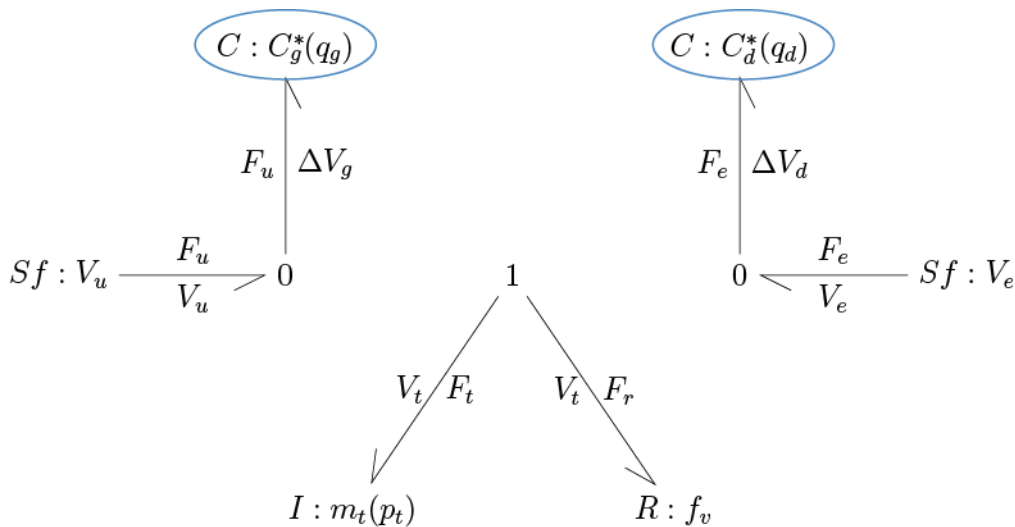


fig. 3-12 – Comportement spécifié idéal d'un contrôle d'impédance

Conformément à la propriété 3-3, il n'est pas possible de façonner les raideurs directement voisines des ports d'interactions avec l'environnement. Le comportement spécifié idéal n'est donc pas accessible, l'équation de correspondance ne trouvera pas de solution. Nous dégradons le comportement spécifié idéal vers un comportement spécifié pratique présenté fig. 3-13 et appelé comportement désiré par la suite. Nous nous concentrons sur un seul façonnement de souplesse. D'une part, C_g reste inchangé ($C_g = C_g^*$) et d'autre part, nous cherchons à façonner C_d en $C_d^* = C_d + C_{da}$, avec $C_d^* > 0$ pour satisfaire les conditions de la propriété 3-1.

Selon le critère de réalisme (propriété 3-3), les conditions de réalisme seront vérifiées vu du port utilisateur, mais non vérifiées vu du port matière d'œuvre. Nous faisons ce choix dans le but de caractériser les conséquences d'un respect partiel de la propriété 3-3. Nous attendons donc que, localement, l'effort ressenti par l'utilisateur, dû à son mouvement ou son intention, corresponde au comportement spécifié pratique, selon le critère de *réalisme*. Globalement, le comportement général ne sera pas réaliste. Autrement dit, l'utilisateur ressentirait une raideur maîtrisée à travers une chaîne de transmission ressort-masse. Si cette chaîne était suffisamment raide (bande passante supérieure à celle du mouvement de l'utilisateur), elle ne serait quasiment pas ressentie.

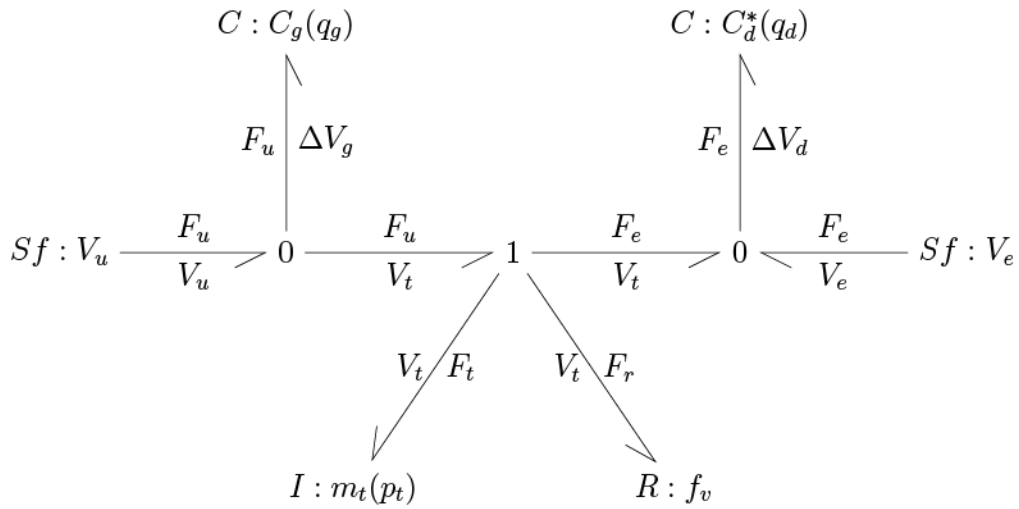


fig. 3-13 – Comportement spécifié pratique dans le cas du contrôle d'impédance

A la représentation graphique de la fig. 3-13, nous pouvons associer une expression hamiltonienne à ports (non détaillée ici). Les bases nécessaires à l'application de la méthodologie sont réunies : les hamiltoniens désirés et adjoints sont exprimés équations (3-37) en fonction du vecteur d'état (équation (3-1)). L'expression générale des actions d'assistance est obtenue équations (3-39). La décomposition structurelle est effectuée équation (3-40).

$$H_d(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{q_g^2}{C_g} + \frac{p_t^2}{m_t} + \frac{q_d^2}{C_d^*} \right) = \frac{1}{2} \{x\}^T [Q_d] \{x\} \quad (3-37)$$

$$H_a(x) = H_d(x) - H(x) = \frac{1}{2} q_d^2 \left(\frac{1}{C_d + C_{da}} - \frac{1}{C_d} \right) = \frac{1}{2} q_d^2 \frac{-C_{da}}{C_d(C_d + C_{da})}$$

$$\nabla H_a = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -C_{da} \\ q_d \frac{-C_{da}}{C_d(C_d + C_{da})} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -\frac{q_d}{C'_a} \end{array} \right\} \quad (3-38)$$

$$C'_a = \frac{C_d(C_d + C_{da})}{C_{da}}$$

D'après (3-9) :

$$[h] \cdot \{a(x)\} = [J - R] \cdot \nabla H_a = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & -f_v & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -\frac{q_d}{C'_a} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{q_d}{C'_a} \\ 0 \end{array} \right\} \quad (3-39)$$

$$[h] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \{a(x)\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{q_d}{C'_a} \\ 0 \end{array} \right\} \quad (3-40)$$

Remarque : Le contenu de $[h]$ indique qu'il faut agir sur le deuxième stockage, ici m_t , par une source d'effort, à travers la jonction 1. L'expression de $a(q_d)$ indique la loi de commande en fonction de la mesure nécessaire, ici q_d l'état de la souplesse de droite. Deux solutions peuvent être envisagées : la première serait active, par une chaîne de mesure, loi de commande, et actionnement. La deuxième serait passive puisque un ressort aurait la même loi de comportement que celle désirée s'il est bien positionné dans le graphe. Nous nous intéressons qu'à la première solution, qualifiée de cyber-physique.

Nous obtenons deux représentations qui peuvent être graphiques : celle du comportement désiré (fig. 3-14) et celle du comportement du système nominal complété des organes d'assistance (fig. 3-15). Ces deux représentations sont complémentaires : la première présente un point de vue plus macroscopique et abstrait du comportement ; la seconde, un point de vue plus détaillé où l'on retrouve les organes physiques et les chaînes d'information. Sont-elles équivalentes ? Elles peuvent être facilement implémentées dans un logiciel. Afin de valider les comportements par simulation, nous choisissons le logiciel de simulation *20-sim*. A travers les simulations, nous cherchons à déterminer si les comportements des deux représentations sont strictement équivalents ?

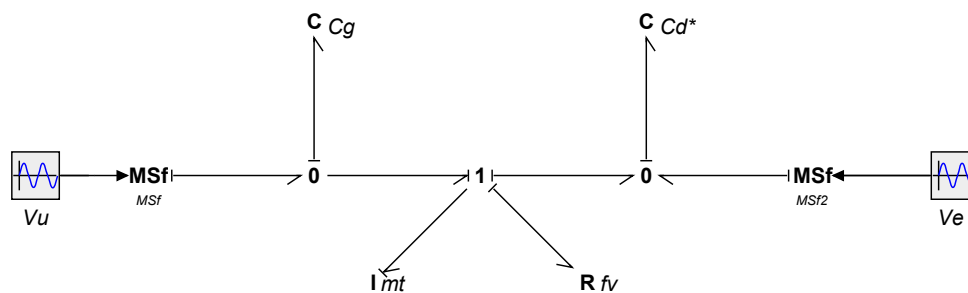


fig. 3-14 – Bond graph du système désiré

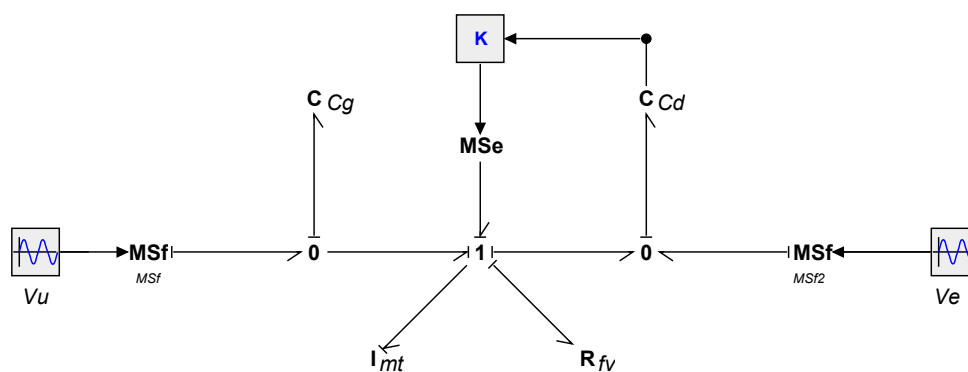
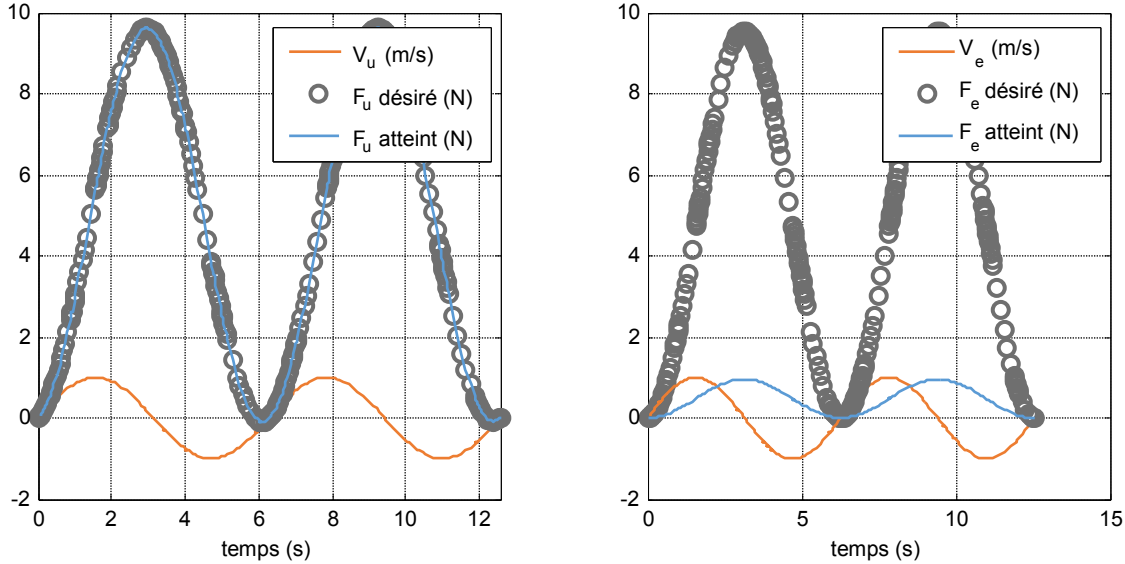


fig. 3-15 – Bond graph du système assisté

Une première série de simulations est menée dans le cas linéaire. Les paramètres utilisés sont arbitrairement choisis, la simulation n'ayant pour objectif que d'illustrer les développements théoriques et non le réalisme de l'illustration. Ils sont indiqués tab. 3-1. Nous cherchons à comparer les comportements des deux représentations. Deux études, pour deux excitations indépendantes, sont envisagées : d'une part, une excitation de type sinusoïdale $V_u(t)$ côté utilisateur (fig. 3-16-a) ; d'autre part, une excitation identique $V_e(t)$ côté environnement (fig. 3-16-b).

| Grandeurs | Fréquence d'excitation | Amplitude d'excitation | C_g | m_t | C_d | f_v | C_d^* | $1/C_d'$ |
|-----------|------------------------|------------------------|----------|---------|-------|-----------|---------|----------|
| Valeurs | 1 Hz | 1 m/s | 0,01 m/N | 0,01 kg | 2 m/N | 1 N/(m/s) | 0,2 m/N | 4,5 N/m |

tab. 3-1 – Paramètres utilisés pour la simulation du contrôle d'impédance



a – action de l'utilisateur seule ($V_e = 0$)

b – action de l'environnement seule ($V_u = 0$)

fig. 3-16 – Simulation du contrôle d'impédance

On constate que le contrôle d'impédance est correct (fig. 3-16-a) lorsque l'on considère le comportement entre intention V_u et ressenti F_u côté utilisateur, à puissance côté environnement nulle : les ressentis spécifié et atteint correspondent parfaitement. Par contre, le contrôle d'impédance côté environnement n'est pas acceptable : les efforts F_e spécifié et atteint présentent un écart important. Cela est dû à la propriété 3-3 qui n'est pas respectée. En effet, nous avons voulu façonner l'énergie associée à C_d en interaction directe avec l'environnement. Le réalisme ne peut être assuré côté environnement mais il est validé côté utilisateur.

Afin d'affiner et de justifier ces résultats de simulation, et puisque nous travaillons encore dans le cas linéaire, nous développons une approche formelle : la vérification du réalisme peut être menée en comparant les matrices de transfert, obtenues par l'équation (3-24), entre le comportement désiré (3-41) et le comportement atteint (3-42) :

$$\begin{Bmatrix} F_{ud} \\ F_{ed} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 + C_d^* f_v s + C_d^* m_t s^2}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} & -\frac{1}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} \\ \frac{1}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} & \frac{1 + C_g m_t s^2 + C_g f_v s}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_u \\ V_e \end{Bmatrix} \quad (3-41)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{ua} \\ F_{ea} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 + C_d^* f_v s + C_d^* m_t s^2}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} & -\frac{1}{s(C_d^* + C_g + C_d^* C_g f_v s + C_d^* C_g m_t s^2)} \\ \frac{C_d^*}{C_d s (C_g + C_d^* (1 + f_v C_g s + m_t C_g s^2))} & \frac{C_d^* (1 + f_v C_g s + m_t C_g s^2)}{C_d s (C_g + C_d^* (1 + f_v C_g s + m_t C_g s^2))} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_u \\ V_e \end{Bmatrix} \quad (3-42)$$

Nous remarquons d'une part que les termes anti-diagonaux sont non nuls, ce qui n'est pas surprenant puisque il existe une chaîne physique liant les phénomènes côté utilisateur et ceux côté matière d'œuvre. Afin d'annuler ces termes, on peut prévoir de modifier la matrice de transfert J_d tel qu'un découplage apparaisse dans le comportement désiré. Notons que ce découplage apparaît dans le comportement spécifié idéal (fig. 3-12). Nous avons fait le choix, dans la spécification pratique, de conserver les liens physiques. Pour supprimer virtuellement ces couplages, des éléments d'assistance complémentaires seraient à insérer (expression plus complexe de $[h]$ et de $\{a(x)\}$).

D'autre part, les deux matrices ne sont pas égales, les termes de la deuxième ligne sont différents. En effet, nous n'avons pas respecté la propriété 3-3. Globalement, les comportements ne sont pas égaux. Il n'y a pas réalisme global. Toutefois, les termes de la première ligne sont identiques. Le réalisme local est atteint. Ceci se justifie par le fait que la propriété 3-3 est vérifiée vis-à-vis du port utilisateur (termes de la première ligne) mais pas vis-à-vis du port environnement (termes de la seconde ligne).

Un intérêt important de l'approche hamiltonienne est sa capacité à modéliser des comportements non linéaires. En effet, nous pouvons spécifier une expression non linéaire de $F_e = \varphi_d^*(q_d)$. L'analyse précédente reste-t-elle valable dans le cas non linéaire ? Considérons maintenant une spécification de $\varphi_d^*(q_d)$ linéaire par parties, avec une longueur à vide définie par un paramètre q_d^* qui peut être variant (expression (3-43) et graphe associé fig. 3-18). Afin d'associer un hamiltonien qui soit C^2 à cette expression, il est nécessaire de lisser sa pente par une spline, elle-même définie par partie, de continuité C^1 . Toute autre expression peut être envisagée dans la mesure où les conditions de la propriété 3-1 sont satisfaites.

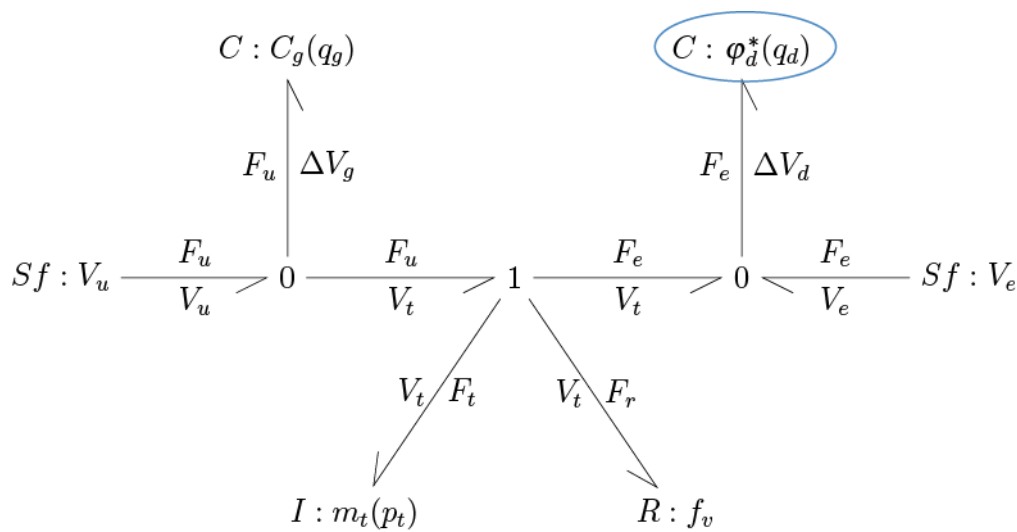


fig. 3-17 – Bond graph du système assisté non linéaire

$$F_e = \begin{cases} \frac{1}{C_d^{**}}(q - q_d^* + q_l) - \frac{1}{C_d^*}(q_l - q_d^*) & \text{si } (q - q_d^*) \leq q_l \\ \frac{1}{C_d^*}(q - q_d^*) & \text{si } |q - q_d^*| < q_l \\ \frac{1}{C_d^{**}}(q - q_d^* - q_l) + \frac{1}{C_d^*}(q_l - q_d^*) & \text{si } (q - q_d^*) \geq q_l \end{cases} \quad (3-43)$$

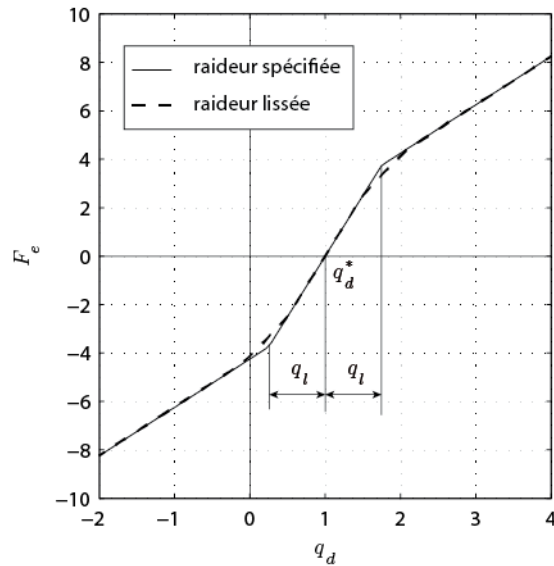


fig. 3-18 – Comportement non linéaire spécifié pour C_d^*

De la même manière que précédemment, $\{a(x)\}$ est déterminé et le comportement peut être simulé. Afin d'analyser le comportement atteint, l'approche par fonction de transfert n'est plus possible puisque le comportement spécifié n'est plus linéaire. Nous utilisons les critères de déviation de comportement local et global (définitions 3-2 et 3-3). Une simulation est menée avec, comme excitation, un signal V_u sinusoïdal tel que présenté sur la figure fig. 3-16-a. Les grandeurs simulées (entrantes, sortantes et le vecteur d'états) sont traitées selon les critères de déviation appliqués à l'équation du comportement à atteindre (3-8). Le critère de déviation globale (fig. 3-19) montre clairement une déviation du comportement (le critère de déviation étant hétérogène en dimension, il est noté sans unité). Si l'on considère (fig. 3-20) uniquement le comportement liant V_u et F_u , la déviation est de l'ordre de grandeur de l'erreur de calcul numérique : le comportement est bien vérifié. Comme dans le cas linéaire, ce qui trouble le critère de déviation globale est la déviation de comportement côté environnement, car la condition de la propriété 3-3 n'est toujours pas satisfaite. Néanmoins, partiellement, le comportement entre V_u et F_u est satisfaisant.

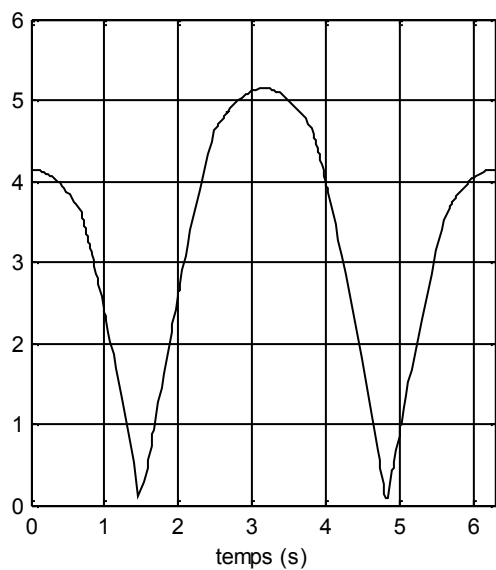


fig. 3-19 – Déviation globale en contrôle d'impédance non linéaire

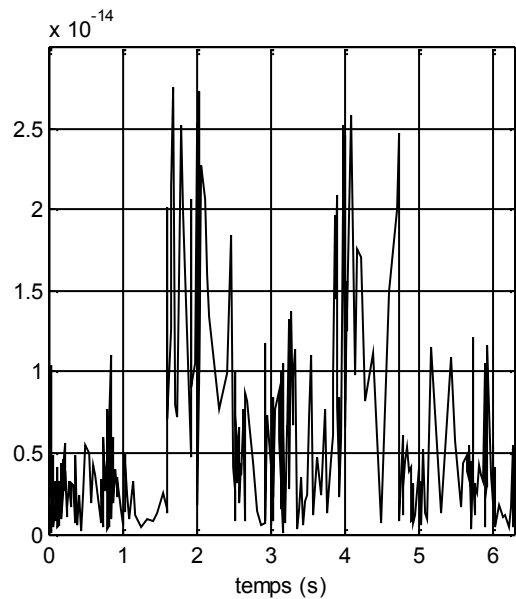


fig. 3-20 – Déviation partielle du comportement isolé ($\{V_u, F_u\}$) en contrôle d'impédance non linéaire

Pour conclure sur cette première application, notons que le comportement désiré vu par l'utilisateur est atteint. La méthode proposée est efficace. Il reste une différence entre le comportement spécifié idéal et celui utilisé en pratique, appelé désiré. En effet, la propriété 3-3 recommande de ne pas façonner les stockages d'énergie en interaction directe avec le port utilisateur. Il faut donc avoir une structure contenant au moins un élément de stockage entre le port de l'utilisateur et le stockage à façonner. La conséquence est la présence d'un mode propre entre le port et le stockage façonner. La fréquence propre associée doit être suffisamment grande pour être en dehors de la bande de fréquence de l'excitation de l'utilisateur. Alors, la différence entre le comportement idéal et le comportement pratique est négligeable.

Cependant, le comportement global désiré n'est pas atteint, même en statique. Ceci est dû au non-respect de cette même propriété. Autrement dit, les représentations des fig. 3-14 et fig. 3-15 ne sont pas strictement équivalentes. Si nous retirons le port côté environnement, la propriété est maintenant pleinement respectée. Les deux représentations de la fig. 3-21 sont cette fois strictement équivalentes.

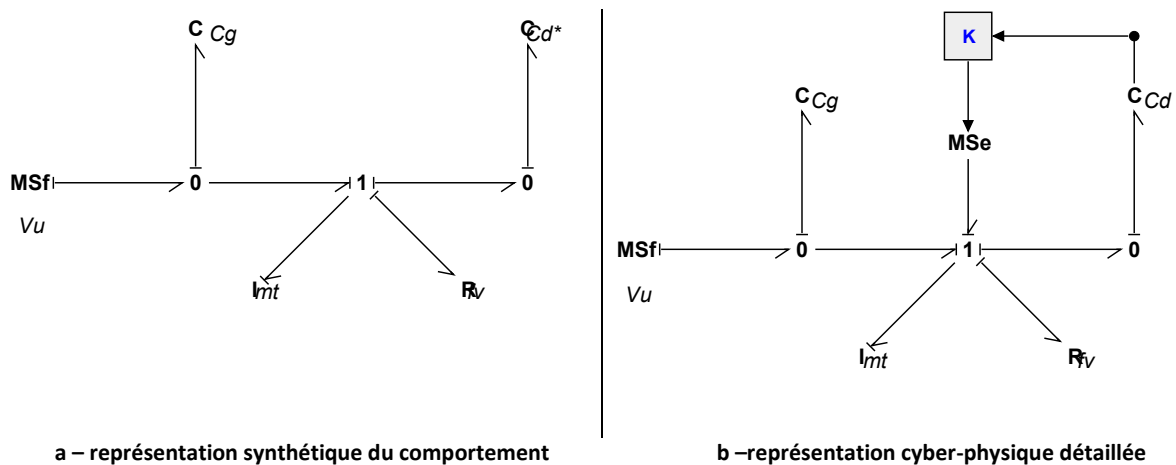


fig. 3-21 – Deux niveaux de représentation équivalents

3.5.3 Cas du *power scaling*

La deuxième spécification du comportement proposée est celle d'un *power scaling*. La première application ayant été fortement développée, nous nous limiterons sur celle-ci à développer les principales articulations de la méthodologie.

Nous devons d'abord définir le comportement spécifié pratique, aussi nommé comportement désiré. Une simple étude causale permet d'analyser que le comportement spécifié (3-3) n'est pas accessible. De plus, nous rappelons qu'il n'est pas possible de faire disparaître les stockages dans le comportement désiré. Cela reviendrait à les façonner à zéro, ce qui amènerait le système à la limite de stabilité. Nous les conservons donc tels qu'ils sont, ce qui présente aussi l'intérêt de minimiser le nombre d'organes d'actionnement et de mesure. Reste à placer l'élément multiplicateur de puissance **PTF**. Pour éviter le contrôle au port, il faut le positionner entre une jonction 0 et la jonction 1. Nous faisons le choix arbitraire de le positionner comme présenté fig. 3-22. Si le choix s'était porté sur l'autre possibilité de positionnement, la dynamique globale atteinte aurait été différente, mais le développement méthodologique resterait le même. Remarquons que toutes les propriétés nécessaires à la transparence sont respectées.

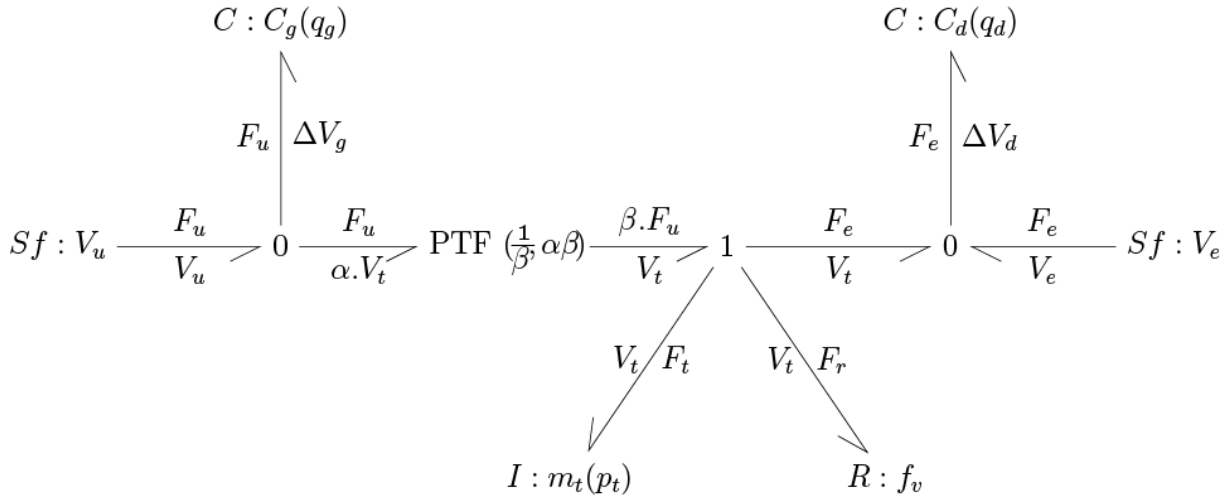


fig. 3-22 – Représentation bond-graph du *power scaling*

Comme précédemment, la méthode nécessite l'expression en formalisme hamiltonien du comportement désiré. Ici, seule la matrice de structure $[J_d]$ est modifiée (3-44). L'équation de correspondance (3-45) permet la détermination des actions d'assistance nécessaires. Elle est ensuite décomposée équation (3-46) en deux actions en deux lieux (l'action sur la souplesse C_g et l'action sur la masse m_t), et les lois de commande associées sont précisées. Les propriétés nécessaires à assurer la transparence étant vérifiées, les résultats de simulation (fig. 3-23) montrent l'égalité des comportements. On y retrouve aussi un rapport de multiplication de 10 entre les deux réactions (efforts aux ports opposés) pour les deux cas de simulation. Ce rapport correspond au rapport de multiplication de puissance $\frac{\beta}{\alpha}$ défini dans les paramètres de simulation. La performance est atteinte.

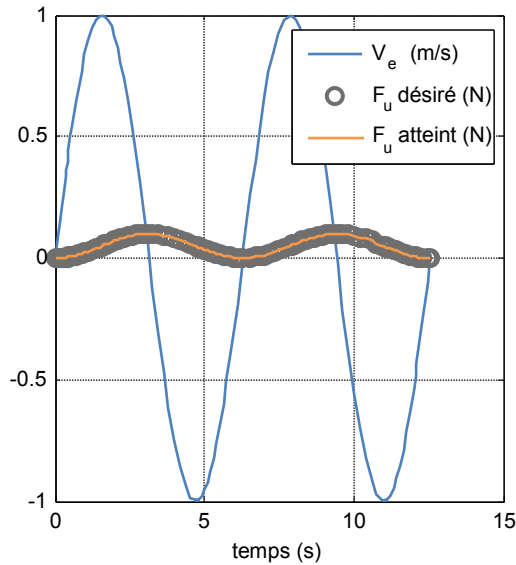
$$[J_d] + [PS] = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha & 0 \\ \beta & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[J_d] = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha + 1 & 0 \\ \beta - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

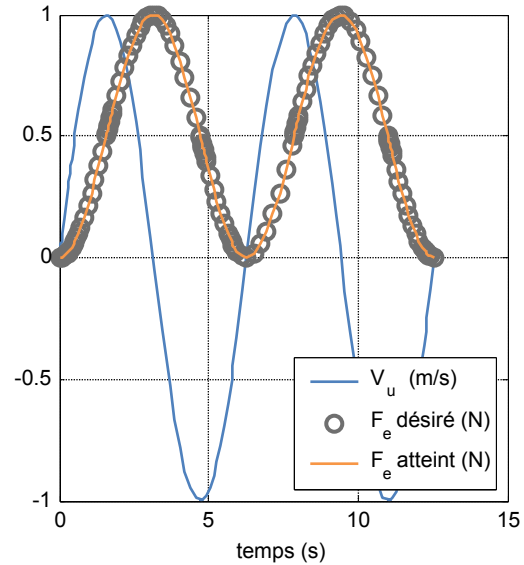
$$H_a(x) = 0$$

$$[h] \cdot \{a\} = ([J_d] - [J]) \cdot \nabla H(x) = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha + 1 & 0 \\ \beta - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{q_g}{C_g} \\ \frac{p_t}{m_t} \\ \frac{q_d}{C_d} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1 - \alpha) \frac{p_t}{m_t} \\ (\beta - 1) \frac{q_g}{C_g} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3-45)$$

$$[h] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \{a(x)\} = \begin{Bmatrix} (1 - \alpha) \frac{p_t}{m_t} \\ (\beta - 1) \frac{q_g}{C_g} \end{Bmatrix} \quad (3-46)$$



a – action de l'utilisateur seule ($V_e = 0$)



b – action de l'environnement seule ($V_u = 0$)

fig. 3-23 – Simulation du *power scaling*

Nous avons donc défini une structure d'assistance permettant d'atteindre un comportement de type multiplicateur de puissance, appliquée, au départ, à un modèle très simpliste de chaîne de commande de vol (fig. 3-1). Cette structure d'assistance peut-elle se retrouver dans des applications réelles (fig. 2-2) ? Les outils de représentation proposés permettent-ils l'analyse de système assistés ? L'annexe V détaille l'analyse qui peut être faite d'un outil d'assistance à la coupe : à partir de la modélisation de la partie physique du système, du lieu d'actionnement et du cheminement de l'information traitée, il est possible de mettre facilement en évidence que le comportement global du système se ramène à un multiplicateur de puissance ou *power scaling*.

3.6 Conclusion

La perspective choisie pour définir les organes et lois d'assistance est celle d'un façonnement du comportement. *A contrario* d'une approche où l'on souhaiterait maîtriser les sorties, nous avons pris le parti de maîtriser le comportement du système assisté afin de maîtriser les interactions entre l'utilisateur et le système d'une part, et entre le système et la matière d'œuvre d'autre part. Afin d'être en mesure de nous adapter à des systèmes ou à des spécifications non linéaires, nous avons choisi le paradigme hamiltonien s'appuyant sur le concept d'énergie. Ce concept universel présente aussi l'intérêt de décrire de manière explicite un comportement complexe (via une représentation graphique si nécessaire). Les méthodes de façonnement du comportement dans ce formalisme sont nombreuses, mais essentiellement développées pour façonner un comportement autonome. Un système d'assistance à opérateur n'est pas un système autonome puisqu'il est en double interaction, avec l'opérateur et avec la matière d'œuvre.

Le contexte de l'assistance à opérateur étant différent de celui d'un système autonome, il a été nécessaire de se poser la question si le comportement effectivement atteint par application méthodologique du façonnement d'énergie correspond au comportement spécifié. Un critère mathématique de transparence ou de déviation de comportement a été introduit. Il en résulte un certain nombre de contraintes à respecter afin d'assurer transparence et stabilité du système d'assistance à opérateur (voir § 3.3.2).

Ce constat étant fait, il apparaît que le nombre de contraintes ne permet pas d'atteindre n'importe quel comportement spécifié à partir d'un système physique donné. Il est donc nécessaire de dégager un compromis entre un comportement spécifié idéal et un comportement spécifié en pratique qui tienne compte des contraintes. Dans ce dernier cas, dans la mesure où le modèle est réaliste, le comportement atteint est identique au comportement spécifié.

A travers cette définition formelle de l'assistance, nous sommes aussi en mesure de proposer une représentation multi-niveau d'un S.A.O. : notre démarche s'appuie sur une représentation graphique du système nominal à laquelle nous associons une structure (graphique) de contrôle-commande. A cette représentation physico-informationnelle (ou *cyber-physical*) peut être associée une représentation plus synthétique, celle du comportement spécifié.

La méthode a été déployée et vérifiée formellement et numériquement sur un exemple générique, dans deux cas de spécification : le contrôle d'impédance et le multiplicateur de puissance (ou *power scaling*). Cette méthode est mise en œuvre pour l'analyse de structures existantes, comme celle d'une chaîne simplifiée de commande de vol ou d'un outil électroportatif d'aide à la coupe. Dans le prochain chapitre, nous appliquerons la méthodologie à une représentation plus complexe de cette chaîne de commande, démontrant sa pertinence pour la conception de commandes pour des systèmes de plus grande dimension.

4 Synthèse d'assistance à la commande de vol d'un hélicoptère de fort tonnage

4.1 Introduction

Les développements méthodologiques présentés précédemment ont permis, sur des cas d'école, de mettre en place une structure de mesure et d'actionnement ainsi que les lois de commande associées, afin d'atteindre un comportement d'assistance désiré. Une représentation graphique peut y être associée. Par exemple, le bond-graph permet de représenter la structure physique. Une représentation de type schéma bloc la complète judicieusement pour représenter les cheminements d'information.

Etant données les puissances en jeu, les chaînes de commande de vol d'un hélicoptère de fort tonnage (fig. 4-1) nécessitent une assistance à l'action musculaire de pilotage. Les organes d'assistance au pilotage sont déjà mis en œuvre depuis de nombreuses années (voir fig. 1-21). Ils sont nombreux. La figure fig. 4-2 donne un aperçu des organes d'assistance présents sur la partie basse d'une chaîne de commande de vol. Leur nature pluri-technologique nécessite l'implication de différents métiers. Chaque organe est introduit pour répondre à un besoin, à une fonctionnalité spécifique et locale. Chacun possède une loi de commande propre souvent déterminée empiriquement. Des couplages mal maîtrisés apparaissent alors. La complexité d'une telle représentation détaillée rend difficile l'analyse et la critique globales de l'architecture d'assistance. De même, la synthèse des lois de commande devient délicate. Dans un objectif de simplification, nous proposons l'approche globale de structuration et de synthèse de l'assistance basée sur les modèles.



fig. 4-1 - Hélicoptère de fort tonnage (a) et son manche (b) [7]

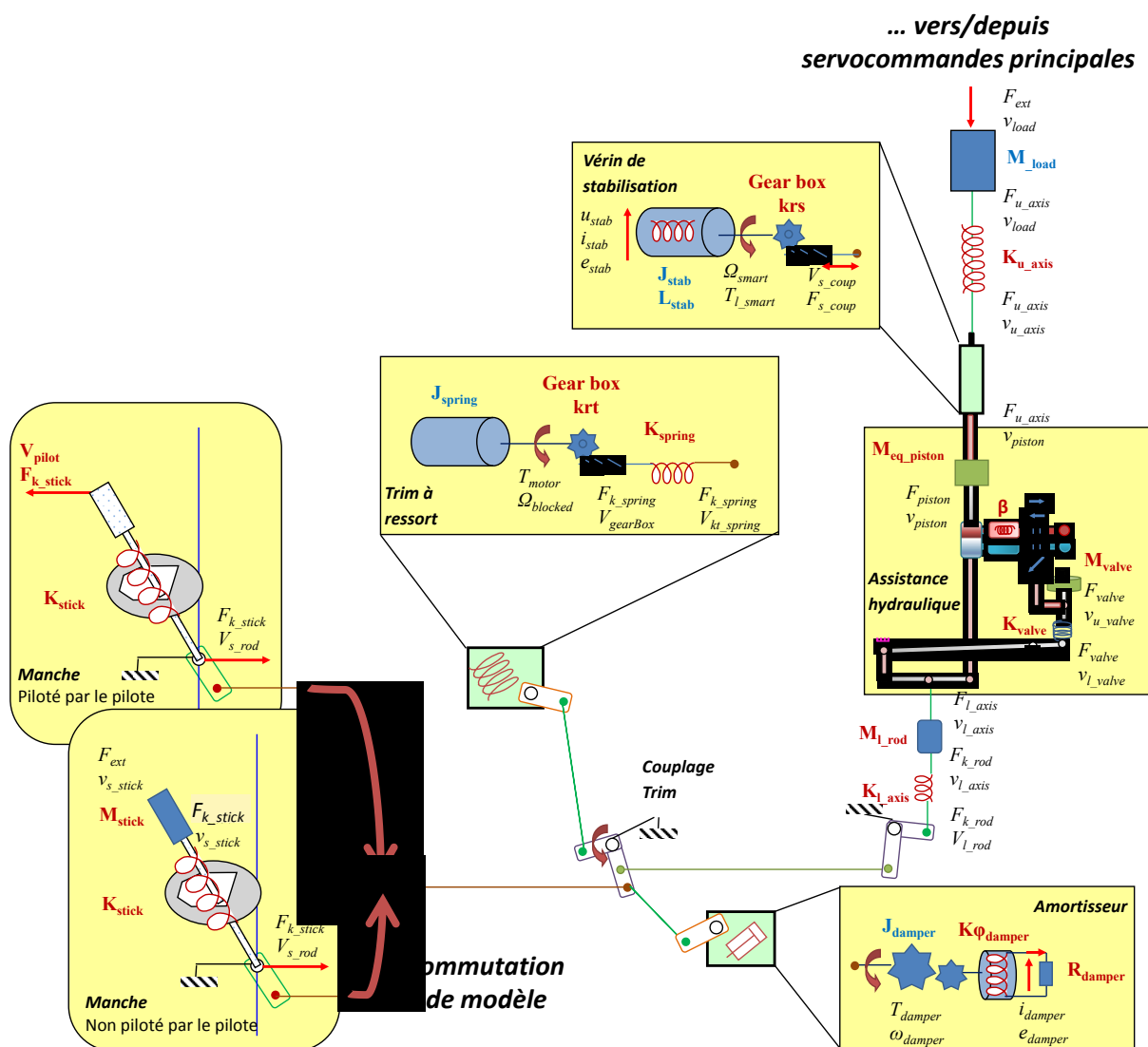


fig. 4-2 – Schéma à paramètres localisés pour une chaîne de CDV d'hélicoptère [33]

L'objectif de cette partie est de vérifier la méthodologie en application sur ce problème réel complexe. La méthodologie proposée permet une nouvelle perspective afin d'appréhender l'organisation organique et la synthèse de commande de l'assistance aux commandes de vol. Nous pourrions nous borner à analyser l'existant. Nous préférons nous placer dans une démarche de reconception d'une commande existante : nous supprimons les organes d'assistance, et par application de la méthodologie originale, nous cherchons à définir l'espace des solutions permettant de satisfaire le cahier des charges. L'approche non segmentée doit permettre une démarche d'ingénierie simplifiée. Les résultats escomptés sont de deux ordres : d'une part, une (des) structure(s) de mesure et actionnement et, d'autre part, les lois de commandes associées. Nous vérifierons que la solution actuellement utilisée fait bien partie de cet espace des solutions.

Afin de valider les solutions proposées, le temps et le coût de développement d'un banc étant un frein pour des résultats à court terme, il est décidé de travailler dans une démarche de virtualisation sur un modèle de simulation numérique d'une chaîne de commande de vol présentant une complexité suffisante pour être assimilé à un système réel. Deux modèles numériques seront utilisés :

- le **modèle de validation** : modèle numérique de type volumique (voir fig. 4-3), de la structure mécanique, complété par les comportements physiques connus, au plus proche du réel à partir des connaissances non confidentielles disponibles. Ce modèle sera considéré comme relevant du réel, et permettra la mise en œuvre de la synthèse de l'assistance. Il se conjugue en trois versions :
 - le support industriel : modèle de la commande de vol avec organes d'aide au pilotage actuellement utilisés ;
 - le modèle nominal : tous les organes d'assistance sont retirés ;
 - le modèle assisté : modèle nominal complété par les organes d'assistance déterminés par la méthodologie proposée.
- le **modèle pour la synthèse** : modèle graphique simplifié de la structure énergétique. Basé sur une représentation bond-graph (à paramètres localisés), il sera retranscrit en formalisme hamiltonien à ports pour mener la synthèse de l'assistance.

Le modèle de validation, proche du réel, présentera un certain nombre de non-linéarités. Afin de simplifier la mise en œuvre de la méthodologie, le modèle pour la synthèse inclura une linéarisation des comportements. En effet, nous concentrons, dans un premier temps, la complexité non pas dans le modèle représentatif du comportement physique, mais dans l'expression fonctionnelle des comportements attendus qui, elle, sera non linéaire.

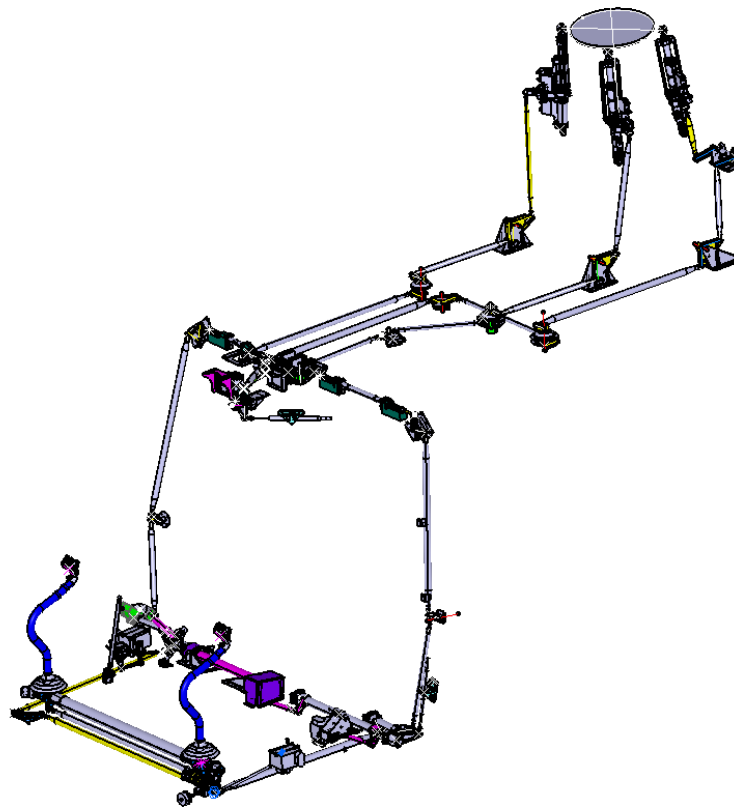


fig. 4-3 – Modèle volumique utilisé pour la validation

4.2 Du support industriel au modèle de validation

Une chaîne de commande de vol est constituée de nombreux organes afin de permettre au pilote de maîtriser la position du plateau cyclique. Le système étudié est constitué des organes présentés fig. 4-4.

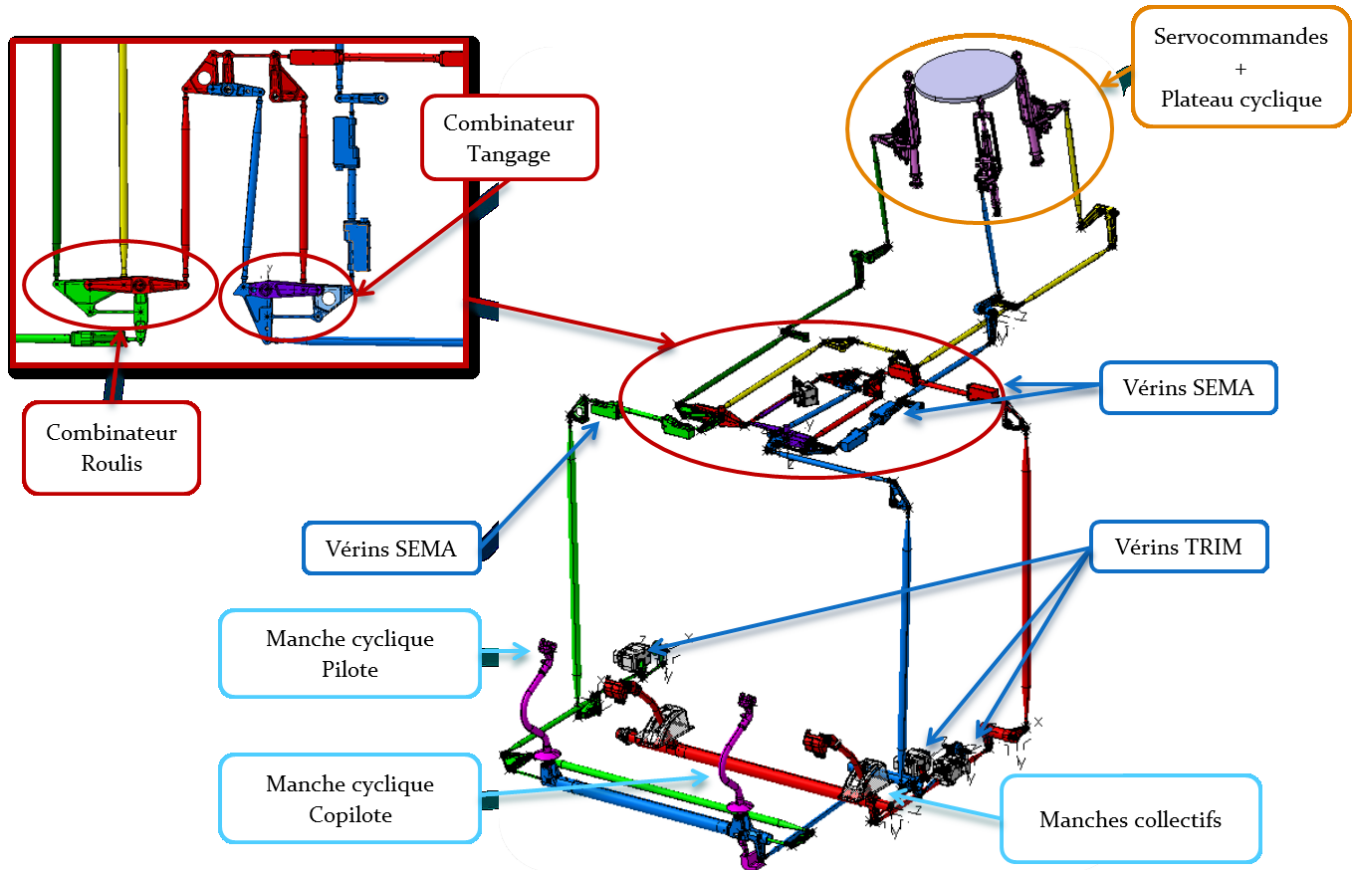


fig. 4-4 – Organes composant une chaîne de commande de vol

La finalité d'une commande de vol est de permettre au pilote de positionner en bonne ergonomie le plateau cyclique, afin d'appliquer le bon angle d'incidence à chacune des cinq pales composant le rotor principal. Notre frontière d'étude se limite au plateau non tournant (voir fig. 1-20). Les mouvements selon les trois degrés de liberté de ce plateau sont définis par trois servo-commandes présentées fig. 4-5. Ces dernières utilisent une source d'énergie auxiliaire hydraulique afin de développer les efforts nécessaires à la mise en mouvement du plateau. Le pilotage des servo-commandes se fait par trois bielles, qui sont reliées par l'intermédiaire des combinateurs et de tringleries aux manchettes du pilote.

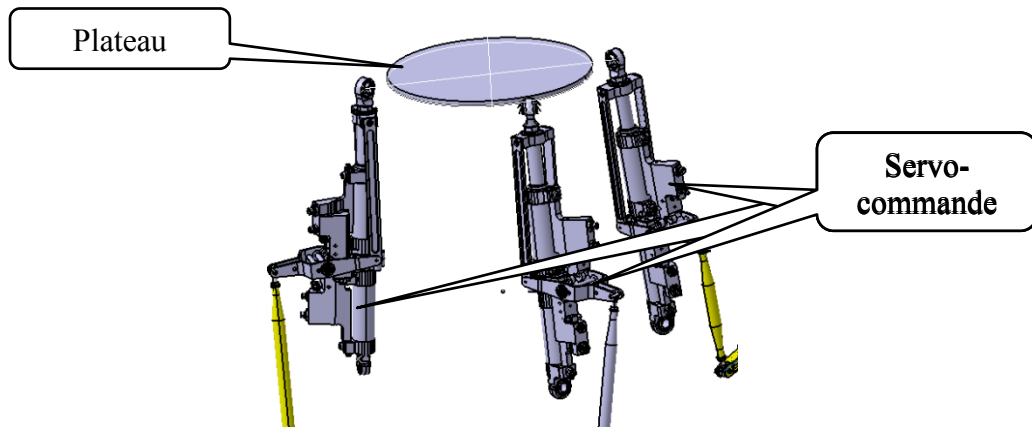


fig. 4-5 – Vue de détail : plateau cyclique et servo-commande

En effet, le combinateur est nécessaire pour combiner les ordres du pilote (ordre en roulis, tangage et collectif) et les transmettre à chaque servo-commande, de façon à ce que le déplacement de chacune entraîne le mouvement souhaité du plateau, en roulis, tangage et collectif. Notons que le positionnement des points d'accroche des servo-commandes a été défini de façon à ce que le mouvement le plus courant ne sollicite qu'une seule servo-commande, les autres restant immobiles. Il s'agit du mouvement de tangage. L'usure est ainsi localisée sur la servo-commande en tangage.

En amont du combinateur, sur chaque tringlerie, un organe permet de ramener les manches en position neutre. Il s'agit du *TRIM* (fig. 4-6). C'est aussi à travers lui qu'est généré l'effort ressenti par le pilote.

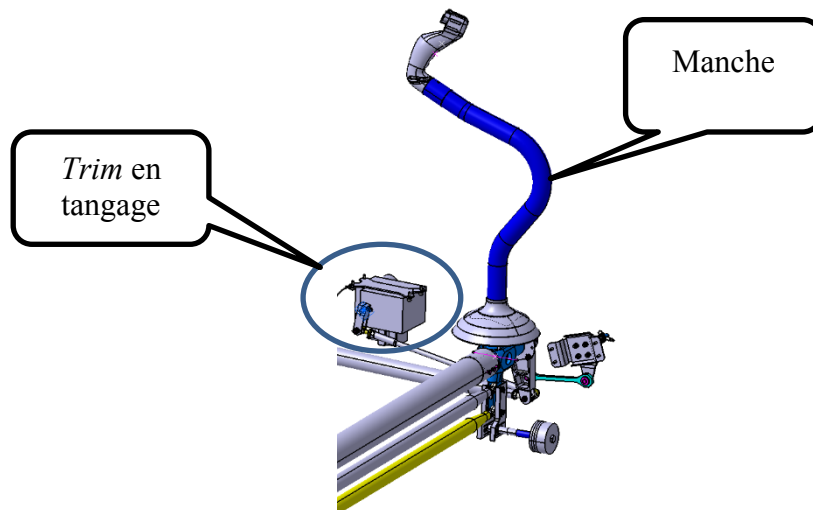


fig. 4-6 – Vue de détail : manche et *TRIM*

Enfin, on retrouve aussi sur les commandes de vol d'autres organes comme les vérins *SEMA*. Leurs fonctionnalités étant de l'ordre du pilotage automatique et du rejet de perturbations, ils ne peuvent pas être considérés comme des organes d'aide à l'action à proprement parler. Ils sont retirés de l'étude et considérés comme rigides.

A partir de ce support industriel, nous devons définir le modèle de validation dénué d'organe d'assistance. Plusieurs modifications doivent être introduites. D'abord, les servo-commandes

ne sont plus actionnées : elles sont remplacées par des bielles de poussée passives, de façon à ce que l'opérateur fournisse l'intégralité de la puissance nécessaire, sans apport de puissance auxiliaire. Pour la suite, nous localiserons l'ensemble des souplesses de la tringlerie au sein de ces bielles de poussée, souplesse notée C_b . Les vérins *SEMA* sont rendus rigides. Enfin, l'organe *TRIM* est considéré comme une simple raideur, dont la souplesse est notée C_t . Les chaînes de commande de vol se ramènent alors à une structure mécanique passive. Cette structure non assistée est présentée fig. 4-8 sous la forme d'un bond-graph à mots. L'intention de l'utilisateur est portée par sa vitesse V_u . Son ressenti apparaît sous la forme d'un effort F_u .

Notre frontière d'étude n'inclut pas le rotor dans son intégralité. Or, c'est principalement le lieu où apparaissent les comportements que doit maîtriser le pilote pour commander son aéronef. Le rotor est équipé de cinq pales. Afin d'assurer portance et commandabilité de l'aéronef, l'angle de pas de chaque pale évolue sur une révolution grâce au plateau cyclique. Chacune des pales à une inertie selon ce degré de liberté. De plus, la liaison entre une pale et le mât du rotor présente une raideur selon le pivotement en pas. Autrement dit, une puissance transmise au plateau cyclique sera répartie dans deux stockages d'énergie pour chaque pale : son énergie cinétique en rotation autour de l'axe de pas et l'énergie potentielle au sein de la raideur de liaison. Nous associons à l'ensemble des stockages un modèle équivalent combinant une inertie équivalente, notée I_{eq} , et une souplesse équivalente, notées C_{eq} , constantes (la démonstration est donnée à titre informatif annexe IV). Enfin, notons que les efforts aérodynamiques ont un effet négligeable sur ce degré de liberté. En effet, la géométrie de la pale est prévue pour que le centre de poussée de l'effort aérodynamique soit très proche de l'axe de pivotement de la pale. Le moment engendré est donc quasiment nul. Il est négligé par la suite.

Afin de simplifier le cas d'étude, nous ne considérons qu'un seul mouvement du manche cyclique. En effet, nous avons vu que le mouvement en tangage est le mouvement prédominant du manche et du plateau cyclique. Dans ce cas de figure, seul un degré de liberté est sollicité au niveau des manches. De même, une seule bielle de poussée sera mise en mouvement (les deux autres ont leur point d'accroche qui reste fixe, comme précisé fig. 4-7). Le combinateur agit alors simplement comme un transmetteur de cet unique mouvement. Dans ce cas de figure, la structure mécanique peut être représentée sous la forme du bond-graph de la fig. 4-9. Afin de faciliter la lecture, les dissipations ne sont pas représentées. Mais elles sont détaillées comme le reste des notations associées, dans les annexes I et II.

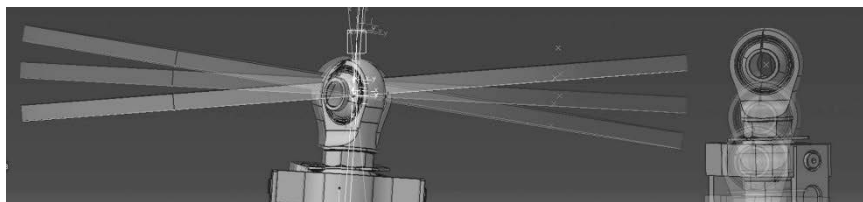


fig. 4-7 – Mise en évidence du tangage du plateau

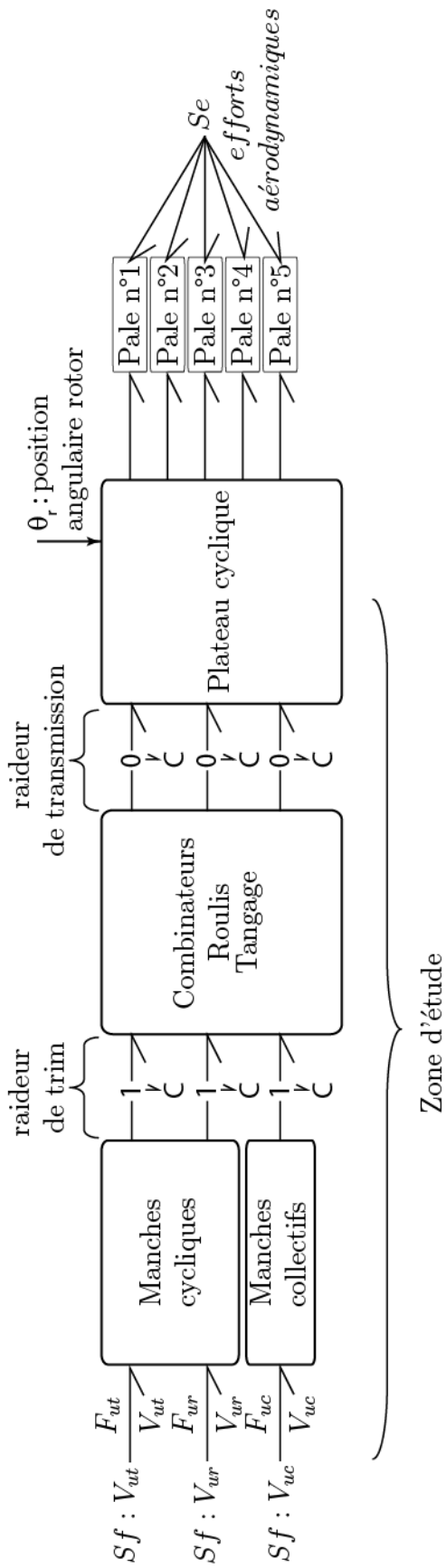


fig. 4-8 – Bond graph simplifié à mots des commandes de vol

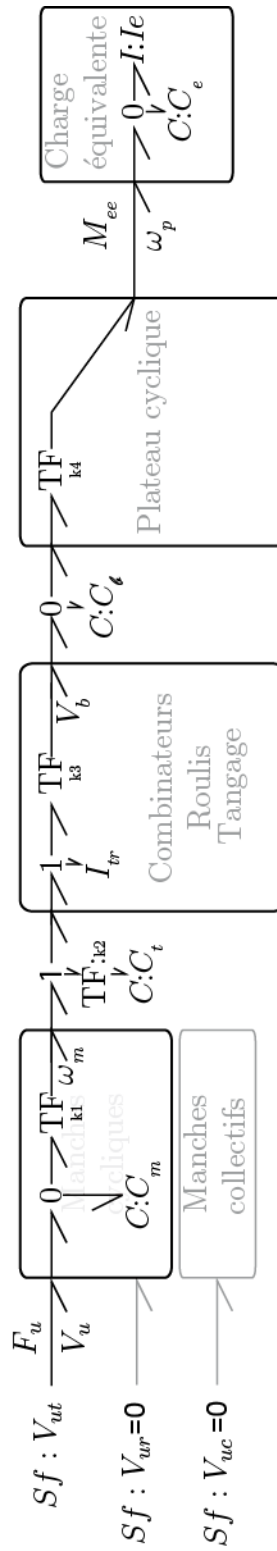


fig. 4-9 – Bond graph détaillé d'une commande de vol en tangage

La structure organique du modèle de validation est maintenant posée. Il est nécessaire de déterminer les caractéristiques des comportements modélisés fig. 4-9. Certaines sont connues, héritées des travaux antérieurs menés dans le cadre de la chaire « Dynamique des systèmes mécaniques complexes ». D'autres doivent être identifiées sur le modèle numérique. Il s'agit essentiellement des rapports cinématiques de la tringlerie. La démarche mise en œuvre est pseudo-expérimentale sur un modèle numérique : à partir des fonctionnalités du logiciel (LMS-Virtual.Lab), nous plaçons une ou des excitations sur la chaîne globale ou partielle et mesurons les réactions. Nous en déduisons les caractéristiques du comportement. Par précaution, les grandeurs héritées ont aussi été comparées avec celles identifiées sur le modèle numérique, et la simulation corrobore les données antérieures.

Comme précisé fig. 4-9, nous modélisons l'ensemble des relations cinématiques par quatre rapports de transmission localisés:

- k_1 : entre le déplacement de la main du pilote et l'angle en tangage du manche ;
- k_2 : entre l'angle en tangage du manche et l'angle de *Trim* (fig. 4-6) ;
- k_3 : entre l'angle en tangage du manche et le déplacement des bielles de poussée ;
- k_4 : entre le déplacement des bielles de poussée et l'inclinaison en tangage du plateau.

Les déplacements étant de grande amplitude, ces rapports ne sont pas constants vis-à-vis de la configuration mécanique. Nous ne développons ici que l'analyse d'identification utilisée pour la détermination du rapport global $k_{ge} = k_3.k_4$, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse de rotation du plateau ω_p et la vitesse de rotation du manche ω_m . Ce rapport n'est pas constant. Il dépend de la position du mécanisme, donc du mouvement d'entrée ω_m . L'évolution de ce rapport en fonction de l'angle d'entrée θ_m est obtenue par différentiation numérique de l'angle du plateau par rapport à l'angle du manche (équation (3-45)). Le gain cinématique représenté fig. 4-10 est clairement non constant et évolue entre 0,58 et 1,71. Pour la suite, il sera assimilé à une constante unitaire. De même, les autres rapports cinématiques identifiés sont supposés constants et donnés Annexe II. Rappelons que ce choix de simplification a pour objectif un modèle pour la synthèse linéaire. Un modèle plus proche de la réalité s'exprimerait sous la forme d'un modèle linéaire à paramètres variants, où ce rapport cinématique serait une expression polynomiale de la variable θ_m .

$$\frac{\omega_p}{\omega_m} = \frac{d\theta_p}{d\theta_m} = f(\theta_m) \quad (4-1)$$

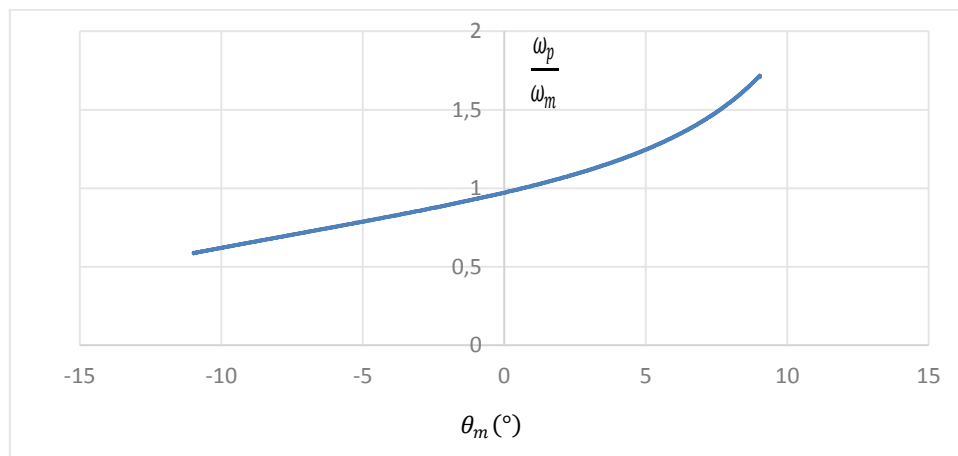


fig. 4-10 – Rapport cinématique global en fonction de la position

4.3 Définition d'un modèle simplifié pour la synthèse

Nous disposons donc d'un modèle numérique volumique. A ce modèle, nous avons pu associer une représentation graphique d'une structure physique à paramètres localisés. Pour pouvoir déployer la méthodologie de définition de l'assistance, nous devons aussi réexprimer ce dernier modèle dans le formalisme hamiltonien à port. Le niveau de complication du modèle de validation rend cette tâche difficile. Nous optons donc pour la définition d'un modèle simplifié représentatif du modèle de validation, que nous nommons modèle pour la synthèse. Il pourra facilement être renseigné dans un logiciel de simulation (20-Sim) et réexprimé en formalisme hamiltonien à port. Par cet outil, nous nous donnons les moyens de prototyper l'assistance et de la vérifier par simulation.

Nous cherchons donc à simplifier le modèle présenté fig. 4-9 en nous ramenant à un paramétrage du mouvement plus simple que celui utilisé dans le modèle pour la validation. Le passage d'un paramétrage à l'autre se fait par mise à l'échelle des stockages et dissipations d'énergie. Dans le modèle pour la synthèse, tous les éléments de transmission mécanique de type TF sont concaténés en un seul (de gain k_{ge}). En amont, la variable cinématique utilisée est la vitesse angulaire du manche ; en aval, la variable est la vitesse angulaire du plateau. Tous les comportements sont ramenés, par une mise à l'échelle énergétique, à l'un ou l'autre de ces mouvements. Ce modèle est présenté fig. 4-11 (dissipations non représentées). Le détail des notations introduites peut être retrouvé annexe III.

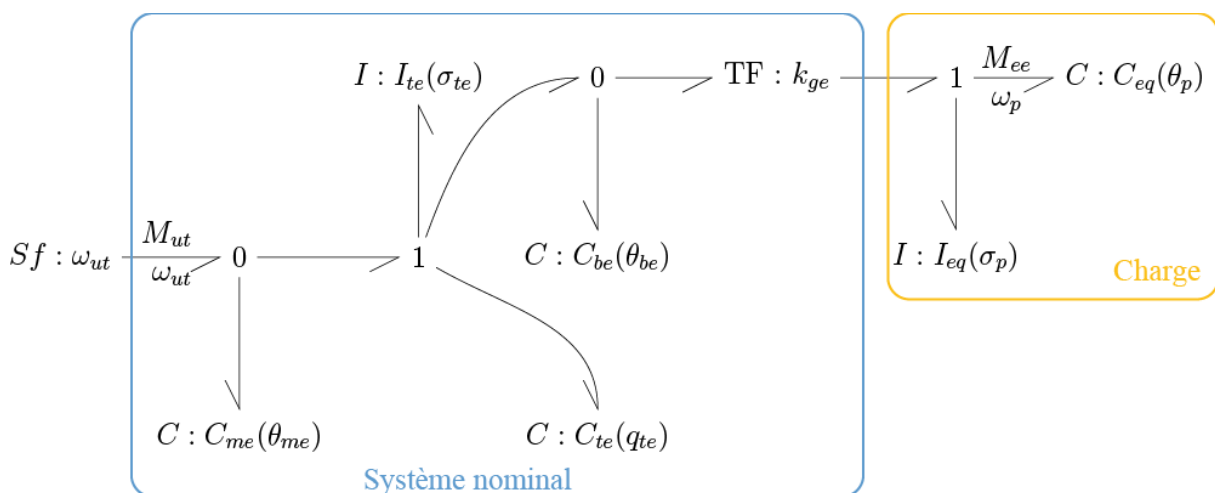


fig. 4-11 – Bond graph détaillé du modèle pour la synthèse

Avant d'aller plus loin dans la définition des lois d'assistance, nous devons nous assurer que le modèle pour la synthèse, dans sa version nominale non assistée, a un comportement proche de celui du modèle de validation, malgré les simplifications introduites. En effet, si les deux modèles ne présentent pas une relative similitude, alors les lois d'assistance déterminées à partir de l'un ne pourront pas être validées sur l'autre. Les deux modèles sont donc excités par le même mouvement de tangage au manche (fig. 4-12), nous comparons le ressenti du pilote (fig. 4-13) et le déplacement du plateau (fig. 4-15).

Remarquons d'abord que l'effort du pilote est très important : un moment au manche de 300 Nm, soit un effort à la main de 480 N. La nécessité d'une assistance paraît évidente. De plus, ce moment présente de fortes oscillations s'atténuant avec le temps. Elles sont dues à une excitation en vitesse de type cosinus. Le contenu fréquentiel à l'instant initial d'une telle entrée excite les modes propres de la structure physique. Un opérateur humain aurait un profil en

vitesse plus doux à l'instant initial. Enfin, la courbe du moment au manche du modèle de validation diffère de celle du modèle pour la synthèse. S'il est positif, le moment du modèle de synthèse est supérieur à celui du modèle pour la validation, et inversement s'il est négatif. Ceci est dû à la linéarisation du rapport cinématique k_{ge} effectuée pour le modèle pour la synthèse (fig. 4-10). Ce rapport n'est pas réellement constant et engendre des non linéarités du comportement qui ne se retrouvent pas dans le modèle pour la synthèse. Nous pouvons nous en assurer en reprenant le comportement du modèle pour la synthèse mais en utilisant cette fois l'une des deux valeurs extrêmes que peut prendre k_{ge} ($k_{ge} \in [0,6; 1,7]$). On remarque alors que nous obtenons un bon encadrement du comportement du modèle de validation. En conclusion, il serait possible d'affiner le modèle pour la synthèse en utilisant une expression non linéaire, fonction de l'angle de manche, du rapport cinématique k_{ge} . Une autre possibilité serait de modéliser ce gain cinématique avec un intervalle d'incertitude à travers la représentation linéaire fractionnaire (ou *linear fractional representation LFR*). Ceci est déjà possible en formalisme bond-graph ([57]) et a été proposé en formalisme hamiltonien à ports ([3]). Mais, nous ne préférons pas augmenter le niveau de complication du modèle. Par contre, il faudra tenir compte de cette imprécision du modèle pour la synthèse vis-à-vis de celui pour la validation pour la suite des analyses. Enfin, notons que les angles d'inclinaison du plateau obtenus pour les deux modèles sont très proches (fig. 4-15). Par contre, ils ne correspondent pas à l'angle du manche. En effet, les souplesses de la chaîne de transmission, soumises à un effort très important nécessaire à la mise en mouvement des pales, se déforment de manière non négligeable. L'écart entre l'angle plateau et l'angle manche correspond aux déformations de ces souplesses.

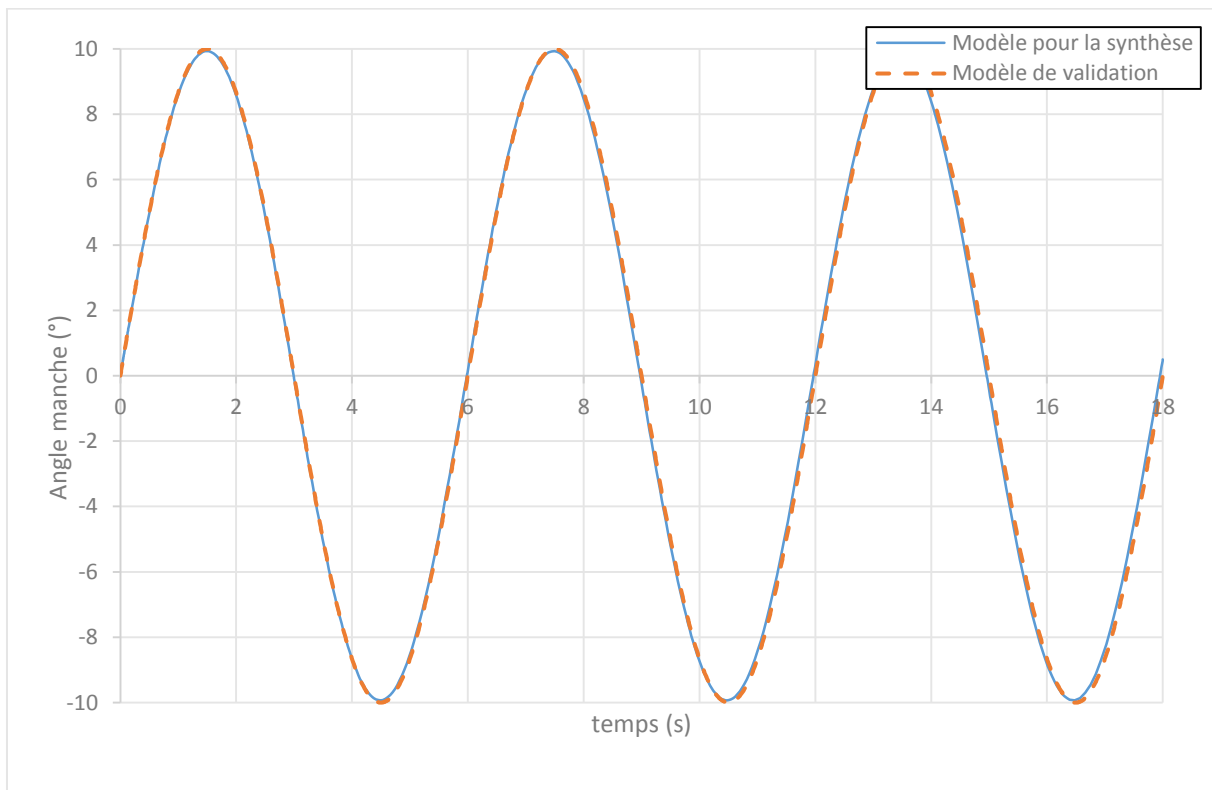


fig. 4-12 – Excitation : mouvement au manche du pilote

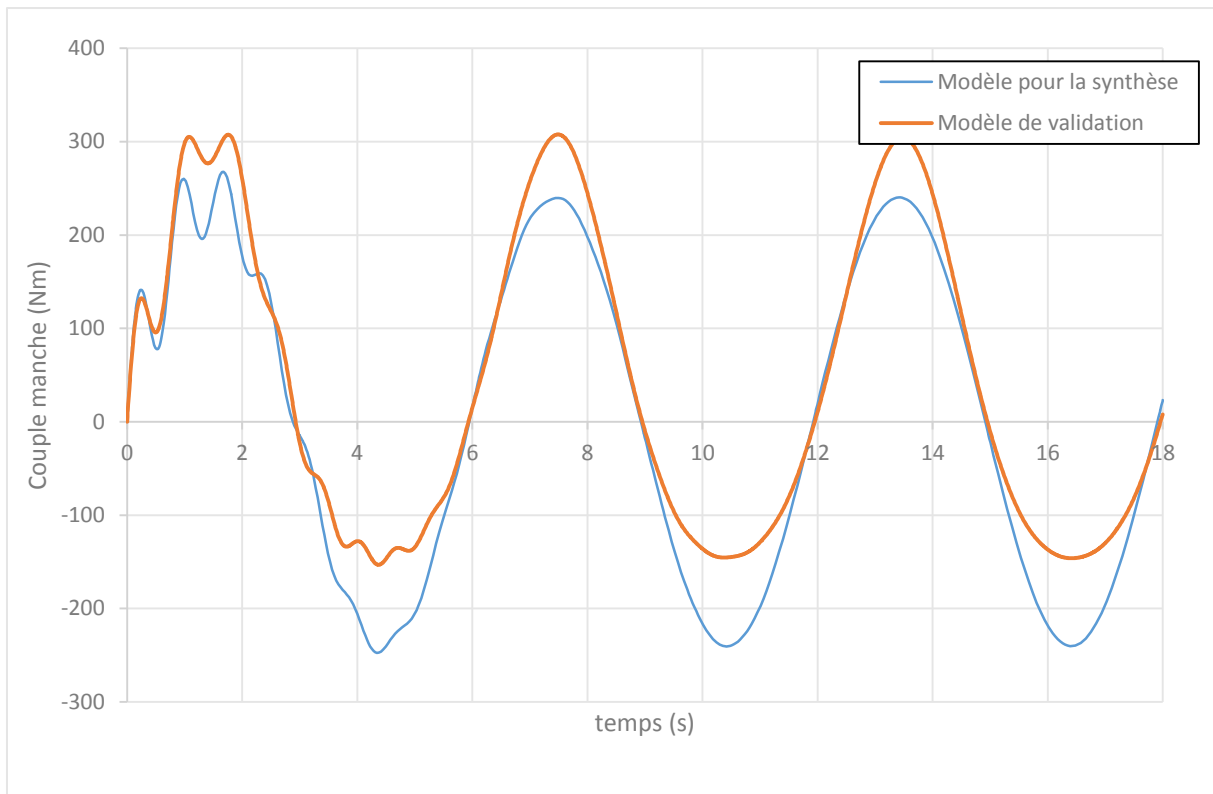


fig. 4-13 – Systèmes non assistés : couple du pilote sur le manche

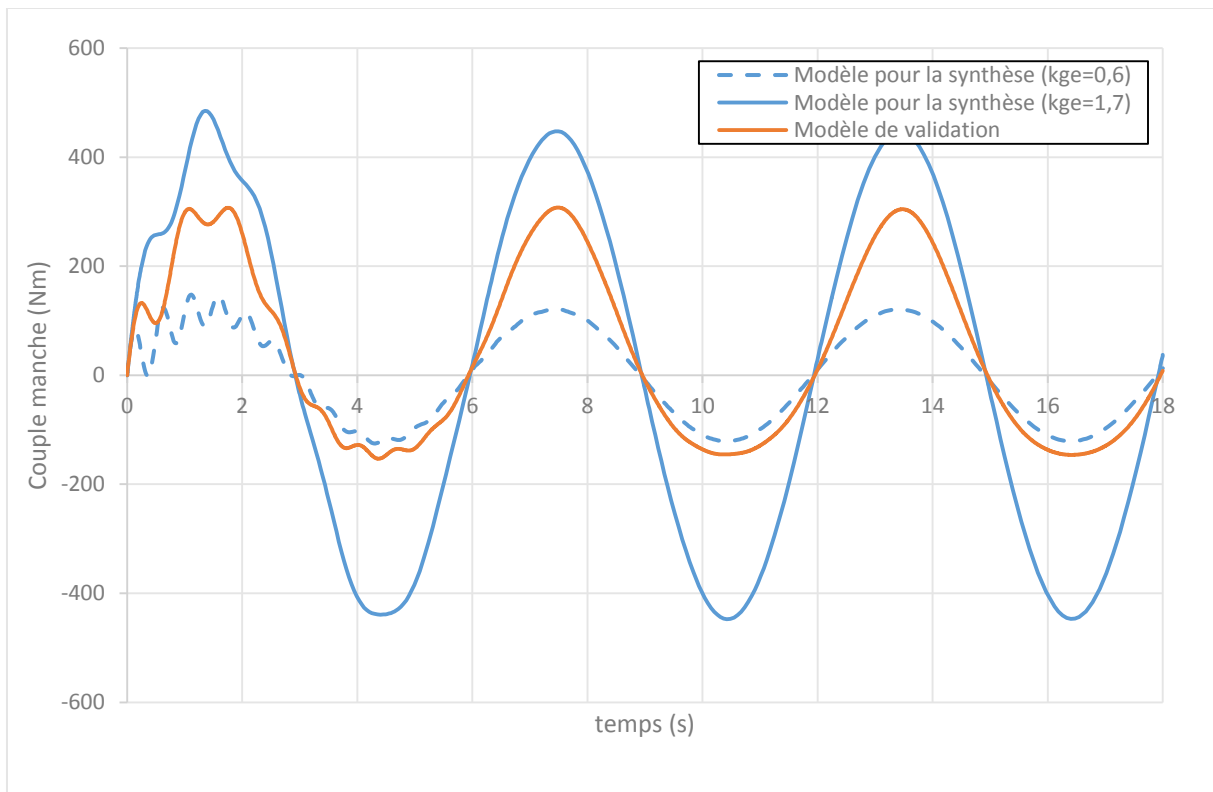


fig. 4-14 – Systèmes non assistés : encadrement du couple du pilote

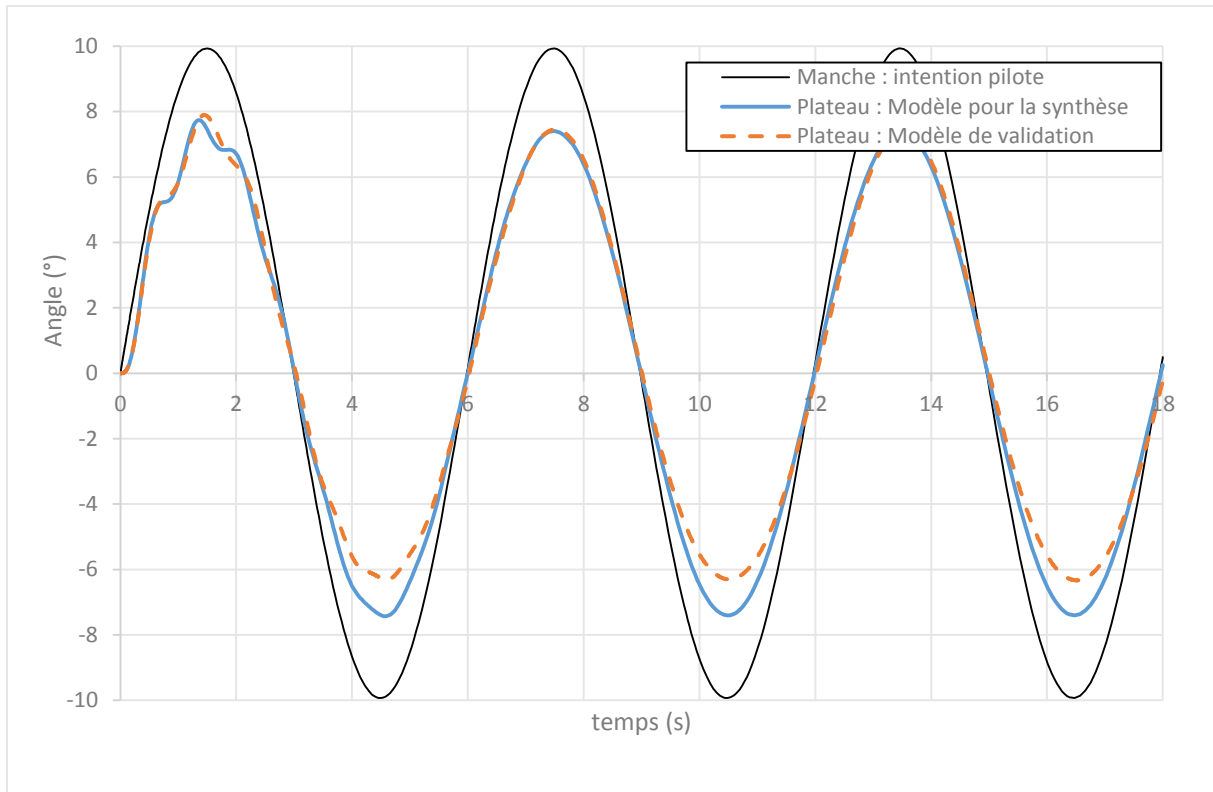


fig. 4-15 – Systèmes non assistés : déplacement angulaire du plateau

4.4 Structure et Synthèse de l'assistance

4.4.1 Fonctionnalités attendues

Afin de définir les éléments d'assistance, nous devons spécifier le comportement attendu pour les commandes de vol. Selon les travaux antérieurs menés dans le cadre de la chaire « Dynamique des systèmes mécaniques complexes » [33], l'exigence est exprimée en deux points : un effort ressenti par le pilote qui est fonction de la position du manche ; une transmission "raisonnable" de l'intention du pilote au plateau (gain proche de l'unité entre l'angle du manche et l'angle du plateau).

Notre approche méthodologique vise à façonner le comportement. Nous devons donc réexprimer les exigences en termes de comportement à atteindre et plus exactement en termes de matrice de comportement telle qu'introduite équation (2-3).

$$\begin{Bmatrix} M_{ut} \\ \omega_p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} CI_u & ME_r \\ ME_i & CI_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_{ut} \\ M_{ee} \end{Bmatrix} \quad (4-2)$$

Nous pouvons donc réexprimer les exigences en quatre termes :

- l'effort M_{ut} ressenti par le pilote en fonction de son déplacement est un contrôle d'impédance dépendant de l'angle du manche $\theta_m = \int \omega_{ut} dt$. La position neutre est variable, définie par un réglage noté θ_{anc} ;
- l'effort ressenti est indépendant de la charge M_{ee} ;
- le mouvement ω_p de la charge (plateau) est proportionnel à celle du pilote ;
- le mouvement ω_p de la charge est indépendant de l'effort de la charge M_{ee} .

Le comportement idéal spécifié est donc une combinaison d'un contrôle d'impédance et d'un *power scaling* (expression (4-3)).

$$\begin{cases} M_{ut} \\ \omega_p \end{cases} = \begin{cases} \int K_d(\theta_m)\omega_{ut}dt + 0.M_{ee} \\ k_d\omega_{ut} + 0.M_{ee} \end{cases} \quad (4-3)$$

$K_d(\theta_m)$ est défini non linéaire, fonction de θ_m et dépendant de l'ancrage (θ_{anc}) selon la loi de la fig. 4-16. Nous considérons que θ_{anc} est nul et constant, mais un cas plus général a été illustré §3.5.2. Le déplacement angulaire est relatif à la position d'ancrage, qui ne variera pas dans nos simulations. On rappelle que, dans le cas de petits mouvements, le déplacement linéaire de la main est proportionnel au déplacement angulaire du manche. Le coefficient de proportionnalité correspond à la longueur du manche. Dans ce cas, la spécification s'exprime autant en terme de déplacement linéaire qu'angulaire, ou autant en terme d'effort du pilote que de moment sur le manche. La fig. 4-16 présente donc la spécification en termes d'effort du pilote en fonction du déplacement de sa main, courbe formée de trois parties linéaires. En effet, selon la tâche à accomplir (suivi ou changement de trajectoire), le pilote doit ressentir une évolution différente de son effort. La discontinuité de pente, imposée par la spécification, ne peut être réalisée avec une simple raideur ou *trim* passif. Il devient donc nécessaire d'introduire un organe d'assistance supplémentaire. Et surtout, le comportement spécifié est donc non linéaire. L'approche proposée au travers de la méthodologie originale prend alors toute sa richesse. Notons toutefois qu'il est nécessaire de lisser la courbe du ressenti spécifié afin qu'elle soit C^1 et que l'hamiltonien associé soit C^2 tel qu'indiqué §3.5.2.

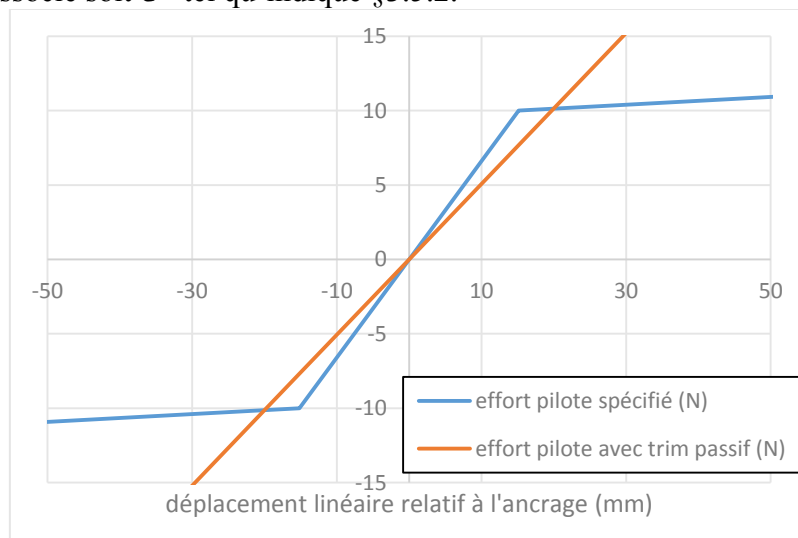


fig. 4-16 – Ressenti en effort spécifié

La deuxième fonctionnalité est liée à la transmission du mouvement du manche au plateau. Idéalement, la rotation du plateau est directement liée à la rotation du manche par un gain k_d (spécification idéale de l'équation (4-3)). Or il existe des souplesses dans la chaîne de transmission. Cette spécification idéale ne sera pas exactement atteinte.

Enfin, *a priori*, un autre comportement semble difficile à atteindre, mis en évidence par les termes nuls de l'équation (4-3). Il s'agit de celui noté ME_r dans l'équation (4-2), relatif à la mise à l'échelle du ressenti. Idéalement, le facteur d'échelle doit être nul, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de ressenti pour l'utilisateur des efforts générés par l'environnement. Cela paraît difficile avec une chaîne de transmission physique de l'intention. Une solution est d'introduire un multiplicateur de puissance (et surtout d'effort) afin que le pilote fournisse un effort moindre

que ce qu'il aurait dû fournir pour atteindre le même déplacement du plateau. Autrement dit, que la proportion de la réaction de l'environnement M_{ee} soit la plus faible possible dans M_{ut} .

4.4.2 Définition du comportement pratique

Comme illustré au chapitre 3, nous optons pour une démarche graphique, en introduisant un bond-graph représentatif de la structure spécifiée pratique de comportements ou à atteindre. Il doit être un compromis entre les représentations de la spécification idéale et les contraintes de la structure nominale. En respectant les différentes propriétés définies au chapitre 3, nous obtenons la structure proposée fig. 4-17. L'assistance se retrouve au travers du façonnement de la souplesse de trim C_{te}^* et de la mise à l'échelle de l'action de l'utilisateur α .

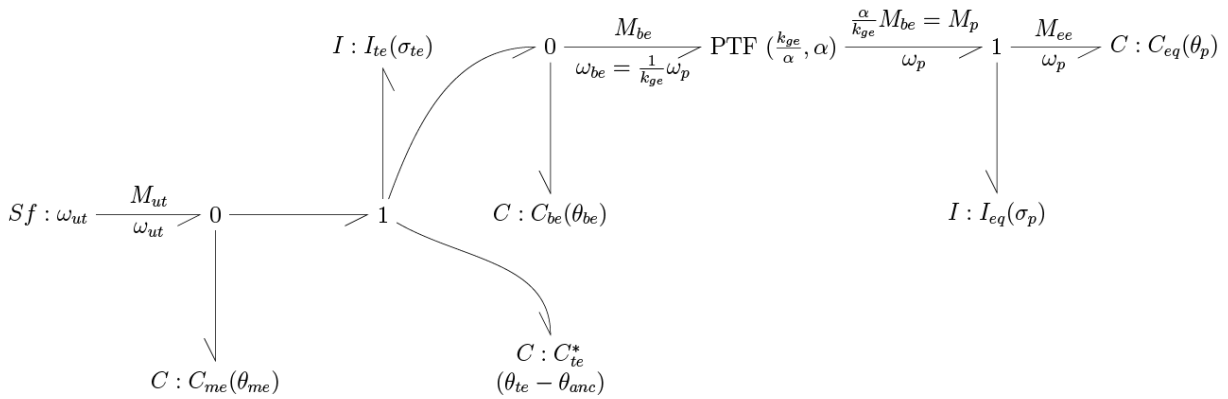


fig. 4-17 – Bond-graph du comportement spécifié pratique

4.4.3 Application de la méthode IDA-PBC

Nous ne détaillons pas les expressions hamiltoniennes (équations (2-2) et (3-8) associées aux modèles nominal (fig. 4-11) et à atteindre (fig. 4-17). Nous précisons, équation (4-4), le vecteur d'état associé avec le bond-graph (voir fig. 4-11). La résolution de l'équation de correspondance est réalisée par le logiciel *Mathematica*, et amène les lois d'assistance (4-5)

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} \theta_{me} \\ \sigma_{te} \\ \theta_{te} \\ \theta_{be} \\ \sigma_p \\ \theta_p \end{Bmatrix} \quad (4-4)$$

$$[h]\{a\} = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{1}{C_{te}} - \frac{1}{C_{te}^*}\right)\theta_{te} \\ 0 \\ 0 \\ \left(-\frac{1}{k_{ge}C_{be}} + \frac{\alpha}{C_{be}}\right)\theta_{be} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

Par l'analyse des lois d'assistance, nous pouvons déduire que deux actions sont nécessaires : l'une sur le deuxième stockage d'énergie, l'inertie de la chaîne de transmission, l'autre sur le cinquième stockage d'énergie, l'inertie du plateau. Les deux types d'actionnement devront être des sources d'efforts, respectivement complémentaires au *trim* passif et à la transmission par bielle afin d'atteindre la multiplication d'effort désirée. Enfin, nous notons aussi les mesures nécessaires aux lois de commande (θ_{te} et θ_{be}). Les lois de commande font apparaître les deux paramètres de spécification du comportement : C_{te}^* et α . Notons enfin que nous pouvons alors disposer de deux représentations : la représentation détaillée du système nominal avec assistance (fig. 4-18) et la représentation du comportement équivalent du système assisté (fig. 4-19).

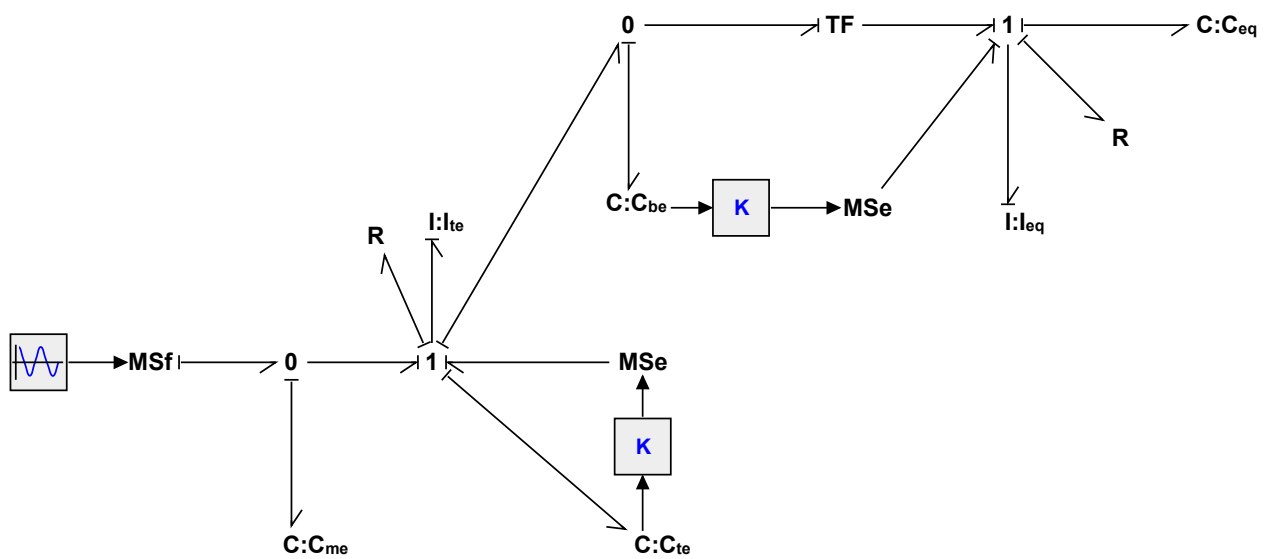


fig. 4-18 – Représentation cyber-physique détaillée

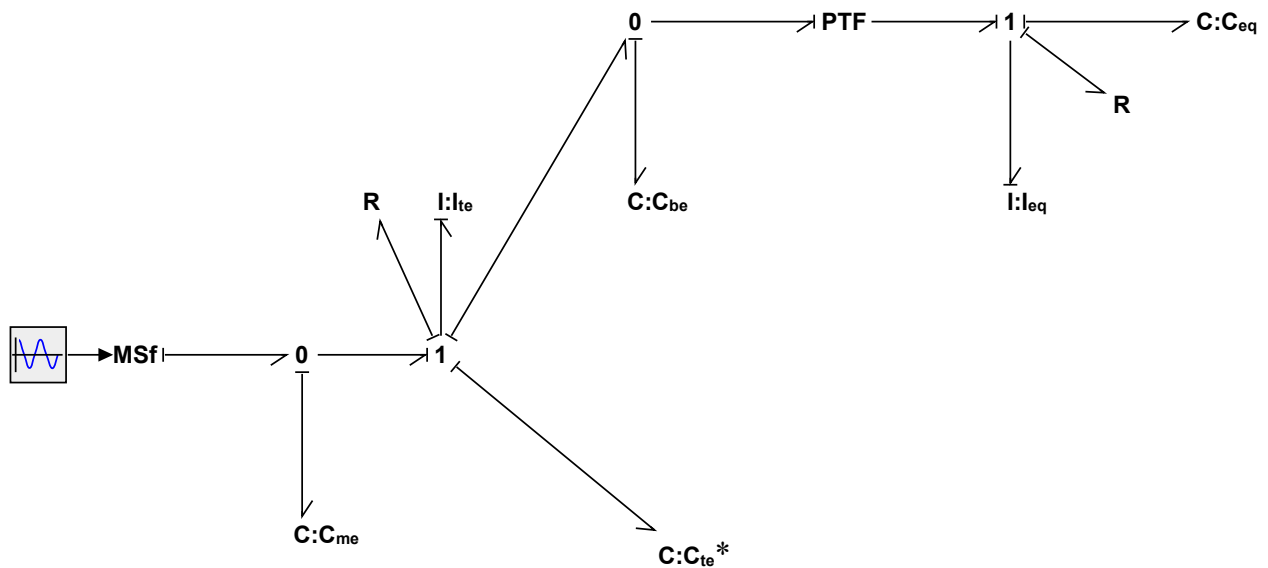


fig. 4-19 – Représentation synthétique du comportement du SAO

Les conditions nécessaires étant respectées, les deux représentations doivent être strictement équivalentes, conformément aux illustrations du chapitre 3. Nous pouvons le confirmer à travers la première simulation de vérification (chronogrammes de la fig. 4-20) : pour le même déplacement du manche, les deux courbes correspondant aux ressentis (effort pilote F_{ut}) pour chacun des modèles sont confondues. Les deux modèles correspondent bien au même comportement. Nous constatons la présence de petites oscillations dans l'effort ressenti lors de la mise en mouvement (instant initial) et aux instants correspondant aux changements de pente de la raideur du *trim*. Ceci traduit une excitation des dynamiques de fréquences élevées.

Allons plus loin en vérifiant la performance : le ressenti atteint correspond-il au ressenti spécifié ? La fig. 4-21 présente l'évolution de l'effort du pilote en fonction du déplacement du manche. Remarquons d'abord la présence d'une forme d'hystérésis. Celle-ci est due aux frottements visqueux qui s'opposent au déplacement et ajoutent leur contribution à l'effort du pilote. L'effort ressenti par le pilote n'est pas simplement lié à sa position, mais aussi au sens et à l'amplitude de sa vitesse. L'excitation étant un sinus, de type aller-retour du manche, l'effort pour une même position angulaire, ne sera pas le même pour un sens de cheminement (vitesse positive) que pour l'autre (vitesse négative).

On peut aussi remarquer sur la même figure que les courbes de ressentis simulées ne correspondent pas à l'effort spécifié. On constate aussi que le ressenti du système assisté ne se centre pas autour du ressenti attendu. Pour analyser l'origine de ce phénomène, nous utilisons l'analyse structurale proposée par la représentation graphique de la fig. 4-17. En effet, l'effort total de l'utilisateur se décompose en deux composantes : l'effort dû au *trim* (effort généré par C_{te}^*) et l'effort nécessaire à la manipulation des pales (effort transisant par C_{be}). Il n'y a pas un découplage physique dans la chaîne de transmission de l'effort. Ce dernier est encore présent. La fig. 4-22 met en évidence le phénomène : on y retrouve l'effort total de l'utilisateur, la partie due au *trim* et la partie transmise par la bielle de poussée au plateau. En ne considérant que la partie d'effort générée par le *trim*, on retrouve bien une courbe centrée autour de la spécification de l'effort ressenti par le pilote. Nous n'avons donc pas atteint le cahier des charges idéal, pour lequel les coefficients de M_{ee} dans l'expression (4-3) doivent être nuls. La portion d'effort due

au plateau pourrait être diminuée en augmentant le gain du multiplicateur de puissance PTF. Enfin, nous vérifions bien (fig. 4-23) la qualité de la transmission du mouvement. Le mouvement du manche et celui du plateau sont quasi confondus.

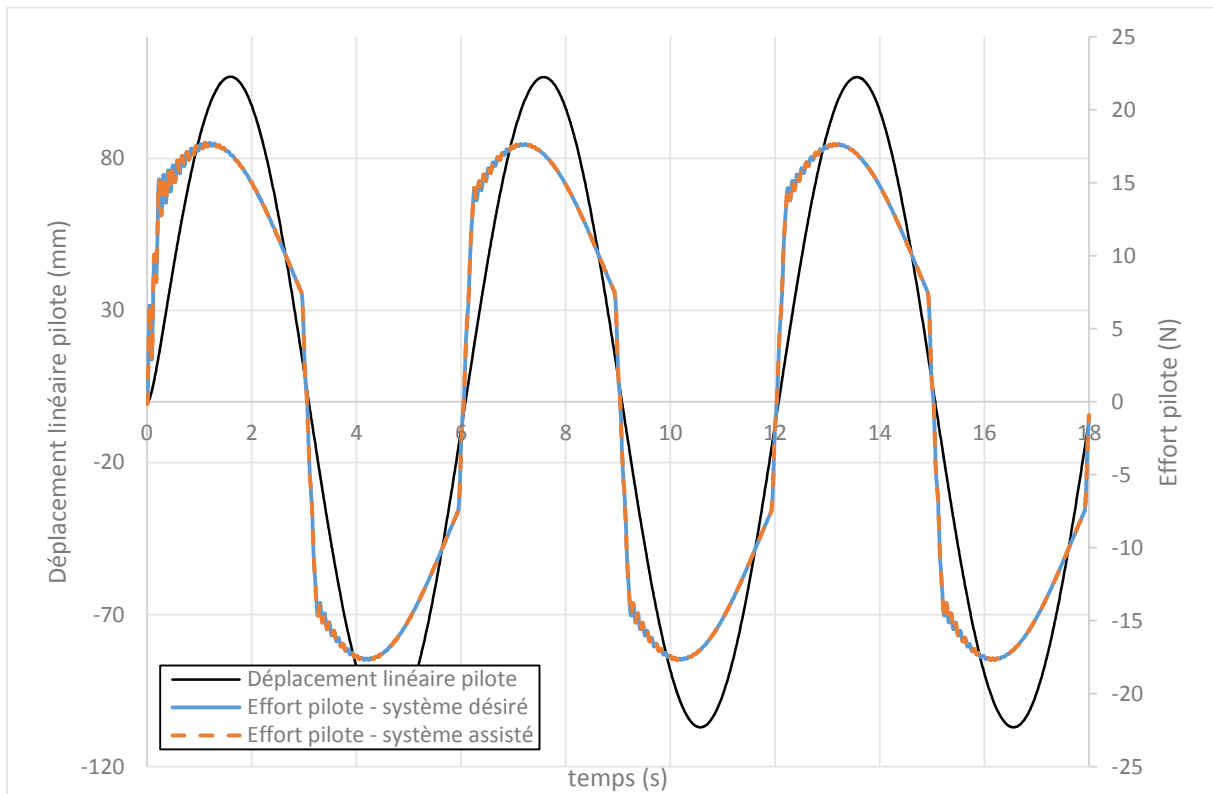


fig. 4-20 – Chronogrammes du déplacement et du ressenti du pilote

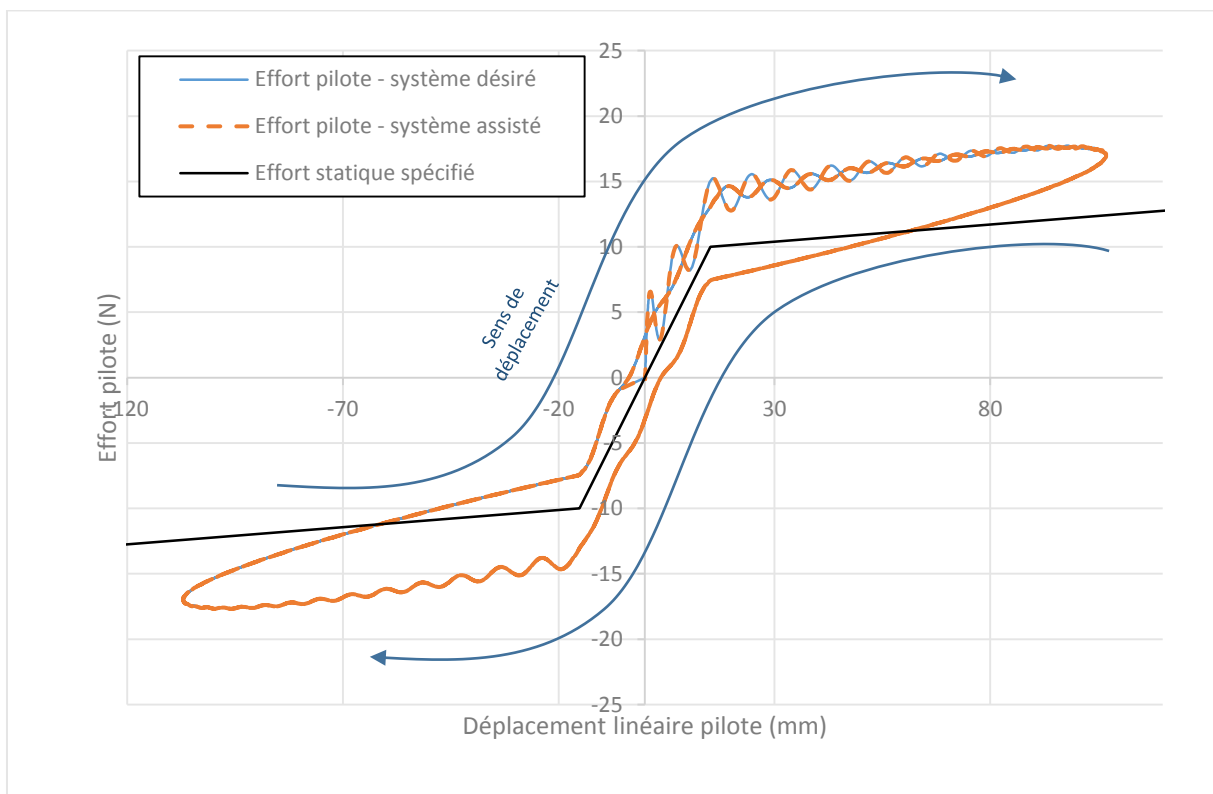


fig. 4-21 – Vérification du ressenti du système assisté

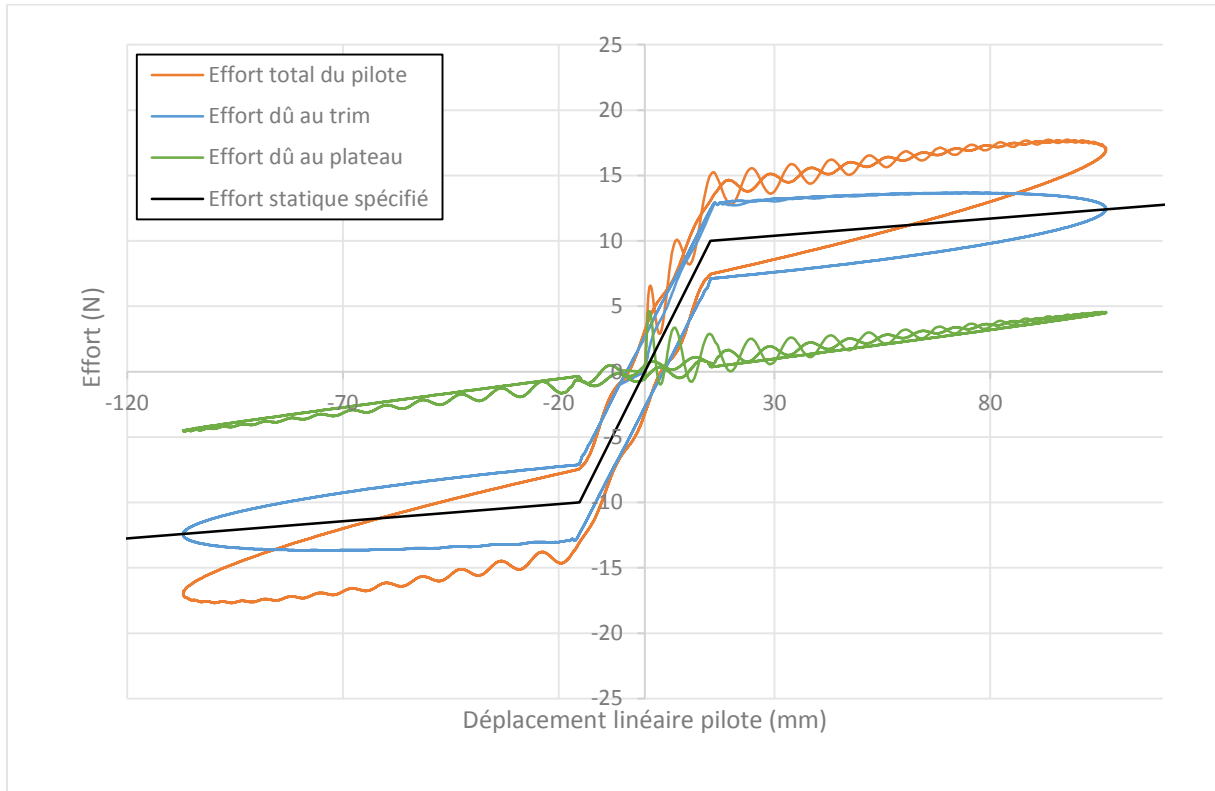
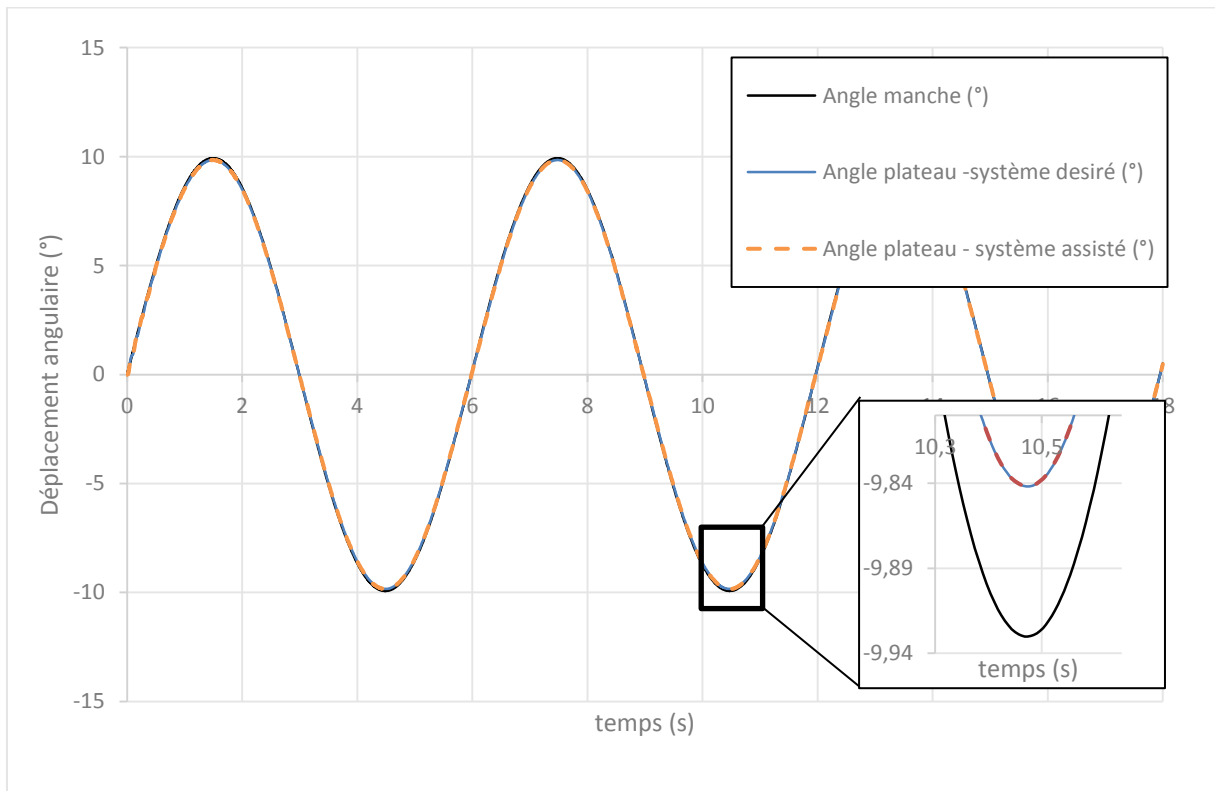


fig. 4-22 – Analyse du ressenti du système assisté



4.4.4 Mise en œuvre de la synthèse

Les lois d'assistance ont donc été prototypées et vérifiées sur un modèle pour la synthèse et grâce au logiciel *20-Sim*. Nous sommes donc en mesure de les valider sur le modèle de validation que nous supposons relever du réel. Pour implanter ces lois d'assistance, nous utilisons l'outil de simulation couplée proposé par la suite logicielle *LMS* (voir fig. 4-24).

En effet, rappelons que notre démarche est d'utiliser un modèle volumique comme relevant du réel. Le système ainsi modélisé doit être alors assisté. Afin de conserver une cohérence avec une démarche basée sur un système réel, nous distinguons la partie physique et la partie informationnelle au sein de deux logiciels différents. Le modèle de la partie physique (*LMS-Virtual.Lab*) est donc complété par des actionneurs (*Servo_Force*, *Trim_Force*) et des capteurs (*Servo_Vel*, *Trim_Vel*). Le traitement des informations fournies par ces derniers est implanté sous forme de schéma bloc (*LMS-Imagine.Lab*). Les lois de pilotage des actionneurs sont ainsi obtenues et renvoyées vers le modèle de la partie physique. Notons que nous avons conservé les mêmes lois d'assistance que celles utilisées avec le modèle pour la synthèse. Les variables cinématiques étant différentes, une mise à l'échelle est nécessaire.

Pour la simulation, nous avons utilisé la fonctionnalité de simulation couplée proposée par la suite logicielle. Dans ce cas de figure, les lois de traitement de l'information renseignées sous *LMS-Imagine.Lab* sont compilées dans un fichier externe, qui est chargé par *LMS-Virtual.Lab*. Alors, seul le solveur de ce dernier logiciel est utilisé pour simuler les deux comportements. L'intérêt, par rapport à une démarche de co-simulation, est une plus grande rapidité et une meilleure précision numérique. En revanche, seules des lois continues de comportements peuvent être transférées d'un logiciel à l'autre. Les lois d'assistance étant non linéaires et définies par parties, un lissage a été effectué en introduisant des fonctions trigonométriques.

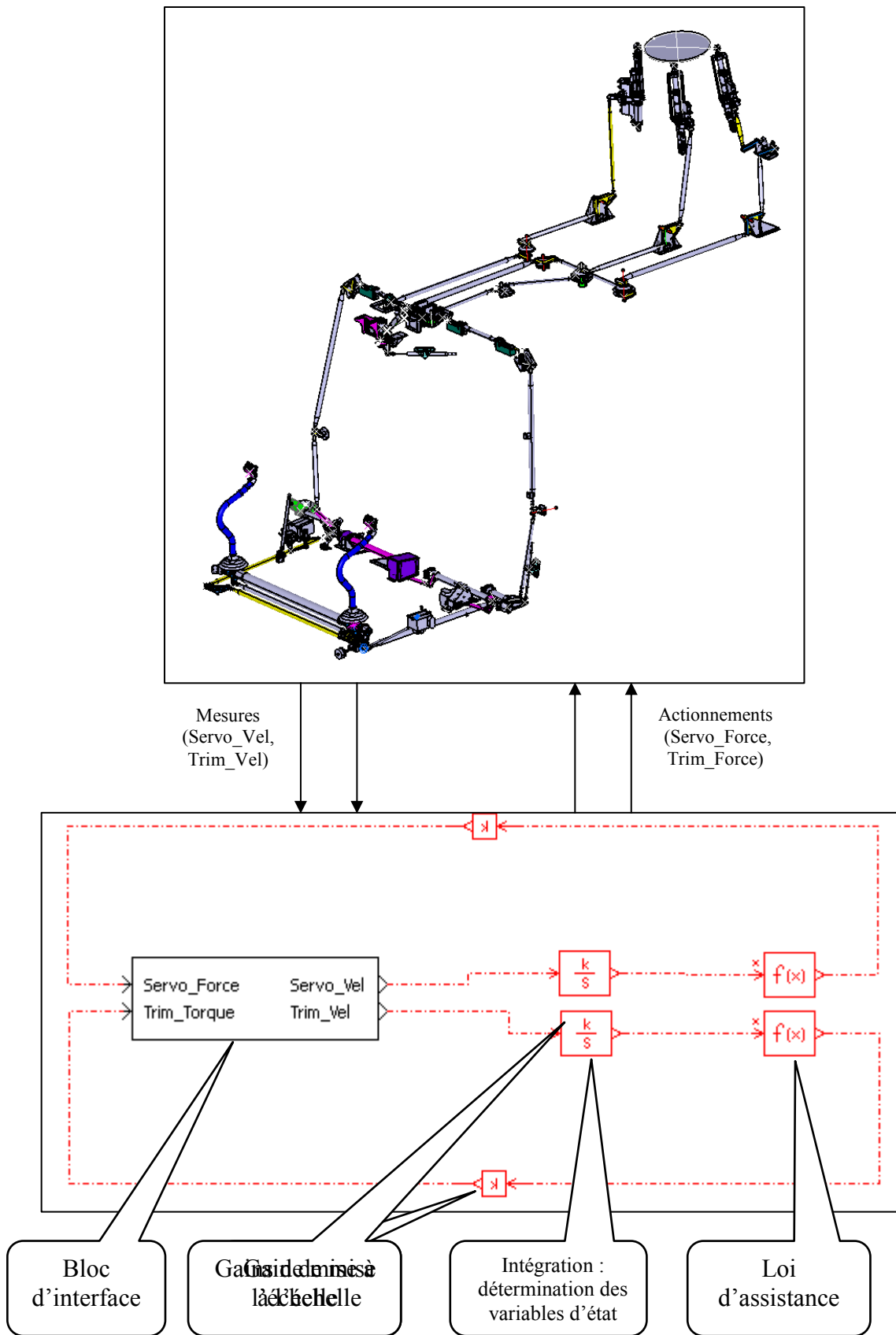


fig. 4-24 – Principe de la simulation couplée

4.4.5 Validation de performance

Comme dans les cas de simulation précédents, le manche est mis en mouvement selon une loi sinusoïdale sur trois périodes. Afin de valider la performance en ressenti, l'évolution de l'effort pilote est représentée fig. 4-25 en fonction de l'angle manche pour trois cas : l'effort obtenu sur le modèle de validation, l'effort obtenu par le modèle pour la synthèse avec assistance (comportement spécifié pratique) et l'effort selon la spécification idéale. Les trois allures sont proches, le comportement idéal est presque atteint. Notons que la courbe d'effort sur le modèle de validation n'est pas symétrique. De plus, elle s'éloigne du comportement simulé avec le modèle pour la synthèse si l'angle de manche devient trop important. Ceci est dû à l'approximation faite de gains cinématiques constants. Il est possible d'améliorer la maîtrise du comportement en tenant compte de la variabilité du gain dans la synthèse des lois d'assistance. Enfin, les deux courbes obtenues par simulation ne se centrent pas sur la spécification. Comme expliqué fig. 4-22, une partie de l'effort du pilote est due à la déformation de la raideur de la charge. Nous n'avons pas encore réalisé de découplage.

Enfin, pour valider la performance en transmission d'intention, nous représentons fig. 4-26 l'évolution chronologique de l'angle au manche, et de l'inclinaison du plateau, pour le modèle de validation et pour le comportement spécifié pratique. On constate un écart important, pour le modèle de validation entre l'angle au manche et l'angle du plateau. En effet, l'hypothèse d'un gain cinématique k_{eg} constant n'est toujours pas suffisante pour maîtriser finement le comportement plus réaliste du modèle de validation.

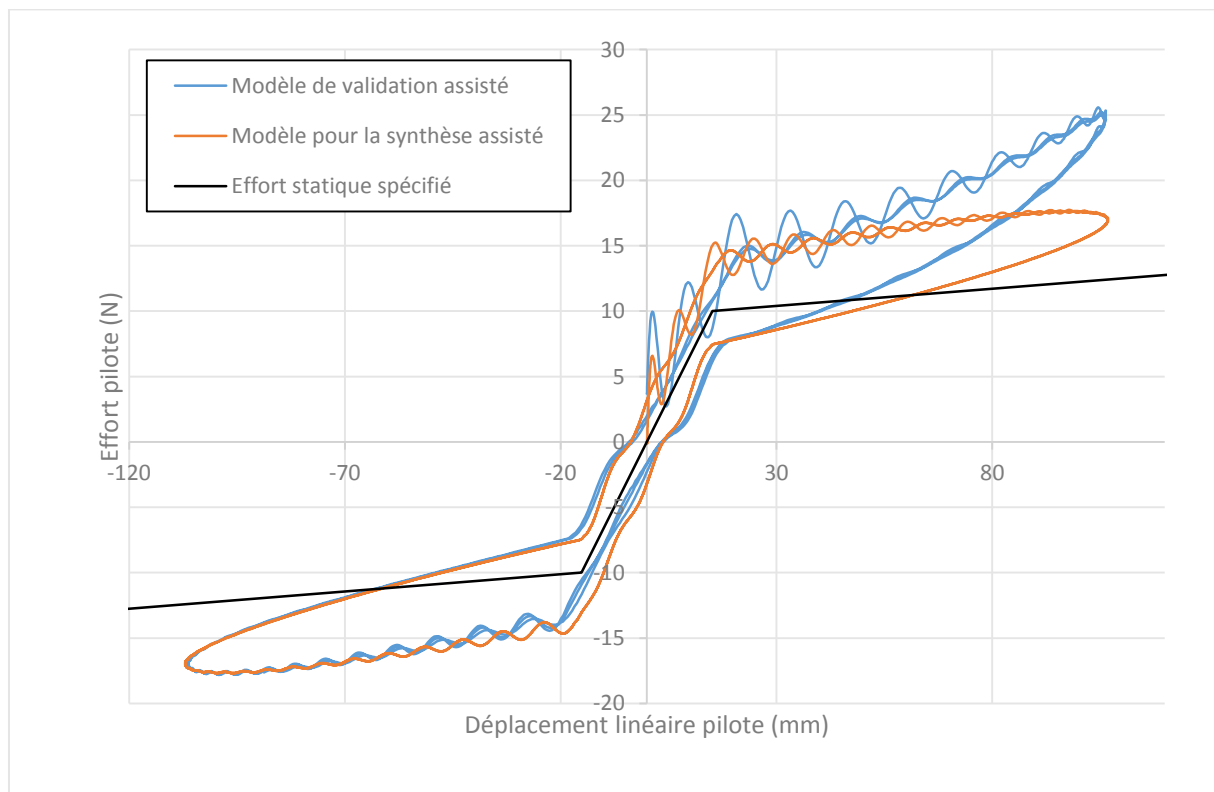


fig. 4-25 – Validation du comportement en ressenti

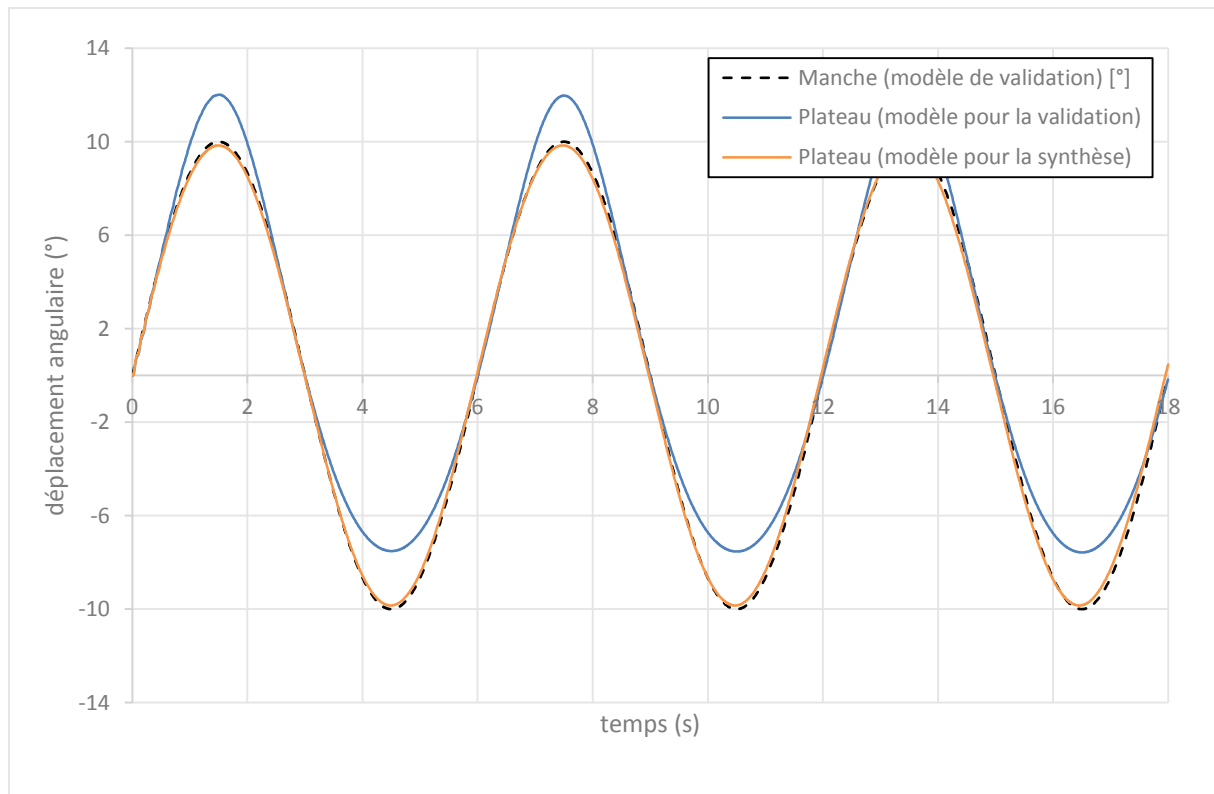


fig. 4-26 – Validation du déplacement de la matière d'œuvre

4.4.6 Analyse : Comparaison avec la solution industrielle

En première analyse, la fig. 4-25 fait aussi apparaître le phénomène qui avait été constaté fig. 4-22 : La courbe de l'effort du pilote ne se centre pas exactement sur la courbe de ressenti idéale, mais est légèrement décalée. Pour la même raison que précédemment, l'effort du pilote est une combinaison de l'effort au *trim* et de l'effort nécessaire au déplacement des pales. Pour améliorer cette performance, il est donc nécessaire d'annuler la portion de l'effort du pilote qui est transmise jusqu'au plateau. Ceci peut être réalisé de deux manières : un gain de multiplicateur d'effort α du PTF qui soit infini, ou une raideur des bielles de poussée qui soit nulle. Si ces deux solutions sont mathématiquement tout à fait envisageables, la première n'est technologiquement pas acceptable, car l'organe d'actionnement associé au PTF devrait fournir un effort infini. La deuxième est par contre technologiquement envisageable : une bielle de raideur nulle correspond à un espace libre entre ses deux extrémités. Aucune énergie n'est stockée dans celle-ci. Aucun effort ne transite par celle-ci. Par contre, pour les besoins de l'assistance, nous devons toujours mesurer l'allongement de celle-ci, ce qui reste envisageable. Remarquons enfin que ce découplage peut être obtenu en modifiant la structure physique nominale, en transformant une bielle de transmission en un jeu mécanique. Si, jusqu'à présent, nous avons proposé un développement méthodologique basé sur la mise en place d'organes d'assistance sur une structure physique nominale, remarquons que la méthodologie peut être développée dans une autre perspective : l'analyse et la critique de la structure physique existante afin qu'elle soit en meilleure adéquation avec les organes d'assistance.

La solution industrielle actuellement utilisée sur un hélicoptère de fort tonnage fait appel à des servo-commandes [34]. Leur principe de fonctionnement est celui exposé ci-dessus : la chaîne de transmission fait apparaître un organe de raideur nulle (distributeur) et un organe d'actionnement lié au déplacement relatif du distributeur (vérin). D'autre part, les *trims* passifs sont progressivement remplacés par des *trims* actifs dont nous avons pu justifier l'intérêt. Nous

pouvons donc conclure que l'espace obtenu des solutions par la méthodologie inclut la solution industrielle actuellement utilisée.

A titre indicatif, la fig. 4-27 compare les résultats obtenus par notre simulation couplée et d'autres obtenus expérimentalement lors de travaux antérieurs : « menée sur un appareil réel (Super Puma) [...] l'expérience consiste à déplacer le manche sur la plage entière à environ $1,4^\circ/s$ pour valider le comportement quasi statique » [33]). Les deux courbes sont très proches. Toutefois, la courbe expérimentale est obtenue en quasi statique. Elle présente donc très peu d'oscillations. Mais, l'hystérésis est toujours présente, traduisant la présence de frottements secs importants. De plus, le comportement réel n'est pas symétrique par rapport à l'origine. Ce qui est dû à un déséquilibre, phénomène que l'on retrouve souvent sur un système réel. Nous pouvons donc dire que nos comportements, obtenus par la méthode proposée et simulés en simulation couplée, sont proches des comportements réels. Toutefois, l'excitation utilisée dans notre simulation n'étant pas statique (jusqu'à $10^\circ/s$), nos résultats présentent plus d'oscillation que dans un essai expérimental quasi statique. De plus, cette comparaison met en évidence un modèle utilisé où les frottements secs ont été sous évalués. Les frottements secs sont tout à fait modélisables dans le formalisme hamiltonien à ports [58]. Un modèle plus fin et recalé, obtenu par une campagne d'expérimentation adéquate, permettrait d'obtenir des résultats de simulation plus réalistes. Mais, ces approfondissements ne changeraient rien à la qualité de la méthode proposée.

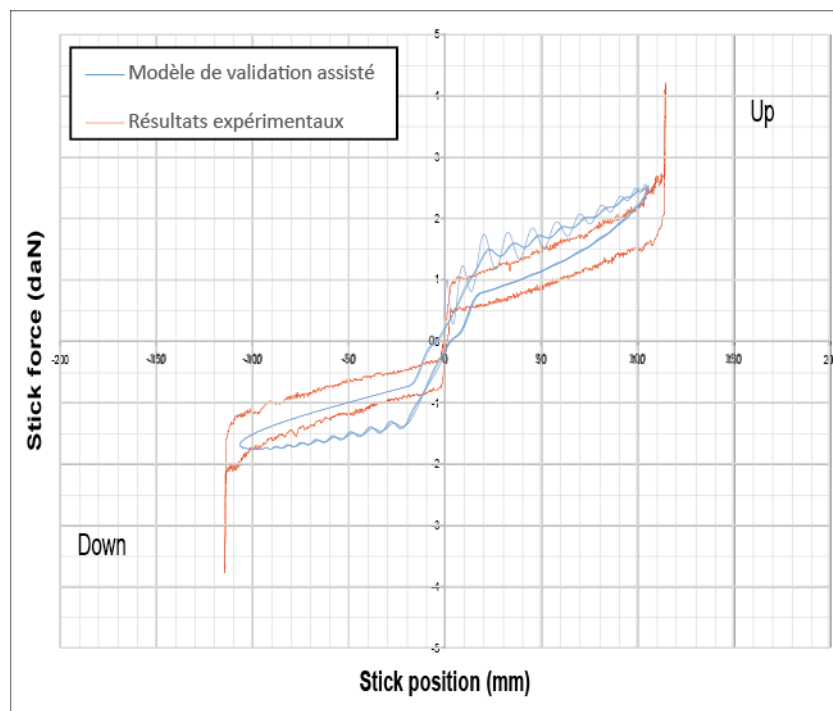


fig. 4-27 – Comparaison simulation - expérimentation

Nous pouvons aussi vérifier le dimensionnement de l'organe principal d'assistance : le vérin développant l'effort nécessaire au mouvement du plateau : la fig. 4-28 représente l'effort développé par le vérin d'assistance dans le cas du modèle de validation. Un vérin industriel de servo-commande pour ce type d'aéronef est conçu pour fournir jusqu'à 3 kN ([34]). Les ordres de grandeur des efforts simulés sont bien en concordance avec la réalité industrielle. Une certaine marge d'effort est encore disponible. Mais nos simulations se sont limitées à un débattement inférieur à la course totale possible.

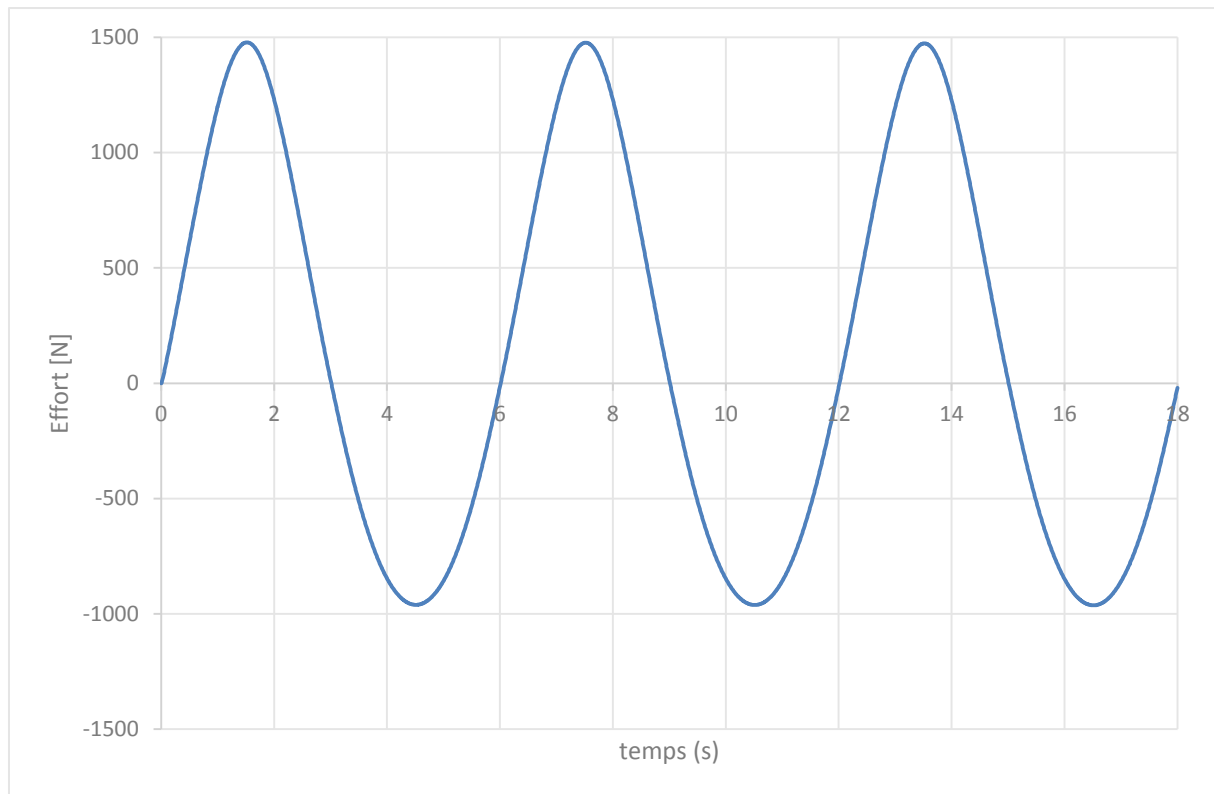


fig. 4-28 – Effort déployé par le vérin de servo-commande

4.5 Conclusion

Un aéronef à voilure tournante est un système multi-physique complexe. Nous avons essayé d'en maîtriser le comportement par une approche globale, non segmentée. La méthodologie proposée au chapitre 3 permet cette approche. Appliquée aux chaînes de commande de vol d'un hélicoptère de fort tonnage, elle est parfaitement adaptée à la modélisation des interactions physiques entre le pilote et le système. De plus, l'étude des puissances en jeu met clairement en évidence le besoin d'assistance physique au pilotage.

Ainsi, le déploiement de la méthodologie aboutit à une structure de mesure et d'actionnement permettant d'atteindre un comportement spécifié. Les résultats numériques obtenus par simulation ont prouvé que le comportement simulé est proche de celui à atteindre. Les différences de performances sont explicables à partir de l'analyse des différences entre le modèle de validation et celui utilisé pour la synthèse (simplification et incertitudes). Une perspective serait d'affiner le modèle utilisé pour la synthèse afin d'atteindre un comportement plus proche de celui spécifié.

Par une comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur un système réel, nous corroborons que les comportements simulés correspondent aux exigences. *A fortiori*, nous avons aussi vérifié que la méthodologie permet d'obtenir un espace de solutions qui inclut la solution réelle.

Mais, vérifier que la conception proposée correspond au système existant est d'un intérêt limité. Un apport important, qui répond au besoin d'ingénierie de simplicité et de modularité des outils, est une représentation à deux niveaux de granularité : d'une part, une représentation détaillée et combinée des comportements physiques et du contrôle-commande informationnel ou représentation cyber-physique détaillée ; d'autre part, une représentation synthétique du

comportement atteint du système. Une représentation globale est envisageable sous forme d'un simple bloc, puisque les comportements peuvent être facilement implémentables dans un outil logiciel.

Enfin, alors que l'approche habituelle de l'assistance aux commandes de vol est basée sur une représentation détaillée des constituants impliquant une complexité de représentation, d'analyse et de maîtrise, l'approche non segmentée proposée simplifie la démarche d'ingénierie en se basant sur les modèles globaux du système physique et du comportement spécifié.

Néanmoins, dans cette illustration, quatre logiciels ont été utilisés : LMS-Virtual.lab et LMS-Imagine.lab pour la simulation couplée, 20-Sim pour la représentation graphique sous forme de bond-graph et Mathematica pour la résolution des équations de correspondance. Les outils d'interfaçage entre ces outils logiciels restent peu développés, rendant la mise en œuvre peu ergonomique. Des passerelles restent donc à développer, ce qui correspond aux objectifs de l'équipe INSM.

5 Conclusion générale et perspectives

La qualité du comportement des chaînes de commande de vol d'un aéronef à voilure tournante est un point critique pour permettre au pilote de maîtriser son véhicule. La complexité physique et fonctionnelle des organes employés nécessite des outils de représentation adaptés : multi-échelles, multi-physiques, modulaires. Un objectif de la chaire industrielle « Dynamique des systèmes mécaniques complexes » de la fondation d'entreprises Airbus Group, en partenariat avec l'équipe INSM du laboratoire LSIS, est de proposer des outils de représentation et d'analyse dédiés à ce type de système. Pour répondre à ces besoins, les premiers travaux réalisés dans ce contexte ont ciblé l'outil de représentation multi-physique bond-graph. Sur cette base, les travaux présentés dans ce mémoire ont visé à développer les outils de contrôle-commande associés au paradigme de modélisation multi-physique pour un double usage : la représentation et la conception d'un système d'assistance à opérateur. Dans un premier temps, nous synthétiserons les développements présentés, puis, nous proposerons quelques pistes d'approfondissement de ces travaux.

5.1 Synthèse des travaux

Le premier chapitre replace le contexte technologique en présentant les principaux organes d'un hélicoptère et de ses commandes de vol. Afin de préciser l'outil de représentation utilisé, il rappelle aussi les fondamentaux du paradigme multi-physique basé sur le concept d'énergie. Il se conjugue en plusieurs conventions d'analogie et des outils logiciels sont associés. La majorité des outils de représentation multi-physique permet une représentation multi-niveau, non linéaire, et modulaire. Un formalisme mathématique peut y être adossé, le formalisme hamiltonien à ports. Une spécificité d'un système physique hamiltonien est qu'il est naturellement passif. Cependant, des chaînes fonctionnelles comprenant des organes pilotés et incluant un traitement de l'information, telles que les commandes de vol d'un hélicoptère, peuvent ne pas être passives. De plus, il peut être difficile d'obtenir une représentation macroscopique synthétique et fonctionnelle d'un système physique combiné au traitement de l'information nécessaire à sa maîtrise (système cyber-physique).

Le cadre des chaînes de commande de vol présente une spécificité : l'interaction entre le pilote et le système est de type physique. A la différence d'un système de téléopération, une commande de vol d'hélicoptère maintient un lien physique entre l'opérateur et la matière d'œuvre, des organes d'assistance venant en complément afin de faciliter l'opération tout en assurant une bonne ergonomie. Nous qualifions donc ce type de système de Système d'Assistance à Opérateur. Le deuxième chapitre propose donc une représentation générique de cette catégorie de systèmes, notamment de leurs interactions avec leur environnement. Une fois la notion de SAO précisée, une première contribution consiste à préciser l'expression mathématique dans le formalisme hamiltonien à ports du comportement de ce type de système. Ensuite, une expression fonctionnelle des exigences est associée au moyen d'une matrice de comportements.

Le troisième chapitre s'attache à développer une méthodologie de représentation et de conception de ce type de système. Les méthodes de façonnement d'énergie courantes se basent sur une identification entre le comportement du système piloté et le comportement à atteindre à travers une équation de correspondance. Cette dernière précise les lois de commande intrinsèquement passives. Cependant, ces méthodes ne peuvent pas s'employer directement ici car elles visent à atteindre un comportement autonome. Dans le cas d'un S.A.O., le contexte n'est pas le même puisque celui-ci est en interaction avec son environnement. Cela implique de

nouvelles contraintes supplémentaires qui ont été explicitées § 3-3, et présentent une contribution majeure des travaux présentés.

En effet, la représentation générale d'un S.A.O. proposée au deuxième chapitre, complétée par les contraintes précédemment définies, peut alors être le support d'activités de conception qui tiennent dans un triptyque : partant d'une spécification idéale, en tenant compte des contraintes dues à la nature physique du système à assister, il est possible d'exprimer un comportement spécifié accessible en pratique. L'équation de correspondance nous indique alors, par une analyse structurelle, où doivent agir les organes d'assistance et quelle doit être la nature de l'actionnement. Plus encore, elle précise les lois de commande et les mesures nécessaires.

Il y a alors correspondance entre le comportement spécifié et le comportement atteint. Nous pouvons donc associer deux niveaux de représentation d'un même système : le système nominal et les organes d'assistance dans une représentation cyber-physique et une représentation globale synthétique du comportement.

Pour vérifier les développements, un critère mathématique de transparence est proposé. La méthodologie est appliquée sur un cas générique. Une vérification formelle et par simulation est menée afin de mettre en évidence les qualités et les limites de la démarche.

Le troisième chapitre synthétise donc les développements méthodologiques proposés dans une approche originale qui permet de déterminer le lieu et le niveau d'assistance nécessaire à un système, à partir d'une expression explicite de la performance attendue. Sa mise en œuvre sur des exemples simples de contrôle d'impédance et de *power scaling* a permis d'en illustrer la pertinence. Ces schémas d'assistance permettent d'analyser un système existant, un outil électroportatif d'assistance à la coupe.

Le dernier chapitre se concentre sur la mise en pratique de la méthodologie en application aux chaînes de commande de vol d'un hélicoptère de fort tonnage afin de mener une démarche de reconception. Un modèle volumique de la structure physique dénuée d'assistance est utilisé comme relevant du réel. Un modèle simplifié est identifié pour mener la synthèse méthodologique. Celle-ci précise donc les lieux et lois d'assistance. Malgré un modèle imparfait, les résultats de simulation sont proches des expérimentations menées sur un hélicoptère réel.

A fortiori, notons que l'approche proposée permet une conception avec une vision globale, non segmentée, des chaînes de commande de vol. Les lieux d'actionnement et les lois de commande apparaissent explicitement. L'ensemble des spécifications prend place dans une matrice de comportement. L'approche multi-physique permet une représentation modulaire, à deux niveaux de granularité. Enfin, l'espace de solution dégagé contient la solution actuellement utilisée. Autrement dit, nous pouvons proposer une représentation synthétique des solutions technologiques actuelles, mais aussi d'autres solutions pour atteindre les spécifications.

5.2 Perspectives

L'approche de représentation et de conception d'un système d'assistance à opérateur proposée dans ce mémoire est basée sur une méthodologie de façonnement du comportement énergétique. L'extension de la méthode *IDA-PBC* à un système non autonome implique un certain nombre de contraintes. Pourtant, il a été montré qu'un assouplissement de ces contraintes pouvait être envisagé : si l'actionnement ne se limitait pas à agir au sein de la structure énergétique du système et s'il était envisagé au niveau des ports, bon nombre de

contraintes seraient relâchées. Nous avons qualifié ce cas de figure de *ports contrôlés*. Cette voie prometteuse nécessite un approfondissement de ses conséquences technologiques. En effet, la mesure se fera alors sur une grandeur d'interaction flux ou effort, et non uniquement sur l'état du système. Cela engendre certaines difficultés, qui s'apparentent aux problématiques de la téléopération. De plus, l'actionnement direct au niveau d'un port aura une conséquence sur la causalité au niveau de l'interaction. Le caractère modulaire est-il alors conservé ?

De manière plus générale, l'étude de la causalité d'une chaîne cyber-physique mérite d'être étayée. En effet, les lois de commande qui pilotent les organes d'assistance correspondent à un cheminement et un traitement de l'information. Dans le cadre général, est-il possible et raisonnable d'inverser la causalité d'un tel cheminement ? Dans le cadre d'un S.A.O., l'inversion causale au niveau d'un port d'interaction entraîne-t-elle l'inversion d'une chaîne d'information ? Pour aller encore plus loin, la démarche proposée est-elle envisageable pour maîtriser la précision ? En effet, nous savons que, dans un système physique, deux grandeurs sont strictement liées par une relation holonome si l'une d'elles est en causalité dérivée. Est-il possible d'introduire dans un comportement physique une causalité dérivée par une structure de commande afin que deux grandeurs physiques soient alors liées dynamiquement.

Enfin, un dernier axe d'amélioration méthodologique a été mis en évidence à travers l'application aux chaînes de commande de vol d'un hélicoptère : un système réel présente un niveau de complexité comportementale et des variations paramétriques difficiles à modéliser. Un modèle à paramètres incertains peut représenter cette complexité. La représentation linéaire fractionnaire en formalisme hamiltonien à port est envisageable, et a été développée dans le cas limité de la modélisation incertaine des stockages d'énergie. Il reste nécessaire de la généraliser à l'ensemble des éléments du formalisme hamiltonien, et d'évaluer ses conséquences sur la méthode, et plus exactement sur son résultat : une loi de commande d'assistance robuste.

En parallèle des approfondissements méthodologiques, il est nécessaire de replacer les développements proposés dans une démarche d'ingénierie et de conception d'un système complexe. En effet, les développements proposés se sont limités à la définition d'organes et de lois d'assistance sans se préoccuper de contraintes technologiques, financières, ou simplement d'encombrement.

En effet, nous avons mis en évidence la nécessité d'un compromis entre une spécification idéale et les contraintes physiques imposées par le système à assister, qui amène à une spécification pratique qui, elle, est accessible. Les choix nécessaires ne peuvent être justifiés que par les seuls points de vue du contrôle-commande. La démarche de conception doit tenir compte des autres points de vue métier impliqués dans la conception du système. La méthodologie doit donc s'insérer dans une démarche fédérée de conception, ce qui est un objectif de recherche de l'équipe INSM.

Vis-à-vis de cet objectif, la méthodologie proposée apporte un point de vue structurel sur le système et les comportements accessibles. En effet, à travers les représentations graphiques de la structure du système physique global et du comportement souhaité, il est possible de quantifier le nombre d'actionnements et le nombre de mesures nécessaires. Cette information est fondamentale pour jauger le coût d'une solution technologique. Ce lien, qui n'a pas été formellement explicité, doit être clairement proposé.

Notons aussi que les développements présentés dans ce mémoire se basent sur un système physique nominal donné, et qu'ils proposent une évolution de la spécification idéale vers une spécification adaptée au système nominal. A aucun moment, la structure physique utilisée et

son dimensionnement n'ont été remis en cause. Cependant, dans une démarche de conception plus globale encore, nous devons nous donner les outils afin de faire aussi évoluer la structure physique en fonction de la spécification idéale. La méthodologie ne serait que peu modifiée, seule les données et les inconnues évolueraient.

D'ailleurs, dans le domaine de l'aéronautique, les spécifications sont rarement exprimées sous forme de comportements, mais plus généralement sous forme de gabarits fréquentiels. Ces deux approches restent compatibles, puisqu'elles sont liées par la matrice modale. Il est donc tout à fait envisageable d'étendre la méthodologie proposée à une spécification sous forme de gabarits fréquentiels.

Enfin, notons aussi que sur le cas concret d'étude des chaînes de commande de vol, nous avons mis en évidence le besoin, lors de la conception et de la mise en œuvre de la structure d'assistance, d'utiliser de manière complémentaire différents logiciels. Les interfaces entre ces logiciels sont très limitées. Des moyens de fédérations d'outils logiciels restent à développer.

L'ensemble des perspectives proposées dans le cadre de la conception d'un système d'assistance rentre dans le cadre des objectifs de recherche de l'équipe INSM. L'approche proposée peut aussi être appliquée à d'autres systèmes d'assistance à opérateur (direction assistée automobile, vélo à assistance au pédalage, outils assistés de manutention, d'usinage, etc.). Elle peut être généralisée aux interactions physiques n'incluant pas forcément une action de l'utilisateur (assise d'un pilote), et être utilisée dans la mise en évidence et l'étude de phénomènes plus globaux, comme le couplage entre un pilote et son aéronef (*Rotor-Pilot Coupling*).

Bibliographie

- [1] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Interaction homme-machine : Utilisation des formalismes graphiques pour l'analyse des schémas de commande. Application à un outillage électroportatif*, Journées Doctorales Modélisation, Analyse, Conduite des Systèmes dynamique, JDMACS 2011, Marseille, France, 2011.
- [2] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Conception architecturale d'un système mécatronique d'assistance à opérateur par Bond - Graph*, septième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 2012.
- [3] Touron, M., Gomand, J., Dieulot, J.-Y. & Barre, P.-J., *Modeling of inertial and compliance parametric uncertainties in Port-Hamiltonian Systems using LFR*, Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), International Conference on , Hammamet, 2013.
- [4] Kryszynski, T. & Malburet, F., *Mechanical instability*, ISTE & Wiley, 2011.
- [5] Pavel, M. D. & Padield, G. D., *Understanding the peculiarities of Rotorcraft-Pilot-Coupling*, American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montreal, Canada, 2008.
- [6] Pavel, M. D., *Modeling Lead-Lag Dynamics for Rotorcraft-Pilot-Couplings Investigation*, American Helicopter Society 66th Annual Forum, Phoenix, Arizona, 2010.
- [7] Chikhaoui, Z., *Contribution à la modélisation énergétique des hélicoptères en vue de la maîtrise de leurs comportements dynamiques*, Thèse de l'Ecole nationale supérieure d'Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 2013.
- [8] Boudon, B., *Méthodologie de modélisation des systèmes mécatroniques complexes à partir du multi-bond graph : application à la liaison BTP-fuselage d'un hélicoptère*, Thèse de l'Ecole nationale supérieure d'Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 2014.
- [9] Fritzson, P., *Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica*, Wiley, 2011.
- [10] Birkett, S. H., The Mathematical Foundations of Bond-Graphs : I - IV. *Journal of the Franklin Institute* (Vol. 326, p. 329-350), 1989-1990.
- [11] Dauphin-Tanguy, G., *Les bond graphs*, Hermès, 2000.
- [12] Vergé, M., *Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs*, Technip, 2003.
- [13] Borutzky, W., *Bond Graph Methodology - Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models*, Springer, 2010.
- [14] Klein, E., *De quoi l'énergie est-elle le nom?*, Conférence "Cyclope" du CEA, Saclay, 2012.

- [15] Rahmani, A., Sueur, C. & Dauphin-Tanguy, G., Approche des bond graphs pour l'analyse structurelle des systèmes linéaires. *Linear algebra and its applications* (Vol. 259, p. 101-131), 1997.
- [16] Meyer, K. R., Hall, G. R. & Offin, D., *Introduction to Hamiltonian Dynamical Systems and the N-Body Problem*, Springer, 2009.
- [17] NF-Z-67288, *Ingénierie des systèmes - Processus de cycle de vie des systèmes*, AFNOR, 2003.
- [18] Feliot, C., *Modélisation des systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles*, Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 1997.
- [19] Barre, P. J., *Commande et entraînement des machines à dynamique élevée - Formalisme et applications*, Habilitation à Diriger des Recherches - Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [20] Gomand, J., *Analyse de systèmes multi-actionneurs parallèles par une approche graphique causale*, Thèse de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, 2008.
- [21] Bouscayrol, A., *Formalismes de Représentation et de Commande Appliqués aux Systèmes Electromécaniques Multi-Machines Multi-Convertisseurs*, Université des Sciences et Techniques de Lille: Habilitation à diriger des recherches, 2003.
- [22] Verhille, J.-N., *Représentation énergétique macroscopique du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion*, Thèse de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, 2007.
- [23] Dalsmo, M. & van der Schaft, A., On representations and integrability of mathematical structures in energy-conserving physical systems. *SIAM Journal on Control and Optimization* (Vol. 37-1, p. 54-91), 1998.
- [24] Donaire, A. & Junco, S., Derivation of Input-State-Output Port-Hamiltonian Systems from bond graphs. *Simulation Modelling Practice and Theory* (Vol. 17-1, p. 137-151), 2009.
- [25] Duindam, V., Stramigioli, S., Macchelli, A. & Bruyninckx, H., *Modeling and Control of Complex Physical Systems - The Port-Hamiltonian Approach*, Springer, 2009.
- [26] Cervera, J., van der Schaft, A. & Baños, A., Interconnection of Port-Hamiltonian Systems and composition of Dirac structures. *Automatica* (Vol. 43-2, p. 212-225), 2007.
- [27] Gawthrop, P. J., Physical Model-based Control : A Bond Graph Approach. *Journal of the Franklin Institute* (Vol. 332, p. 285-305), 1995.
- [28] Marquis-Favre, W., *Contribution à la représentation bond graph des systèmes mécaniques multi corps*, Thèse de l'INSA, Lyon, 1997.

- [29] Dauphin-Tanguy, G., Rahmani, A. & Sueur, C., Bond Graph Aided Design of Controlled Systems. *Journal Simulation Practice and Theory* (Vol. 7, p. 493-513), 1999.
- [30] Karnopp, D. C., Margolis, D. L. & Rosenberg, R. C., *System dynamics: an unified approach*, Wiley, 1990.
- [31] Johnson, W., *Rotorcraft Aeromechanics*, Cambridge University Press, 2013.
- [32] Raletz, R., *Théorie élémentaire de l'hélicoptère*, Cépaduès Éditions, 2009.
- [33] Martin, M., *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 de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 2013.
- [34] Marger, T., *Conception d'un distributeur de servocommande hydromécanique sous critères de coût et de mixabilité*, Thèse de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 2010.
- [35] NF-XP-E01-013, *Mécatronique - Cycle de vie et conception des produits*, AFNOR, 2009.
- [36] De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A. & Bicchi, A., An Atlas of Physical Human–Robot Interaction. *Mechanism and Machine Theory* (Vol. 43, p. 253-270), 2008.
- [37] Passenberg, C., Peer, A. & Buss, M., A Survey of Environment-, Operator-, and Task-adapted Controllers for Teleoperation System. *Mechatronics* (Vol. 20, p. 787-801), 2010.
- [38] Lawitzky, M., Mortl, A. & Hirche, S., *Load Sharing in Human-Robot Cooperative Manipulation*, IEEE Conference on Robot and Human Interactive Communication, 2010.
- [39] Kazerooni, H., Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* (Vol. 20-2, p. 450-463), 1990.
- [40] Secchi, C., Stramigioli, S. & Fantuzzi, C., *Control of Interactive Robotic Interfaces - a Port-Hamiltonian Approach*, Springer, 2007.
- [41] Hogan, N., Impedance Control: an Approach to Manipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* (Vol. 107, p. 1-24), 1985.
- [42] Asokan, T. & Singaperumal, M., Damping Variation through Electrohydraulic servosystem: an Application to Active Impedance Control. *Mechatronics* (Vol. 6, p. 613-630), 1996.
- [43] Willems, J. C., Paradigms and Puzzles in the Theory of Dynamical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* (Vol. 36-3, p. 259-294), 1991.
- [44] Stramigioli, S., Fasse, E. D. & Willems, J. C., A rigorous framework for interactive robot control. *International Journal of Control* (Vol. 75-18, p. 1486-1503), 2002.

- [45] Polderman, J. W. & Willems, J. C., *Introduction to Mathematical Systems Theory : A Behavioral Approach*, Springer-Verlag, 1998.
- [46] Colgate, J. E., Peshkin, M. & Klostermeyer, S. H., *Intelligent Assist Devices in Industrial Applications: a Review*, IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, 2003.
- [47] Li, P. Y. & Ngwompo, R. F., Power Scaling Bond Graph Approach to the Passification of Mechatronic Systems - With Application to Electrohydraulic Valves. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control* (Vol. 127-4, p. 633-641), 2005.
- [48] Duchaine, V., *Commande des robots destinés à interagir physiquement avec l'humain*, Thèse de la Faculté des Sciences et du Génie de Laval, Canada, 2010.
- [49] Jarrassé, N., Paik, J., Pasqui, V. & Morel, G., *How can human motion prediction increase transparency*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008.
- [50] Ortega, R., van der Schaft, A., Maschke, B. & Escobar, G., Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control of port-controlled Hamiltonian systems. *Automatica* (Vol. 38-4, p. 585-596), 2002.
- [51] Donaire, A. & Junco, S., Energy Shaping, Interconnection and Damping Assignment, and Integral Control in the Bond Graph Domain. *Simulation Modelling Practice and Theory* (Vol. 17-1, p. 152–174), 2009.
- [52] Doria-Cerezo, A., *Modeling, simulation and control of a doubly-fed induction machine controlled by a back-to-back converter*, Thesis de la Universitat Politecnica de Catalunya, 2006.
- [53] Dirksz, D. A. & Scherpen, J. M. A., *Port-Hamiltonian and Power-Based Integral Type Control of a Manipulator System*, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 2011.
- [54] Gawthrop, P. J., Wagg, D. J. & Neild, S. A., Bond Graph based Control and Substructuring. *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 211–227), 2009.
- [55] El Feki, M., Di Loreto, M., Bideaux, E., Thomasset, D. & Marquis-Favre, W., *On the role of essential orders on feedback decoupling and model inversion : bond graph approach*, ECMS, Nicosie, Cyprus, 2008.
- [56] Ramos, A. L., Ferreira, J. V. & Barceló, J., Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* (Vol. 42, p. 101-111), 2012.
- [57] Kam, C. S. & Dauphin-Tanguy, G., Bond Graph Models of Structured Parameter Uncertainties. *Journal of the Franklin Institute* (Vol. 342, p. 379-399), 2005.

- [58] Koopman, J., Jeltsema, D. & Verhaegen, M., Port-Hamiltonian description and analysis of the LuGre friction model. *Simulation Modelling Practice and Theory* (Vol. 19-3, p. 959-968), 2011.

Annexes

Annexe I – Modèle de validation : paramétrage des variables

Les notations ci-dessous sont associées à la fig. 4-8.

| Notations | Descriptif | Unité |
|----------------|---|-------|
| F_{ut} | Effort du pilote sur le manche en tangage | N |
| V_{ut} | Vitesse du pilote sur le manche en tangage | m/s |
| F_{ur} | Effort du pilote sur le manche en roulis | N |
| V_{ur} | Vitesse du pilote sur le manche en roulis | m/s |
| F_{uc} | Effort du pilote sur le manche collectif | N |
| V_{uc} | Vitesse du pilote sur le manche collectif | m/s |
| ω_p | Vitesse angulaire du plateau en tangage | rad/s |
| M_{ee} | Couple extérieur de réaction équivalent à la charge | Nm |
| θ_{anc} | Angle d'ancrage, définissant la position neutre de l'impédance contrôlée du <i>TRIM</i> | rad |
| θ_r | Position angulaire du moyeu de rotor autour de son axe | rad |
| ω_m | Vitesse de rotation en tangage du manche | rad/s |
| θ_m | Angle de rotation du manche en tangage | Rad |
| ω_p | Vitesse de rotation en tangage du plateau | rad/s |
| V_b | Vitesse à la base d'une bielle | m/s |

tab. I-1 – Modèle de validation : paramétrages des variables

Annexe II – Modèle de validation : caractéristiques des comportements

Les notations ci-dessous sont associées à la fig. 4-8.

| | Notations | Descriptif | Valeur estimative [unité] |
|------------------|-----------------|--|-------------------------------|
| Gain cinématique | k_1 | Rapport cinématique main pilote - angle du manche | 1,612 rad/m |
| | k_2 | Rapport cinématique manche - <i>trim</i> | 2,79 |
| | k_3 | Rapport cinématique manche - bielle | 0,19 m/rad |
| | k_4 | Rapport cinématique bielle - plateau | 3,92 rad/m |
| Inertie | I_{tr} | Inertie répartie de la tringlerie et des combinateurs | 0,09 kg |
| | I_{eq} | Inertie équivalente de la charge | 100 kg.m ² |
| Souplesse | C_m | Souplesse du manche | 1/20 000 m/N |
| | C_t | Souplesse de <i>trim</i> | 1/25 rad/ Nm |
| | C_b | Souplesse des bielles de poussée | 25000 N/m |
| | C_{eq} | Souplesse équivalente de la charge | 5,714.10 ⁻⁴ rad/Nm |
| Dissipation | R_t | Dissipation associée au <i>trim</i> | 1,284 m ² kg/s/rad |
| | R_b | Dissipation associée à la bielle | 25 m ² kg/s/rad |
| | R_{eq} | Dissipation associée au plateau | 100 m ² kg/s/rad |
| Spécification | $K_d(\theta_m)$ | Raideur désirée pour le ressenti du pilote | Dépendant de θ_m |
| | k_d | Rapport cinématique désiré entre l'angle du manche et l'angle du plateau | 1 |

tab. II-1 – Modèle de validation : caractéristiques des comportements

Annexe III – Modèle pour la synthèse : paramétrages

Les notations ci-dessous sont associées à la fig. 4-11.

| | | |
|---------------|---|----------------------------------|
| M_{ut} | Effort du pilote sur le manche en tangage | N |
| ω_{ut} | Vitesse du pilote sur le manche en tangage | m/s |
| σ_t | Moment cinétique du plateau | Kg.m ² /s |
| k_{ge} | Rapport cinématique équivalent global : inclinaison en tangage du plateau par rapport à l'inclinaison du manche | 1 |
| I_{te} | Inertie équivalente à la tringlerie et des combinateurs ramenée à l'angle manche | 0,09 kg.m ² |
| I_{eq} | Inertie équivalente de la charge | 100 kg.m ² |
| C_{me} | Souplesse équivalente au manche | 1,3.10 ⁻⁴ rad/Nm |
| C_{te} | Souplesse équivalente de <i>trim</i> | 5,12.10 ⁻³ rad/Nm |
| C_{be} | Souplesse équivalente aux bielles de poussée | 6,1.10 ⁻⁵ rad/Nm |
| C_{eq} | Souplesse équivalente de la charge | 5,71.10 ⁻⁴ rad/Nm |
| d_{te} | Dissipation répartie sur la tringlerie, ramenée à l'angle manche | 10 m ² kg/s/rad |
| d_p | Dissipation au niveau de la charge | 100 m ² kg/s/rad |
| d_{be} | Dissipation équivalente au niveau des bielles de poussée | 1,625625 m ² kg/s/rad |
| C_{te}^* | Compliance variable désirée | Selon la loi fig. 4-16 |
| α : | Facteur d'échelle en force du PTF | 100 |

tab. III-1 – Tableau des valeurs 20Sim

Annexe IV – Charge équivalente

L'objectif de cette annexe est de justifier que la charge équivalente à un rotor équipé de cinq pales se ramène à une raideur et une inertie constantes quelle que soit la position du rotor. Les pales ont chacune un angle de pas θ_{pi} (où i est l'indice de la pale considérée) défini par la position du plateau cyclique. Nous cherchons donc à déterminer un modèle dynamique de charge équivalente aux cinq pales ramenées à la mobilité en tangage du plateau cyclique θ_t . Le mouvement de chacune des pales est lié à l'inclinaison du plateau θ_t et à la position du rotor θ_r , et à leur dérivée. L'approche utilisée est une approche énergétique.

| | |
|----------------|---|
| θ_{pi} | Angle de pas de la $i^{\text{ème}}$ pale |
| θ_t | Inclinaison du plateau en tangage |
| λ_{zi} | Déplacement verticale de la biellette de pas |
| b | Distance biellette de pas - axe de pas |
| R | Rayon du plateau cyclique |
| K_p | Raideur de l'articulation en pas d'une pale |
| I_p | Moment d'inertie de la pale autour de l'axe de rotation du pas |
| H_{cc} | Energie potentielle équivalente au niveau du plateau, stockée dans les articulations en pas des pales |
| H_{ic} | Energie cinétique équivalente au niveau du plateau, stockée dans les moments d'inertie en pas des pales |

tab. IV-1 – Notations retenues pour la détermination de la charge équivalente

IV.1 Hypothèses :

- l'inclinaison en tangage θ_t du plateau est faible ;
- l'inclinaison en pas d'une pale θ_{pi} est faible (où i est l'indice de la pale considérée) ;
- La biellette associée de pas reste verticale (déplacement λ_{zi}) ;
- Les pièces constituantes du rotor et du plateau cyclique sont supposées indéformables et de masses négligeables devant le moment d'inertie d'une pale selon son axe de pas ;
- Les efforts n'engendrent donc pas de travail mécanique (l'axe de poussée des efforts aérodynamiques sur chaque pale étant très proche de couper l'axe de rotation en pas, le moment résultant est négligé).

IV.2 Raideur équivalente

On rappelle (voir fig. 1-20) que l'angle de pas de chaque pale est mu par l'intermédiaire d'une biellette, dite de pas, autour de la direction longitudinale de la pale. Cette rotation θ_{pi} se fait en parallèle d'une raideur K_p identique sur chaque pale. En supposant que la biellette reste verticale et que l'angle de pas est petit, ce dernier s'écrit (IV-1) :

$$\theta_{pi} = \frac{\lambda_{zi}}{b} \quad (IV-1)$$

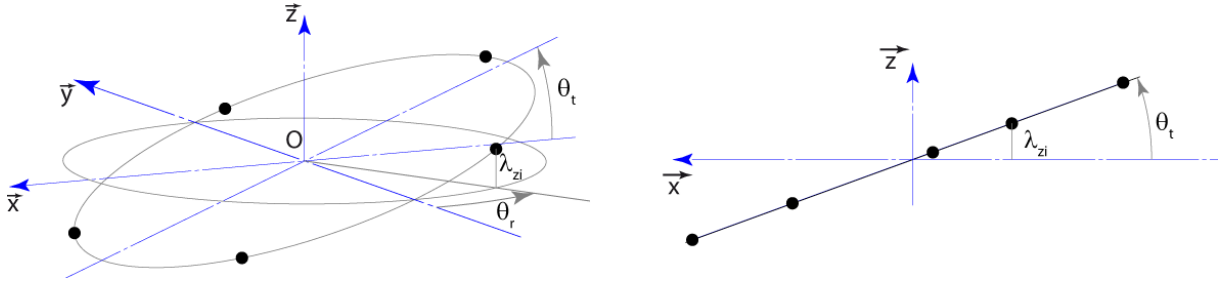


fig. IV-1 – Géométrie simplifiée d'un plateau cyclique

Avec :

$$\lambda_{zi} = R \cdot \sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) \cdot \tan \theta_t \approx R \theta_t \sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) \quad (IV-2)$$

Notons H_{cc} , l'énergie totale stockée dans les articulations de pas des 5 pales :

$$H_{cc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 K_p \theta_{pi}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 K_p \left(\frac{R}{b} \theta_t \sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right)\right)^2 \quad (IV-3)$$

Or :

$$\sum_{i=1}^5 \sin^2\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) = \frac{5}{2} \quad (IV-4)$$

D'où :

$$H_{cc} = \frac{1}{2} K_p \frac{5 R^2}{2 b^2} \theta_t^2 \quad (IV-5)$$

Et K_{eq} la raideur équivalente à la charge :

$$K_{eq} = K_p \frac{5 R^2}{2 b^2} \quad (IV-6)$$

IV.3 Inertie équivalente

De même, il est possible de déterminer H_{ic} l'énergie cinétique équivalente à la charge.

$$H_{ic} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 I_p \dot{\theta}_{pi}^2 \quad (IV-7)$$

Avec :

$$\dot{\theta}_{pi} = \dot{\theta}_t \frac{R}{b} \sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) + \theta_t \frac{R}{b} \dot{\theta}_r \cos\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) \quad (IV-8)$$

H_{ic} fera donc apparaître trois termes :

- l'un fonction de $\dot{\theta}_t^2$;
- le second fonction de $\dot{\theta}_r^2$, constant vis-à-vis de $\dot{\theta}_t$, qui n'influencera pas le comportement en tangage ;
- le troisième fonction de $\dot{\theta}_t \cdot \dot{\theta}_r$, et faisant apparaître le produit : $\sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) \cos\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right)$

Or :

$$\sum_{i=1}^5 \sin\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) \cos\left(\theta_r + \frac{2i\pi}{5}\right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 \sin\left(2 \cdot \theta_r + \frac{4i\pi}{5}\right) = 0 \quad (IV-9)$$

L'expression retenue pour H_{ic} , l'énergie cinétique équivalente, est :

$$H_{ic} = \frac{1}{2} \frac{5 R^2}{2 b^2} I_p \dot{\theta}_t^2 \quad (IV-10)$$

Et I_{eq} , l'inertie équivalente à la charge :

$$I_{eq} = \frac{5 R^2}{2 b^2} I_p \quad (IV-11)$$

Annexe V – Analyse d'un système d'assistance à la coupe portatif

V.1 Présentation

Le sécateur électroportatif de la société Pellenc, présenté fig. V-1, est autonome en énergie, multi-physique, en interactions avec son environnement (matière d'œuvre et utilisateur). Il se compose d'une batterie, d'une unité de commande et de puissance, d'un moteur électrique, d'un mécanisme actionnant une lame mobile, et d'une gâchette en interaction avec l'utilisateur. Cette dernière, détaillée fig. V-2 transmet la puissance de l'utilisateur à un écrou via un ressort de souplesse C_g .

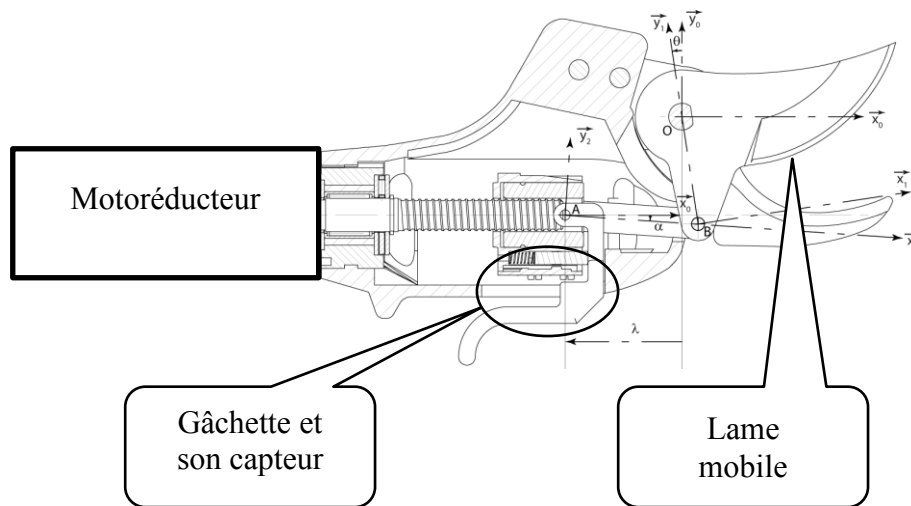


fig. V-1 – Présentation du sécateur assisté

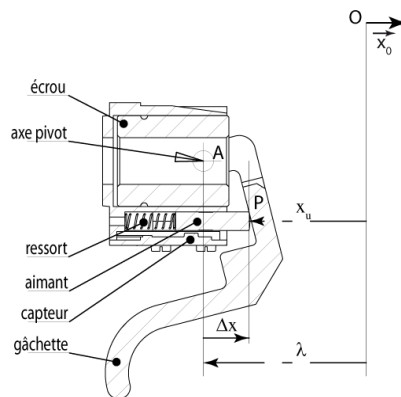


fig. V-2 – Détails de la gâchette

La translation λ de l'écrou, permet à une bielle de faire tourner la lame d'un angle θ . L'équation géométrique associée au modèle cinématique de la fig. V-3 est donnée (V-1), où a, b, c sont des paramètres dépendant de la géométrie du manipulateur. L'équation présente un comportement linéaire sur le domaine de fonctionnement, de gain $K_M = \frac{\dot{\theta}}{\dot{\lambda}} \cong 0.33$ (fig. V-4). Le

comportement global est composé de comportements élémentaires linéaires.
$$K_M = \frac{\dot{\theta}}{\dot{\lambda}} \cong 0.33$$

$$\lambda = b \sin(\theta) - \sqrt{b^2 \sin^2(\theta) + 2ab \cos(\theta) - b^2 + c^2 - a^2}. \quad (V-1)$$

$$\begin{aligned} \vec{OA} &= \lambda \vec{x}_0 - a \vec{y}_0, \\ AB &= c, OB = b \end{aligned}$$

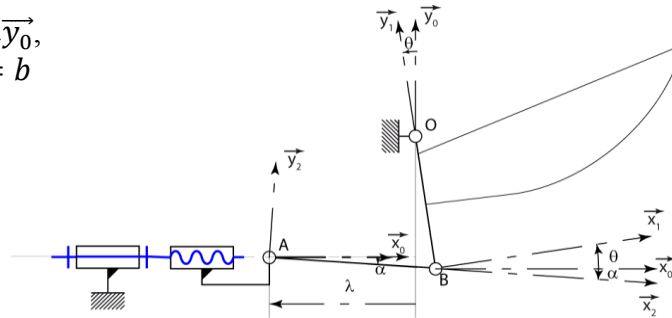


fig. V-3 schéma cinématique et paramétrage

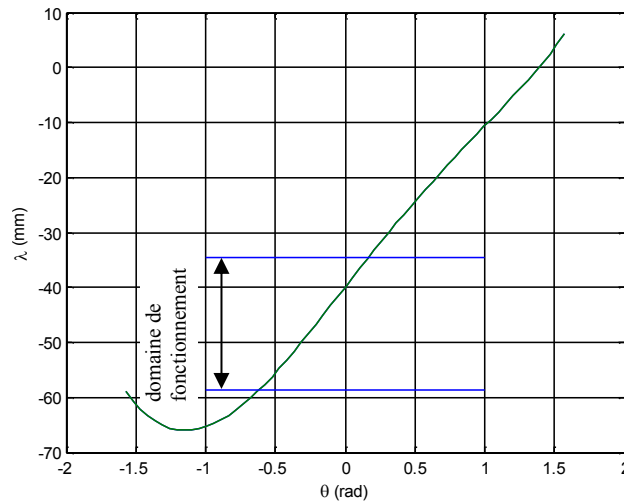


fig. V-4 Evolution de λ en fonction de θ

V.2 Analyse

A partir de la description faite précédemment, il est possible de représenter la chaîne physique (fig. V-5) liant l'utilisateur à la lame mobile, par l'intermédiaire du ressort de la gâchette et l'inertie équivalente m_t des pièces mécaniques. Une analyse de la chaîne d'information peut aussi être menée : le capteur mesure l'allongement q_g du ressort. La mesure est amplifiée selon une loi d'assistance a , générant une consigne en effort F_a pour l'organe d'assistance. Ici, l'actionneur est une machine synchrone à aimants permanents complétée d'une boucle en courant. Elle peut donc être assimilée à une source parfaite d'effort F_a . On retrouve alors fig. V-6 la structure d'assistance, présentée §3.5.3, permettant d'atteindre un comportement en multiplicateur de puissance ou *power scaling*. Le comportement équivalent de l'outil électroportatif d'assistance à la coupe est donné fig. V-7.

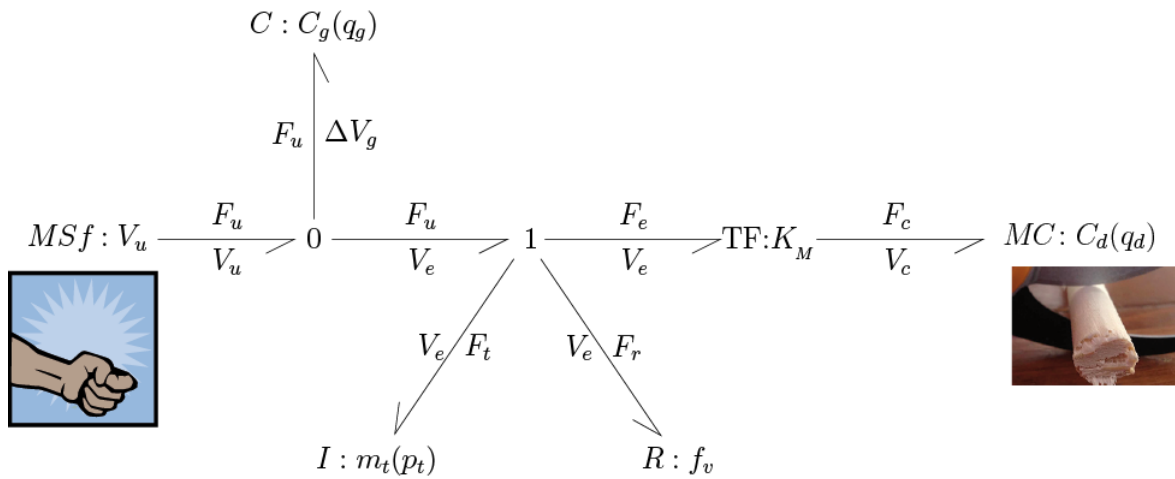


fig. V-5 – Représentation bond-graph de la chaîne physique du sécateur

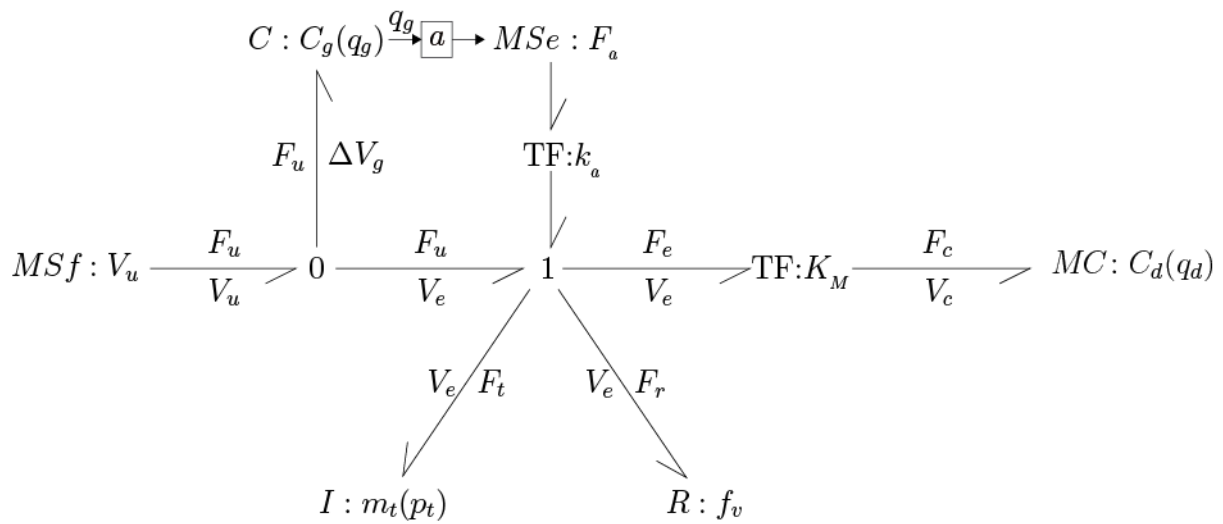


fig. V-6 – Représentation cyber-physique du sécateur

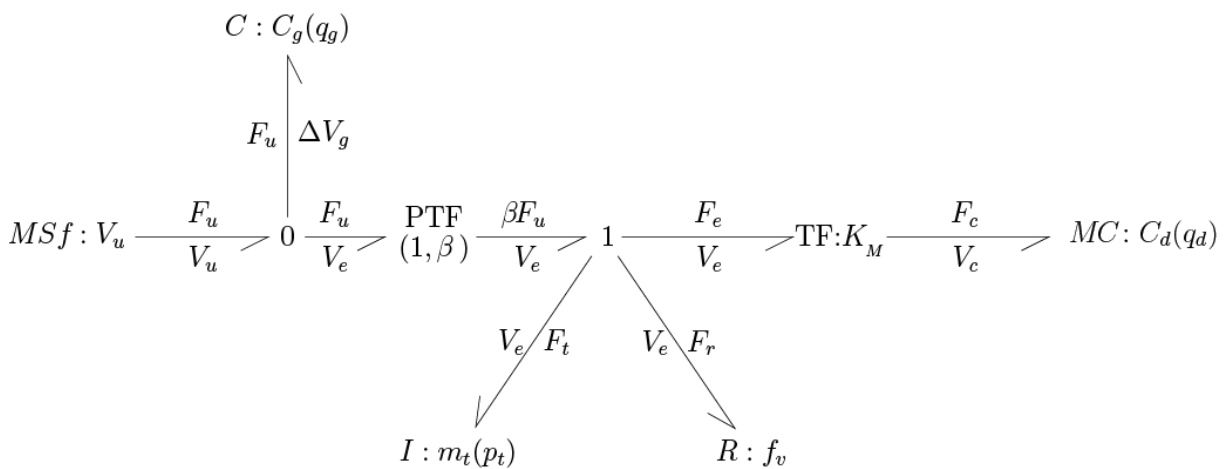


fig. V-7 – Représentation du comportement équivalent au sécateur assisté

APPROCHE ENERGETIQUE POUR LA REPRESENTATION, LA STRUCTURATION ET LA SYNTHESE DES SYSTEMES D'ASSISTANCE A OPERATEUR : APPLICATION AUX CHAINES DE COMMANDE DE VOL D'HELICOPTERE

RESUME : Un aéronef à voilure tournante est un système physique dynamique complexe. Le développement de ce type de système nécessite méthodes d'analyse (structurale et comportementale) et de commande afin de maîtriser ses comportements. L'approche énergétique (bond graph et formalisme hamiltonien à port) permet une représentation multi-physique non linéaire, modulaire (acausale) et à différents niveaux de granularité. Parmi ses organes, les commandes de vol de l'aéronef permettent la transmission du pilotage aux rotors : canaliser la puissance motrice (2 MW) à partir d'une commande manuelle est impossible sans organes actifs d'assistance. Afin de représenter les cheminements et traitements des informations nécessaires aux organes actifs, la représentation multi-physique est complétée par une représentation informationnelle causale (schéma bloc).

Les travaux exposés dans ce mémoire visent à ajouter le niveau de granularité intermédiaire et nécessaire entre la représentation multi-physique pure et une représentation combinée physique et informationnelle. Basée sur la démarche du PMBC (*Physical Model Based Control*), ils proposent une méthode originale permettant de représenter les organes d'assistance et leur commande par un modèle physique équivalent. La méthode est ici enrichie dans une démarche de conception des Systèmes d'Assistance à Opérateur : nous déterminons où doivent agir les organes actifs, selon quelles mesures et suivant quelles lois de commande. La méthode est illustrée sur un cas d'étude industriel : nous obtenons deux représentations de l'espace des solutions (les représentations physico-informationnelle détaillée et globale de son comportement) incluant la solution industrielle actuelle.

Mots clés : Comportement, Hamiltonien, Multi-physique, Non linéaire, Représentation graphique multi-niveau, Assistance, Transparence, Conception, Synthèse, Hélicoptère.

ENERGETIC FRAMEWORK FOR REPRESENTATION, STRUCTURATION AND SYNTHESIS OF OPERATOR ASSISTING SYSTEMS: CASE OF HELICOPTERS' FLIGHT CONTROL

ABSTRACT : A rotorcraft is a complex dynamic physical system. The structural analysis and closed-loop control design of this kind of systems requires tailored methods. The energetic framework (bond graph and Hamiltonian formulation) provides a multiphysical nonlinear representation, which is modular and exhibits several levels of granularity. Among its components, flight controls transmit orders from the pilot to rotors. Generating the power required to move the rotors (about 2MW) from a control stick is impossible without active devices for assistance. In order to represent the flow of the control information and its processing, a cyberphysical representation combines a multiphysical model with an informational representation (bloc diagram). This thesis work aims at proposing an intermediate granularity level between purely multiphysical representations and cyberphysical representations. Based on the PMBC (*Physical Model Based Control*) approach, a new method to represent the assistance parts is proposed, by means of a physical equivalent model. The method is then enriched by a genuine design procedure of an Operator Assisting System: we determine where actuators must operate, according to which control laws and from which measurements. The method is applied to an industrial case: two representations of the possible design solutions set are obtained, a detailed cyberphysical representation and a global representation of its behavior. The current industrial solution belongs to the defined set of possible solutions.

Keywords : Behavior, Hamiltonian, Multiphysics, Nonlinear, Multilevel graphical representation, Assistance, Transparency, Design, Control system synthesis, rotorcraft