

L'hélicoptère en première analyse

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de la chaire industrielle "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes" de la fondation d'entreprise EADS. Les systèmes considérés pour ces travaux, sont les systèmes à voitures tournantes, plus précisément les hélicoptères. La première partie de ce chapitre présente une première analyse du fonctionnement de l'hélicoptère basée sur la littérature classique. La deuxième partie de ce chapitre précise le contexte technologique de la chaire, principalement autour des hélicoptères, et présente la démarche employée pour aborder les objectifs fixés. La troisième partie positionne les travaux de thèse par rapport à ce projet tout en exposant leurs contexte et objectifs.

I.1. L'hélicoptère en première analyse

La modélisation est une étape indispensable pour l'analyse de tout système. La première étape de modélisation consiste en la détermination des variables pertinentes d'entrée et de sortie pour la caractérisation du système considéré. La deuxième étape consiste en la détermination des relations entre ces variables en se basant sur les concepts fondamentaux de la physique. La phase de modélisation n'est pas évidente pour un système complexe tel que l'hélicoptère, notamment lorsqu'il s'agit de représenter le système dans sa globalité. Elle présente une difficulté importante liée au nombre important des variables caractéristiques et aux forts couplages existants entre sous-systèmes.

Dans cette étude, nous proposons une brève description du fonctionnement de l'hélicoptère exposant les principaux sous-systèmes et leurs interactions, ainsi que les variables d'entrée/sortie.

Cette première partie a pour objectif de présenter le fonctionnement de l'hélicoptère sur la base de descriptions classiques issues de la littérature. Ces descriptions s'intéressent généralement aux fonctions principales des différents éléments constitutifs de l'hélicoptère. Une première réflexion simple est donc menée sans préoccupation de méthode particulière.

Des questions essentielles se posent alors :

- Quelles sont les entrées du système ?
- Quelles sont les sorties du système ?
- Quels sont les principaux éléments constituant l'hélicoptère ?

S'agissant d'un système comportant a priori plusieurs entrées et plusieurs sorties de différentes natures, la réponse à ces questions n'est pas évidente. Dans le cas présent d'application, il n'existe pas de réponse unique à ces questions. Cela dépend de la vision que l'on souhaite du système et donc des objectifs de l'analyse que l'on souhaite mener.

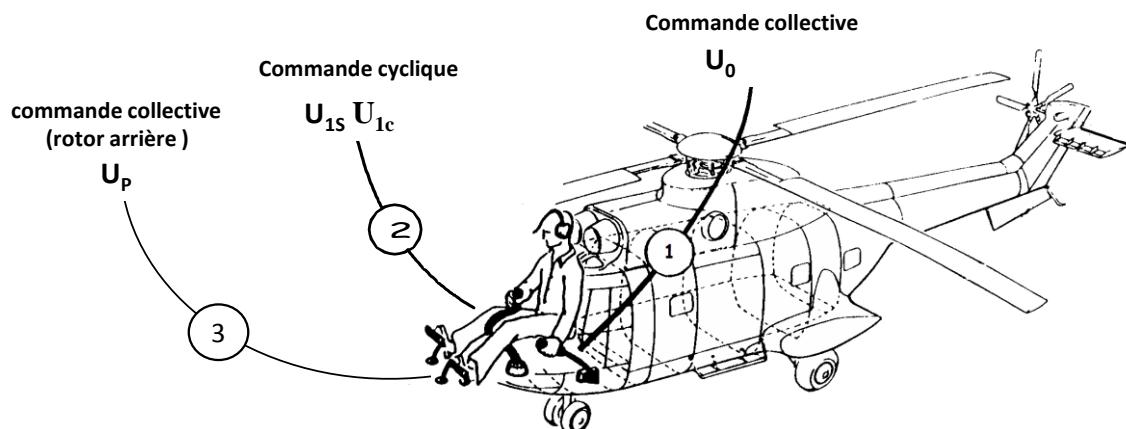


Figure I.1 - Actions du pilote sur les commandes de vol [Krysinski - 2011]

Dans le cadre de la mécanique du vol, par exemple, le point de vue que nous souhaitons avoir est celui du pilotage. Dans ce cas on considère les commandes de vol, c'est-à-dire les positions des instruments de pilotage tels que les manches ou palonniers, comme des entrées, et les attitudes de l'hélicoptère comme des sorties.

En première analyse, les principaux éléments constituant l'hélicoptère sont :

- les chaînes de commande ;
- les plateaux de commande du rotor principal et du rotor arrière ;
- les rotors principal et arrière ;
- le fuselage ;

- la motorisation avec son système de régulation ;
- l'environnement aérodynamique ;
- le pilote.

Le fonctionnement de ces différents sous-systèmes et leurs interactions peuvent être résumés en quelques points illustrés par la Figure I.2 [Krysinski - 2011 ; Lefort - 1975 ; Raletz - 1990]. Les actions du pilote sur les commandes de vol, correspondent aux entrées du système (Figure I.1). Ces actions permettent le déplacement des plateaux de commande à travers la chaîne de commande de la manière suivante :

- L'action du pilote sur le manche collectif (U_0) provoque le coulisser du plateau et par conséquent impose, par l'intermédiaire de bielles, une variation collective, simultanée, du pas de toutes les pales. L'objectif est de faire varier l'incidence moyenne de l'ensemble des pales afin de contrôler l'intensité de l'effort de portance développé par le rotor principal.
- L'action du pilote sur le manche cyclique (U_{1s} et U_{1c}) provoque l'oscillation du plateau, autour d'une position moyenne correspondant à la commande de pas collectif et par conséquent impose, par l'intermédiaire des bielles, une variation cyclique du pas de toutes les pales. L'objectif est de faire varier l'incidence des pales à une fréquence correspondant à la fréquence de rotation de manière à contrôler l'inclinaison, par rapport au fuselage, de l'effort de portance du rotor principal.
- L'action du pilote sur les palonniers (U_p) met en translation le plateau du rotor arrière qui permet de commander le pas collectif des pales par l'intermédiaire de bielles. Ainsi, les palonniers permettent de faire varier l'effort développé par le rotor de queue, et par conséquent de contrôler l'appareil autour de son axe lacet.

L'action du couple (C_m) développé par le moteur met en rotation le moyeu du rotor principal. Suivant les phases de vol, l'hélicoptère a besoin de plus ou moins d'énergie. Sur les hélicoptères, contrairement aux avions à hélices, le rotor est régulé en vitesse à une vitesse nominale (NR). Le couple résistant variant en fonction du pas des pales, le système de régulation réinjecte plus ou moins de carburant pour conserver une vitesse de rotation constante.

L'ensemble de ces actions génère des efforts aérodynamiques qui peuvent donc être variables et pilotés. Le rotor principal développe un effort de portance global F_{RP} et génère sur le fuselage un couple de réaction résultant des efforts de trainées, noté

C_{RP} . Le principe est le même pour le rotor arrière qui développe un effort F_{RA} à l'extrémité de la queue de l'hélicoptère afin de compenser le couple de réaction du rotor principal et de contrôler l'angle de lacet de l'appareil.

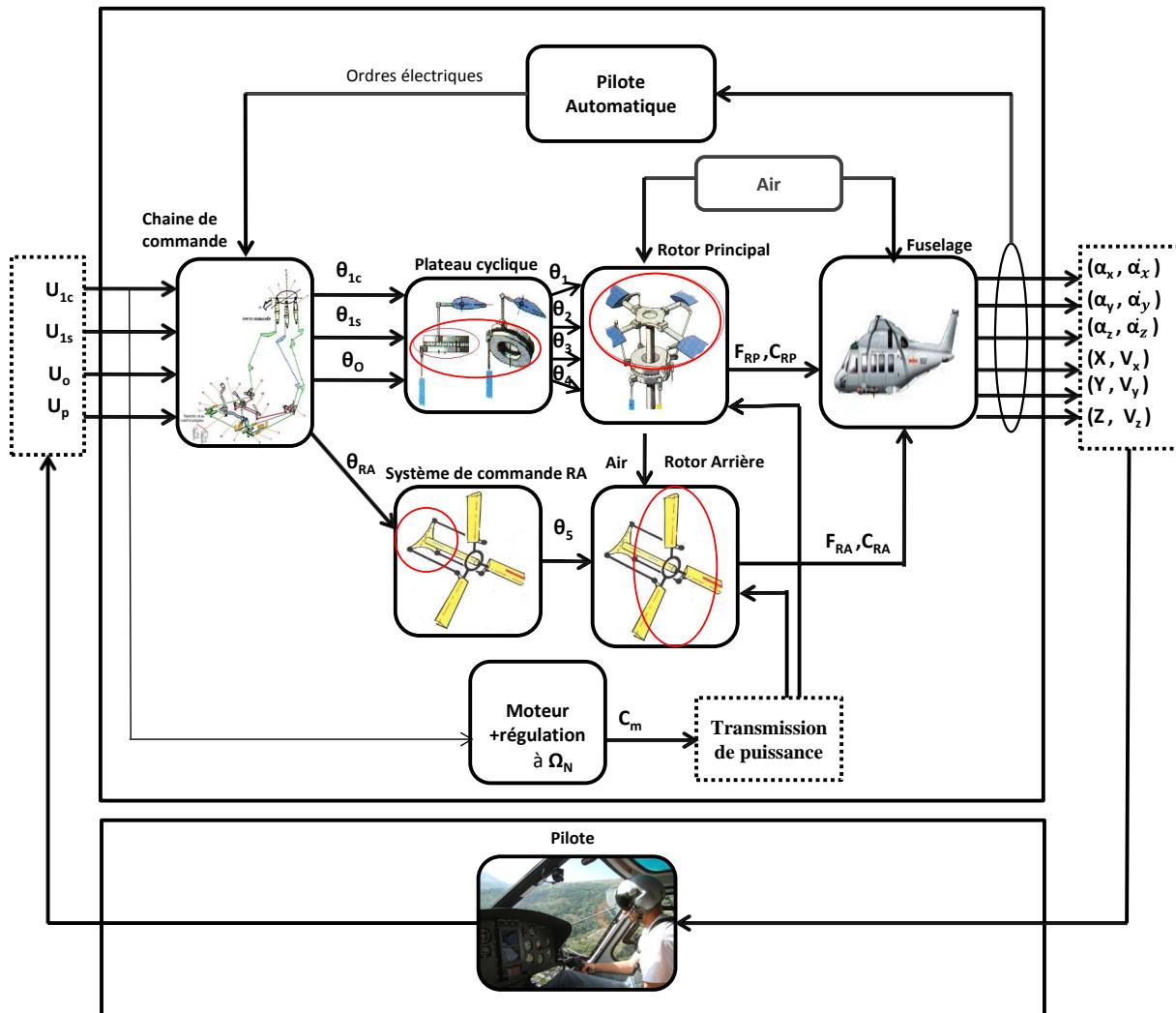


Figure I.2 - Description schématique d'un hélicoptère en première analyse

Les différentes actions fournies par les rotors agissent sur le fuselage permettent ainsi le vol de l'hélicoptère. Les différentes attitudes de l'hélicoptère sont considérées comme des sorties :

- α_x , α_y et α_z sont les rotations de l'appareil respectivement autour des axes de roulis (latéral), de tangage (longitudinal) et de lacet (vertical) ;
- Z est l'altitude de l'hélicoptère et V_z , sa vitesse verticale ;
- X est la position longitudinale (avancement) de l'hélicoptère et V_x , sa vitesse d'avance longitudinale ;
- Y est la position latérale de l'hélicoptère et V_y , sa vitesse latérale.

Le pilote capte des informations sur l'attitude de l'appareil et, selon le besoin, agit sur les commandes pour la modifier. En parallèle et/ou à la place du pilote, un pilote automatique (PA) peut également agir sur la chaîne de commande en fonction d'une consigne et de données issues de mesures (attitude de l'hélicoptère).

Cette première analyse offre une aide à la compréhension globale du fonctionnement de l'hélicoptère. Cependant, cette étude n'est pas exhaustive car elle ne représente que la fonction principale des différents sous-systèmes et ne donne qu'une vue partielle de leurs interactions. De plus, les variables d'entrée et de sortie des différents éléments sont de natures différentes (positions, couples, vitesses, "ordres électriques", etc.), et le cheminement de l'énergie au sein du système ne peut être suivi. L'idée de cette première analyse, est de montrer qu'une étude menée sans méthode particulière peut conduire à un résultat peu exploitable.

C'est dans cette optique que la chaire industrielle a été définie, visant à proposer de nouvelles approches en termes de méthodes et d'outils en vue d'étudier et analyser des systèmes soumis à d'importants effets dynamiques, tels que les hélicoptères. Les parties suivantes de ce chapitre permettent de préciser le contexte industriel et scientifique de la chaire autour de deux principaux thèmes en application à l'hélicoptère, et en conséquence de préciser le contexte et les objectifs de cette thèse.

I.2. Chaire "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes"

Les activités de recherche de la chaire sont centrées sur la maîtrise dynamique des systèmes mécaniques complexes avec les hélicoptères comme application principale. Par "maîtrise dynamique", nous entendons la mise en place de méthodes permettant de maîtriser des comportements non souhaités (instabilités ou vibrations) ou des comportements souhaités (suivi de trajectoire, retour d'effort).

Plusieurs définitions existent pour décrire ce qui peut être un système complexe. L'application considérée étant ici l'hélicoptère, nous considérons le sens mécatronique de ce terme. La complexité peut alors être liée à plusieurs critères :

- la multiplicité de sous-systèmes en forte interaction, la connaissance et l'analyse de ces différents sous-systèmes étant généralement entendues sans les interactions ;

-
- l'aspect multiphysique du système, conduisant à la nécessité de compétences multidisciplinaires et le recours à des modélisations multiples ;
 - la présence de comportements difficiles à appréhender tels que des non-linéarités, des frottements ou encore des jeux mécaniques ;
 - l'existence de plusieurs phases de fonctionnement du système (dans le cas des hélicoptères : au sol, en vol stationnaire, en vol d'avancement, ...).

Les hélicoptères sont concernés par l'ensemble de ces différents points, ce qui en fait des systèmes complexes dont l'analyse globale est difficile. La chaire industrielle "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes" a été lancée en 2010, afin d'étudier les méthodologies de modélisation énergétique, principalement en application à l'hélicoptère pour :

- permettre de considérer le système dans sa globalité tout en accédant à des niveaux de modélisation plus détaillés en fonction du besoin ;
- permettre l'analyse de phénomènes impliquant des échanges d'énergie entre sous-systèmes ;
- faciliter les interconnexions entre modèles en conservant les liens d'énergie ;
- faciliter la définition de structures de commande adaptées au système (et aux sous-systèmes) à partir des modèles obtenus.

I.2.1. Principaux thèmes de la chaire industrielle

Les problèmes d'analyse des hélicoptères évoqués précédemment conduisent aux deux principaux thèmes choisis pour cette chaire industrielle.

- **Premier thème** : Développement de liaisons inter-structures intelligentes (actives ou semi-actives).

Pour les structures complexes composées de plusieurs sous-systèmes, se pose le problème, vis-à-vis des comportements dynamiques, de la définition de la liaison entre sous-ensembles. Dans les hélicoptères de nombreuses liaisons peuvent être citées telles que l'interface rotor-fuselage, la liaison au sol (train d'atterrissement), les liaisons pales-moyeu, la liaison siège-pilote ou encore la liaison poutre de queue-fuselage. Ces liaisons ont un rôle dans la transmission des vibrations et peuvent quelques fois intervenir dans les phénomènes de couplage entre sous-systèmes. Les phénomènes induits sont souvent évités par des méthodes passives mettant en œuvre des raideurs localisées ou des éléments de dissipation. Les liaisons intelligentes basées sur des méthodes de contrôle actif peuvent agir en isolation (i.e. réduire les vibrations "passant" entre les structures porteuses) et en stabilisation (i.e.

augmenter l'amortissement) pour pallier l'insuffisance des performances des méthodes passives. Pour des structures complexes telles que celles des hélicoptères, le comportement dynamique est difficile à appréhender et la mise en œuvre de liaisons intelligentes devient ardue.

Les actions de recherche dans le périmètre de la mécatronique en application au contrôle actif des systèmes complexes ou à la maîtrise de leur comportement dynamique se focalisent habituellement sur les points suivants :

- le développement des actionneurs (électriques, matériaux intelligents, électromagnétiques, hybrides...) ;
- le développement d'algorithmes de commande (commandes classiques ou commandes avancées) ;
- la modélisation de structures à non linéarités localisées (proposition de modèles de non linéarités et traitements mathématiques associés) ;
- la modélisation de l'adjonction de systèmes par sous-structuration dynamique ;
- l'identification et l'utilisation de modèles inverses pour la détermination de paramètres de lois de comportement en dynamique et l'actualisation de modélisations à partir de grandeurs dynamiques mesurées.

L'expérience montre que ces actions disjointes, souvent menées de façon séparée, sont essentielles et performantes mais insuffisantes pour rendre optimale la conception de liaisons inter-structures intelligentes pour les structures complexes telles que les hélicoptères, notamment en raison des points suivants :

- Généralement, on se contente d'une considération simplifiée de la structure avec adjonction d'une loi de commande. Par exemple, les modèles les plus détaillés (i.e. éléments finis) sont évités pour la détermination des lois de contrôle, le temps de calcul serait trop long. On procède alors à une simplification implicite des modèles en considérant le comportement global des systèmes au travers de relations entrées/sorties (système d'état ou fonction de transfert). Les stratégies de simplification sont basées sur l'expérience du produit ou sur des considérations mathématiques visant à réduire l'ordre des modèles ou à les linéariser. L'absence d'approche systémique et d'outil d'analyse peut facilement conduire à une perte du sens physique et à des solutions, des architectures de commande, peu efficaces, non optimales ;

-
- Face à la complexité, il peut être fait appel à une modélisation de type "boîte noire" essentiellement basée sur des techniques d'identification telles que analyse modale ou des techniques d'identification sous effort ambiant. La complexité de la structure étudiée impose de nombreuses étapes d'identification et de synthèse de commande qui peuvent être longues et fastidieuses. Ces techniques ne sont pas satisfaisantes pour ce cas d'application.

Il existe un certain nombre de systèmes actifs opérationnels sur les hélicoptères. Ceux-ci utilisent des méthodes par contre réaction, souvent associées à une problématique mono-fréquence, sans optimisation de l'architecture de la commande, ni optimisation énergétique. Les solutions sont ponctuelles, c'est-à-dire au cas par cas, associées à une problématique souvent unique et ne résultant pas d'une approche globale et méthodologique. Ces solutions ne permettent pas de capitalisation de connaissances sur les méthodes de résolution des problèmes.

- *Deuxième thème* : Optimisation de la chaîne de commande de vol (du pilote aux rotors).

La chaîne de commande a pour fonctions principales de convertir les ordres du pilote en variation d'incidence des pales du rotor principal ou arrière et d'y superposer les commandes du pilote automatique pour fournir une assistance au pilotage.

La chaîne actuelle est constituée d'actionneurs et d'organes de technologies très différentes : système mécanique (Trim), électrique (vérin série), hydraulique (servocommande) à architecture série ou parallèle. L'objectif pour les hélicoptéristes est aujourd'hui d'augmenter les performances dynamiques de la chaîne de commande et d'améliorer ou faire évoluer les fonctions qui y sont associées. La tendance est d'introduire des technologies innovantes et d'aller vers le Fly-By-Wire (FBW) et le Power-By-Wire (PBW) en analogie avec l'avion. Une première expérience de la mise en œuvre du FBW sur le NH90 a montré toute la complexité de l'application des technologies électriques sur l'hélicoptère. La complexité de l'application est ici induite par l'aspect multifonction et multiphysique (mécanique, électrique, hydraulique) de la chaîne de commande. Le défi du tout électrique est cependant plus compliqué sur un hélicoptère que sur un avion : les performances dynamiques nécessaires sont plus élevées, l'encombrement disponible pour les actionneurs est très réduit et le gain potentiel sur la masse est beaucoup moins important que sur un avion. De plus, la fiabilité souhaitée est plus grande car la perte

d'un élément de la chaîne de commande sur un hélicoptère est considérée comme catastrophique alors qu'elle n'est considérée que comme critique sur un avion.

La définition des éléments de l'assistance au pilotage et du pilote automatique doit tenir compte du comportement complexe de la structure et d'interactions toujours difficiles à appréhender, telles que celles entre l'être humain et l'hélicoptère à l'origine de phénomènes de couplage connus sous le nom de "Pilote-Induced Oscillations" ou plus récemment de "Rotorcraft Pilot Couplings".

Les actions de recherche dans le périmètre de la mécatronique en application à la chaîne de commande se focalisent sur les points suivants :

- la modélisation et la conception des actionneurs électromécaniques des commandes de vol électriques pour répondre aux fonctions souhaitées ;
- la définition et l'optimisation de lois de commande (classiques ou avancées).

L'expérience montre, malgré cela, que pour l'application qui nous concerne :

- les composants technologiques sont définis séparément ;
- il y a des difficultés technologiques à regrouper les fonctions sur un même composant ;
- il y a peu ou pas d'optimisation énergétique ;
- il n'y a pas de vue énergétique d'ensemble, et de ce fait, il n'est pas garanti que les architectures de commande soient optimales.

I.2.2. Objectifs de la chaire

Les activités de recherche de la chaire ont pour objectifs de lever certains verrous scientifiques sur les deux thèmes définis précédemment.

En ce qui concerne le premier thème sur les liaisons intelligentes, les objectifs sont de :

- faciliter le développement de dispositifs actifs plus performants par une meilleure analyse et une meilleure intégration des interactions ainsi que par l'optimisation de leur architecture de commande ;
- proposer une méthodologie permettant une optimisation énergétique, l'introduction facilitée de technologies d'actionneurs plus performantes et innovantes et la possibilité d'optimiser les actionneurs (voire la structure).

En ce qui concerne le deuxième thème de l'optimisation de la chaîne de commande de vol, les objectifs sont :

- d'avoir un outil de réflexion sur l'architecture de la chaîne de commande en intégrant les différentes interactions (pilote-fuselage-chaîne de commande) ;
- de proposer une méthodologie permettant le regroupement des fonctions et de favoriser l'introduction de technologies d'actionneurs plus performantes et innovantes.

Pour lever ces verrous, un premier objectif est de proposer une approche de représentation énergétique qui soit la plus complète possible. Cette dernière permettrait de considérer le système dans sa globalité, en prenant en compte les interactions entre ses diverses composantes. L'obtention d'une telle approche globale facilitera la définition de structures de commande et l'intégration ou la modification d'éléments (actionneurs) pour plus de performance et d'innovation.

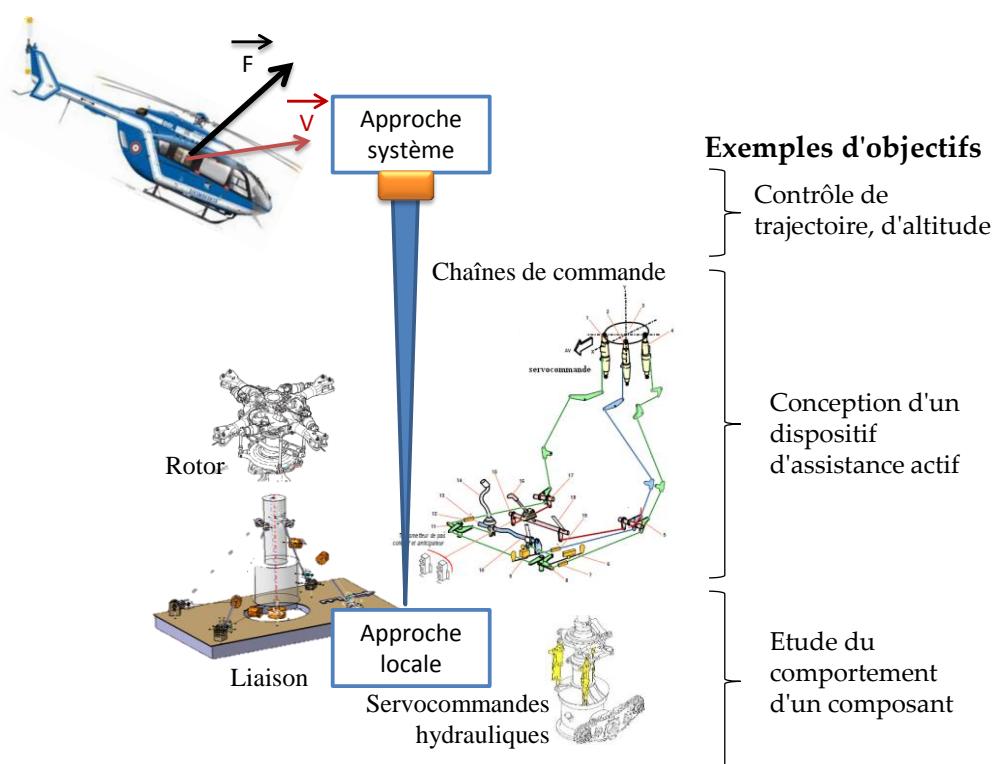


Figure I.3 - Niveaux de résolution et objectifs d'étude

Dans l'idéal nous souhaitons avoir plusieurs visions pour permettre plusieurs niveaux de résolution pour des objectifs d'études différents (Figure I.3) :

- des visions globales, macroscopiques pour l'étude de la dynamique du vol, du contrôle d'attitude, de trajectoire, etc ;

- des visions "intermédiaires" pour l'étude des chaînes de commande, du rotor, etc ;
- des visions locales détaillées, jusqu'au composant, pour l'étude d'éléments de liaisons, de la dynamique vibratoire d'un élément spécifique, etc.

I.2.3. Démarche choisie

A partir de ces objectifs, deux principaux axes d'étude ont été définis :

Axe 1 : D'une vision macroscopique aux sous-systèmes

Dans le premier axe d'étude, l'objectif est de proposer une approche de représentation permettant de passer d'un besoin global à l'intégration du comportement des composants (en approche locale). L'application support choisie pour cet axe est le domaine de la mécanique de vol.

Axe 2 : Du sous-système au modèle global

Dans le deuxième axe d'étude, l'objectif est de proposer une approche de représentation permettant de passer d'un sous-système (approche locale) à l'intégration de plus en plus de sous-systèmes, jusqu'à atteindre la représentation du comportement global de l'hélicoptère du premier axe. Le domaine de la dynamique vibratoire est choisi pour cet axe et les liaisons intelligentes présentes dans l'hélicoptère sont considérées comme des supports d'application.

I.3. Contexte et objectifs de la thèse

Les travaux de cette thèse constituent les premiers travaux menés dans le cadre de la chaire industrielle. Ils se positionnent au niveau du premier axe, "d'une vision macroscopique aux sous-systèmes", dans le domaine de la mécanique de vol.

Pour répondre aux objectifs évoqués précédemment d'une approche de représentation énergétique qui permettrait de considérer l'hélicoptère dans sa globalité, plusieurs phases d'étude ont été fixées. Ces études sont nécessaires dans le cadre des premiers travaux de la chaire et concernent à la fois l'application (hélicoptère) et la méthode à utiliser.

Une première phase consiste à rechercher les pratiques de modélisation existantes pour les hélicoptères et à proposer une synthèse des activités de recherche actuelles autour de cette application.

Une deuxième phase consiste à rechercher les outils et les méthodes qui permettraient d'offrir ce type de représentation.

Une troisième phase consiste à étudier le potentiel des outils et méthodes retenus en application à l'hélicoptère, et pour des problématiques de dynamique du vol.

I.3.1. Hélicoptères et activités de recherche

Il existe plusieurs types d'hélicoptères, dont nous proposons, en Figure I.4, une classification en fonction de leur utilisation et de leur approche de conception.

- Les appareils de modélisme, sont conçus pour des applications ludiques. Pour leur conception, les constructeurs se basent sur le savoir-faire métier et les règles de l'art (Exemple : puissance, taille rotor, vitesse de rotation).
- Une partie des drones (mini et micro) et les Ultra-léger motorisé (ULM), sont conçus pour des missions de sécurité civile ou militaires. Comme pour la catégorie modélisme, les constructeurs profitent du savoir-faire métier et des règles de l'art pour la conception de ce type d'appareils. Ils utilisent, une approche de conception par similitude ou par retours d'expériences.
- La deuxième partie est constituée des drones (High Altitude Long Endurance "HALE" et Medium Altitude Long Endurance "MALE") et des hélicoptères des petits industriels. Les constructeurs de ce type d'appareils sont quelques fois des industriels issus des grands industriels hélicoptéristes. D'une façon générale, ils bénéficient de leur expérience et se basent sur une approche par similitude pour la conception de petits appareils. L'utilisation de prototypes est l'outil principal de mise au point de leurs produits.
- Les hélicoptères des grands industriels hélicoptéristes correspondent généralement à des appareils plus lourds et sont utilisés pour des missions civiles et militaires. Parmi les principaux hélicoptéristes industriels, on retrouve Eurocopter, Bell, Agusta et Sikorski. Ces derniers se basent sur une longue expérience, souvent de plus d'une cinquantaine d'années, et une approche de conception qui peut être qualifiée d'approche par sous-systèmes. Il s'agit d'une méthode consistant à concevoir de manière plus ou moins indépendante chaque sous-système, réalisant une ou plusieurs fonctions spécifiques.

Les hélicoptères des grands industriels	Les hélicoptères des petits industriels	Les ULM	Les drones	Modélisme
<p>Eurocopter</p>  <p>Bell</p> <p>Agusta</p> <p>Sikorsky</p>	<p>Guimbal</p>  <p>Dynali</p>  <p>Robinson</p> 	<p>Classe VI</p> 	<p>HALE</p>  <p>MALE</p>  <p>Mini</p>  <p>Micro</p> 	 

Figure I.4 - Classifications des hélicoptères

Dans la littérature, il existe un grand nombre de travaux autour de la modélisation dynamique des hélicoptères de la catégorie des drones. Dans ce cadre, les travaux de recherche sont généralement centrés sur la commande et sur la robustesse du système :

- Dans [Martini - 2008], l'auteur présente deux types de modèles pour des drones. Un premier modèle non linéaire à 7 degrés de liberté (DDL) destiné à être appliqué au vol libre autonome d'un hélicoptère drone (type Vario Benzin Trainer). Le septième DDL correspond à l'angle de rotation du rotor. Ce modèle, permet une bonne considération des effets aérodynamiques. Ensuite, il propose un deuxième modèle Lagrangien non-linéaire perturbé (par une rafale de vent) à 3-DDL. Ce dernier a été monté sur une plateforme expérimentale permettant le mouvement de translation en altitude et la rotation en lacet. Le dernier degré de liberté, comme pour le modèle précédent, correspond à la rotation du rotor. Finalement, sur la base de ces deux modèles, l'auteur propose et met au point par simulation plusieurs méthodes de contrôle du drone. Par exemple pour le modèle à 3 DDL, il en propose quatre : une commande par un retour non linéaire, une commande linéarisante robuste (RNFC), une commande active de rejet de perturbation (ADRC) et une commande Backstepping (BACK). La robustesse de ces

contrôleurs vis-à-vis des incertitudes de modélisation et des perturbations est ensuite étudiée.

- Dans [Schafroth - 2010], les auteurs présentent une approche de modélisation assez complète d'un micro-hélicoptère coaxial. Ils proposent au départ un modèle non-linéaire de l'hélicoptère. Ensuite, ils établissent une identification des paramètres et proposent au final un processus de conception d'une commande H-infini.
- Dans [Marconi - 2007], les auteurs présentent au début un modèle d'un hélicoptère miniature basé sur les équations de Newton Euler et considérant l'hélicoptère comme un corps rigide. A partir de ce modèle, les auteurs proposent la conception d'un contrôleur non-linéaire qui prend en compte les incertitudes caractérisant les paramètres physiques et aérodynamiques du système.

Il existe encore un nombre important de travaux focalisés sur la modélisation et la commande des drones. Nous n'avons pas retenu ces cas d'application et ce type de modélisation : celle-ci correspond à une modélisation type "boîte noire" ou à une approche simplifiée pour laquelle l'hélicoptère est généralement considéré comme une unique masse rigide soumise à des efforts aérodynamiques représentés par un torseur équivalent. La commande associée est généralement basée sur les approches de contrôle classiques nécessitant un lourd développement mathématique. Pour conclure, ce type de modélisation peut être qualifié de modélisation globale, et la méthode de contrôle associée, de commande globale. Ces méthodes ne peuvent s'appliquer sur les hélicoptères des grands industriels que pour les aspects liés au suivi de trajectoire. De constitution beaucoup plus complexe, la modélisation de ces appareils nécessite la prise en compte des fortes interactions entre les sous-systèmes qui le composent.

Les différents types d'hélicoptères (drones, hélicoptères des petits et des grands industriels), sont sources de phénomènes dynamiques difficiles à maîtriser qui peuvent être récurrents. Les petits industriels investissent beaucoup dans l'expérimentation pour la conception de leurs produits. Quant aux grands industriels, la modélisation et la conception de leurs produits sont basées sur plusieurs années d'expérience à optimiser le produit. Ils investissent ainsi au long des années dans le développement de logiciels de simulation spécifiques et dans des activités de recherche dédiées à l'étude des phénomènes de couplage industriellement récurrents. Ces phénomènes sont essentiellement liés aux couplages souvent mal maîtrisés entre sous-systèmes tels que le couplage entre l'air, la

structure et le système de commande ou encore le couplage entre la structure et le rotor. Parmi les phénomènes les plus connus on trouve le "Pilot Induced Oscillation (PIO)" ou le "Rotorcraft Pilot Coupling (RPC)", la "Résonnance Air (RA)" et la "Résonnance Sol (RS)". Pour remédier à ces problèmes, les solutions apportées sont ponctuelles. Lorsqu'un hélicoptère est conçu, des essais en vol sont réalisés en fin de développement pour tester le produit. Lors de ces essais, des problèmes (PIO, RA, RS...) peuvent apparaître et dans ce cas les solutions apportées sont adaptées à chaque modèle d'hélicoptère. Ces solutions peuvent être qualifiées de "patchs" car elles consistent en un ajout d'éléments spécifiques pour apporter une solution locale à chaque problème constaté, sans systématiquement mener un raisonnement global qui pourrait mettre en évidence des solutions plus optimales du point de vue énergétique comme de celui du nombre d'éléments mis en œuvre. Ceci conduit à l'augmentation du nombre d'éléments dans le système. Nous citons quelques exemples de ce type de solutions :

- l'adaptation des lois de pilotage ;
- l'introduction de vérins de stabilisation, d'amortisseurs, de systèmes antivibratoires, de filtres, etc.

Avec un raisonnement plus global, nous pourrions par exemple envisager d'apporter des solutions basées sur l'utilisation d'éléments préexistants.

L'hélicoptère de la catégorie "grand constructeur" est un système assez complexe, pour diverses raisons mentionnées précédemment (I.2). De plus, il est composé d'une structure tournante et d'une structure porteuse. La portance permettant le vol de l'appareil est obtenue par l'intermédiaire des efforts aérodynamiques sur les pales du rotor principal et arrière ainsi que, de façon mineure, sur les plans fixes. Le pilote contrôle et manipule cette portance à travers une chaîne de commande afin de produire un déplacement de l'appareil dans toutes les directions.

La Figure I.5 illustre la complexité de l'hélicoptère en soulignant une superposition de différents comportements (aérodynamique, mécanique, hydraulique, électrique, ...) et les interactions entre plusieurs sous-systèmes.

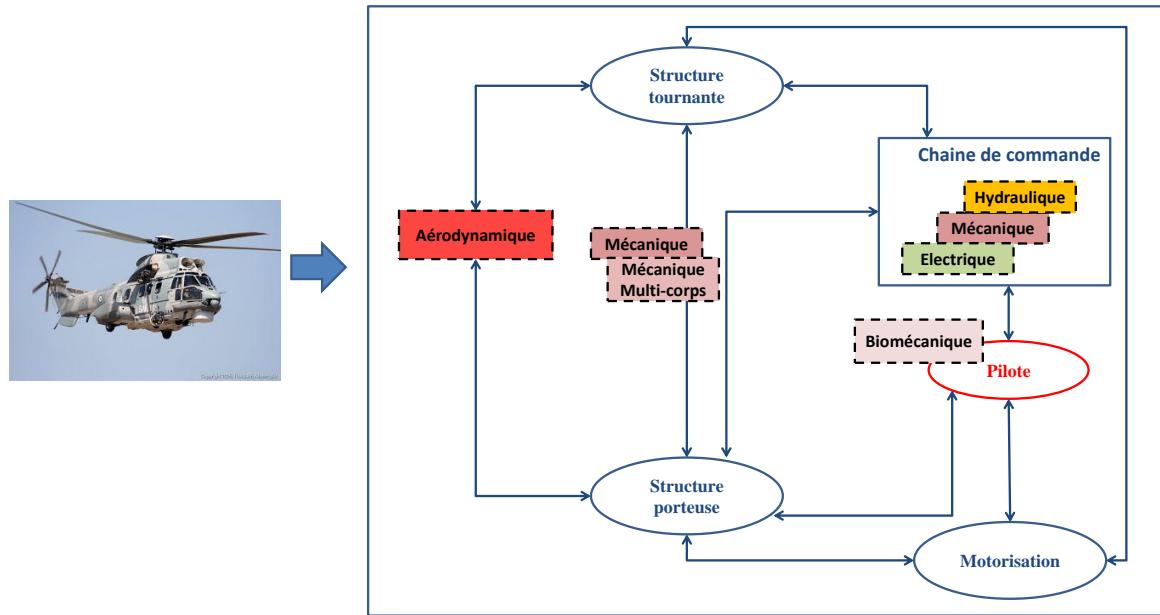


Figure I.5 - Complexité du système hélicoptère

Il existe plusieurs activités de recherche autour de l'application hélicoptère. La Figure I.6 montre la répartition dans le monde des principaux laboratoires ou institutions qui travaillent sur des thématiques autour de cette application [Sites institutions]. Ces derniers sont souvent en forte collaboration avec les grands industriels, tels qu'Eurocopter, Bell, Agusta et Sikorski.

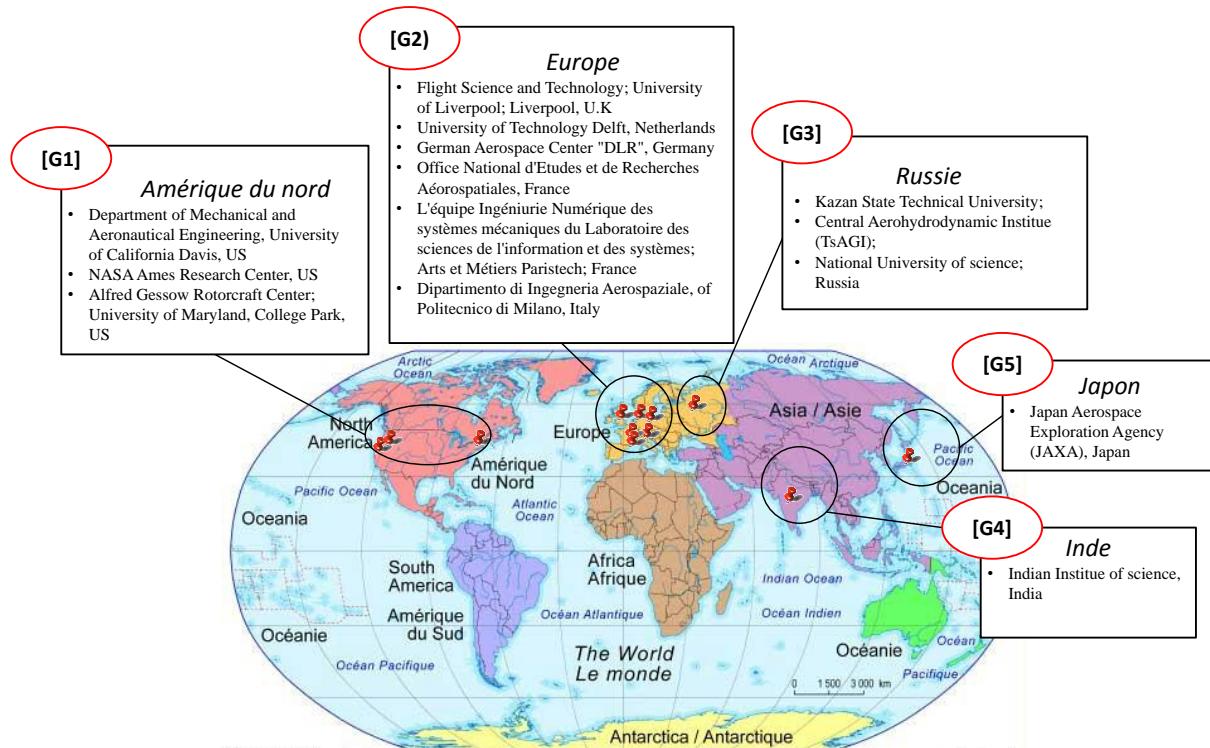


Figure I.6 - Institutions dont les activités de recherche portent sur les hélicoptères

Nous constatons que les travaux de recherche sur les hélicoptères sont essentiellement menés par une communauté scientifique spécifique à l'application publiés dans des forums spécialisés tels que l'ERF (European Rotorcraft Forum) et les conférences et revues de l'AHS (American Helicopter society). Généralement, ces travaux portent sur des modèles de comportement de sous-systèmes de l'hélicoptère ou de connaissance des phénomènes aérodynamiques et apportent des solutions à des problèmes spécifiques.

Pour positionner les outils et méthodes utilisés pour ces travaux, il est nécessaire de faire un bilan des méthodes qui existent pour la modélisation et l'analyse des différents sous-systèmes de l'hélicoptère. Il s'agit d'une concaténation de différentes approches en fonction de la nature du sous-système considéré et de la précision requise pour un objectif d'étude. La Figure I.7 présente les étapes de modélisation des sous-systèmes de l'hélicoptère en montrant les différentes démarches utilisées.

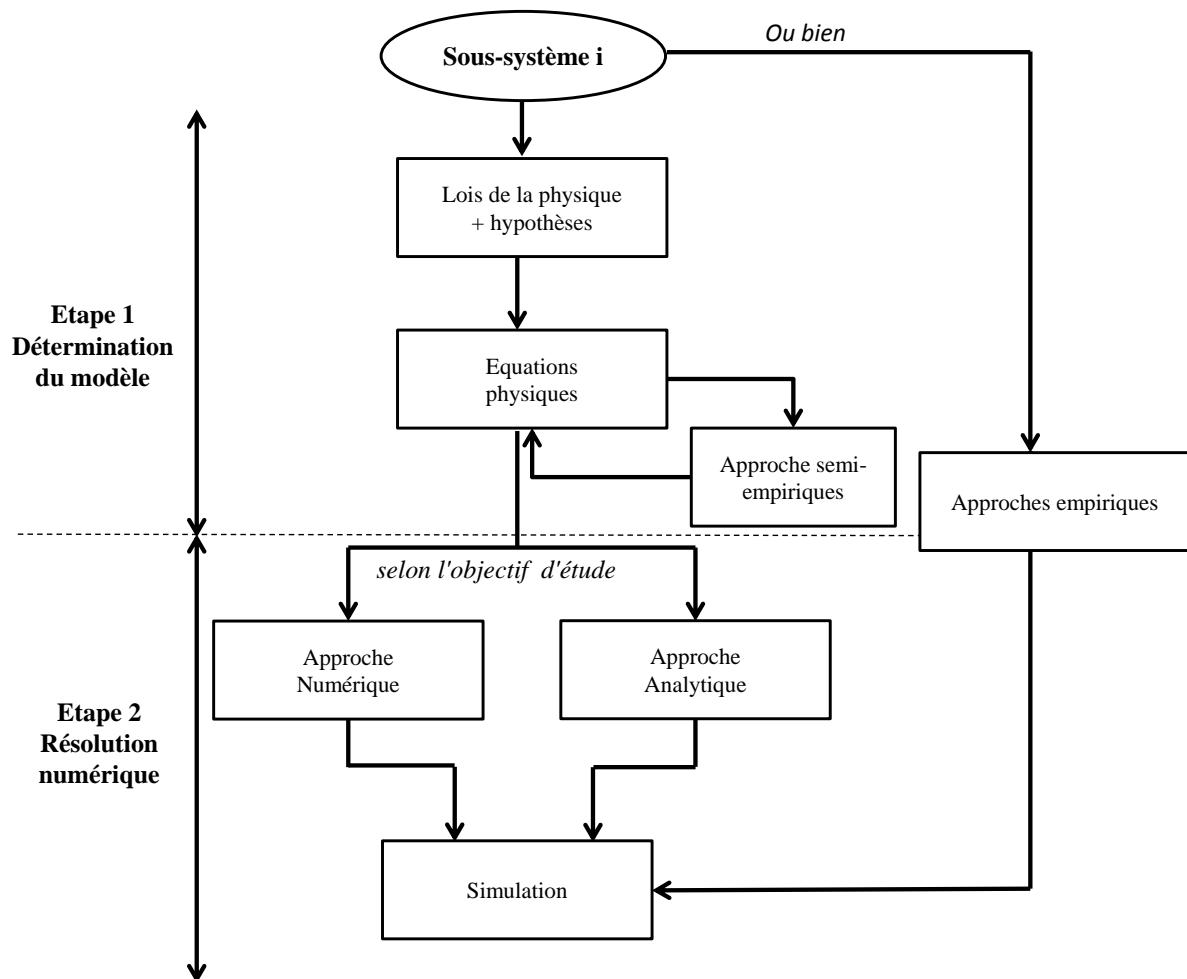


Figure I.7 - Bilan des étapes et approches de modélisation des sous-systèmes de l'hélicoptère

La première étape de modélisation est toujours la même. Il s'agit de la détermination des équations du sous-système considéré à partir des lois fondamentales de la physique. Ensuite, la deuxième étape consiste en la résolution numérique de ces équations pour la simulation. Lors des deux étapes de modélisation, on distingue trois types d'approches qui sont utilisés selon l'objectif d'étude.

- Les approches numériques pour traiter les structures déformables comme le fuselage et les pales (modèles à éléments finis mécaniques) et pour traiter les interactions fluide-structure (Computational-Fluid Dynamics).
- Les approches analytiques pour l'analyse du comportement dynamique des différents sous-systèmes (électriques : moteurs, vérins ; mécaniques multicorps : rotors ; hydrauliques : servocommandes ; biomécanique : pilote) et définir les structures de commande si nécessaire.
- Les approches empiriques et semi-empiriques basées sur l'expérimentation pouvant être utilisées à différentes étapes de la modélisation. Les approches semi-empiriques consistent à ajouter des paramètres empiriques qui permettent le recalage entre la théorie et l'expérimentation. Les approches empiriques exploitent uniquement des informations issues de l'expérimentation (exemple : les essais en vol) et peuvent être directement utilisées en simulation numérique.

Pour la deuxième étape, plusieurs logiciels peuvent être utilisés. Il existe des logiciels "universels", utilisés pour plusieurs domaines d'application et de la physique tels que Catia, Matlab, Mathematica ou les solutions proposées par LMS (Virtual.Lab, Imagine.Lab), et des logiciels spécifiques à l'hélicoptère sont développés par les grands industriels hélicoptéristes, avec une approche consistant à intégrer un maximum de fonctions de simulation (approche par intégration). Les logiciels spécifiques à l'hélicoptère les plus connus sont HOST et CAMRAD II [Johnson - 2013].

Dans ces travaux de thèse, nous nous intéressons aux approches de modélisation analytiques. A ce niveau, nous remarquons que, pour les gros hélicoptères, la modélisation des sous-systèmes (rotors, chaîne de commande, etc) se fait séparément et que la connaissance des interactions entre ces éléments est insuffisante pour permettre l'analyse et la compréhension de phénomènes impliquant des couplages énergétiques entre sous-systèmes. Tout ceci, nous ramène à la nécessité d'avoir une approche de modélisation globale du système.

Dans un contexte d'approche d'analyse globale, les travaux du projet CREATION de l'ONERA visent le développement d'une chaîne de calcul multidisciplinaire et multiniveau dédiée à l'évaluation des performances de concepts d'appareils à voitures tournantes y compris les hélicoptères des grands industriels [Tremolet - 2012 ; Basset - 2012]. L'objectif est que cette plateforme permette de simuler le concept d'appareils quel que soit le niveau de détail connu, disponible, pour la description de ses sous-systèmes. Les trois principaux niveaux de modélisation définis sont :

- des descriptions statiques et sur la base de bilans de puissance (PB, Power Balance) ;
- des modélisations analytiques de la mécanique du vol (AFM, Analytical Flight Mechanics) ;
- des modélisations numériques de la mécanique du vol (NFM, Numerical Flight Mechanics).

Ces travaux semblent être dans une optique proche de celle adoptée par les grands hélicoptéristes pour le développement de leur logiciel spécifique. Ces approches par intégration de modélisations fonctionnelles n'intègrent pas toujours les aspects dynamiques et ne conservent pas systématiquement les liens d'énergie entre sous-systèmes.

Pour conclure, peu ou pas d'approches énergétiques, multiphysiques et globales ont été utilisées ou développées pour la modélisation des hélicoptères "poids lourds industriels". C'est dans cette perspective de développement de modélisations d'hélicoptères, complémentaires à celles existantes, que s'inscrivent ces travaux de thèse : des modélisations qui permettent de supporter des activités de conception d'analyse et de contrôle.

I.3.2. Approches globales pour d'autres applications

Dans d'autres domaines et pour d'autres cas d'application que l'hélicoptère, des approches de représentation et de modélisation globales existent. Il s'agit d'utilisation d'outils graphiques de représentation, qui apportent une organisation aux modèles et qui permettent de servir de support lors de la conception des systèmes et de la structuration de leur commande. Ces formalismes graphiques qui ont été utilisés en application à des systèmes complexes multiphysiques, proposent des représentations systémiques globales. Nous citons, quelques exemples de ces travaux :

-
- Dans [Verhille - 2007], l'auteur traite la modélisation et la commande d'un système de traction du métro VAL 206. Il s'agit d'un système électromécanique complexe, appartenant à la famille des systèmes "Multi-machines Multi-convertisseurs" (SMM). L'auteur propose une approche de représentation systémique et globale pour ce système, basée sur la Représentation Energétique Macroscopique (REM). La REM globale obtenue donne une vision détaillée des éléments du système en respectant le principe de la causalité intégrale et tout en mettant en relief les couplages de différentes natures (électriques, magnétiques et mécaniques) ainsi que les non-linéarités (jeux mécaniques dans les réducteurs de vitesse et la loi de contact roue-sol). A partir de cette représentation, des structures de commande sont proposées. Pour cela une démarche systématique, basée sur l'inversion pas à pas des causalités des processus, a été utilisée. Cette dernière permet de mieux respecter les contraintes physiques du système tout en mettant l'accent sur les choix effectués. Finalement, les nouvelles structures de commande obtenues dans ce travail conduisent à une amélioration des performances dynamiques par rapport à l'existant, et apportent des solutions aux problèmes de robustesse du système.
 - Dans [Niesner - 2005], l'auteur s'intéresse aux applications automobiles. Il propose un modèle complexe d'un véhicule prenant en compte 14 degrés de liberté. Il utilise le formalisme graphique bond graph, pour la construction d'un modèle incertain. L'objectif de ces travaux de recherche et de l'utilisation ce formalisme graphique consiste en l'étude de l'influence des incertitudes paramétriques (variations de la masse, de la position du centre de gravité, de la vitesse longitudinale et de l'adhérence du revêtement routier) sur le comportement dynamique du véhicule. L'outil bond graph est utilisé afin de faciliter la modélisation, la détermination de la sensibilité à l'incertitude paramétrique et, d'une manière générale, l'analyse.

Il existe d'autres cas d'application pour lesquels ces outils sont utilisés en approche de représentation systémique pour des objectifs de modélisation, d'analyse et de commande. On les retrouve par exemple appliqués dans le domaine des énergies renouvelables, pour des éoliennes, des panneaux photovoltaïques et des piles à combustible, ou encore dans le domaine de l'automobile pour les véhicules électriques.

Certes, ces différents systèmes sont également complexes de par leur aspect multiphysique et l'existence de plusieurs couplages de natures différentes, mais ils

restent très différents du cas des hélicoptères. En effet, ce qui rend ce dernier plus complexe est l'aspect multidimensionnel difficile à simplifier, ainsi que les interactions aérodynamiques qui sont souvent difficiles à appréhender. Néanmoins, l'utilisation de tels outils pour ces systèmes de transports terrestres (ferroviaire, automobile) permet d'espérer une application tout aussi intéressante aux hélicoptères. L'intérêt de ces outils est essentiellement basé sur l'exploitation de leurs propriétés graphiques, tant pour l'organisation des modèles que pour leur analyse. Cependant, contrairement à la plupart des cas d'application de la littérature, la modélisation d'un appareil à voilure tournante tel que l'hélicoptère ne peut être simplifiée et ramenée à l'étude d'un système monodimensionnel.

Dans ce contexte, ces travaux de thèse ont été lancés pour étudier le potentiel des outils de représentations graphiques en application aux hélicoptères en réponse aux besoins suivants :

- apporter un aspect méthodologique pour la modélisation de ce type de système ;
- analyser leur potentialité pour comprendre et maîtriser les phénomènes d'instabilité engendrés par des couplages mal maîtrisés entre sous-systèmes ;
- étudier la potentialité de la méthode pour l'amélioration des systèmes de commande.

Ces travaux devraient permettre à la fois d'apporter des outils méthodologiques à la communauté des hélicoptères, et l'application aux communautés développant ces outils.

I.3.3. Objectifs

Pour parvenir à répondre aux besoins présentés précédemment, nous nous sommes fixés plusieurs objectifs :

- Un premier objectif, plutôt général et méthodologique, consiste en une réflexion sur l'approche de représentation en se basant sur les formalismes graphiques. Dans un premier temps, nous souhaitons proposer une vision globale du comportement dynamique de l'hélicoptère pour une meilleure compréhension en vue du contrôle de son attitude. L'idée est d'avoir une approche de représentation multiniveau qui laisse la possibilité d'aller d'un besoin global à l'intégration du comportement des composants (Figure I.8).
- Un deuxième objectif consiste à reproduire par la simulation les conditions d'apparition de l'un des phénomènes de couplage spécifiques à certains

hélicoptères, en zoomant sur une partie de l'hélicoptère, afin d'apporter des éléments de validation du modèle développé.

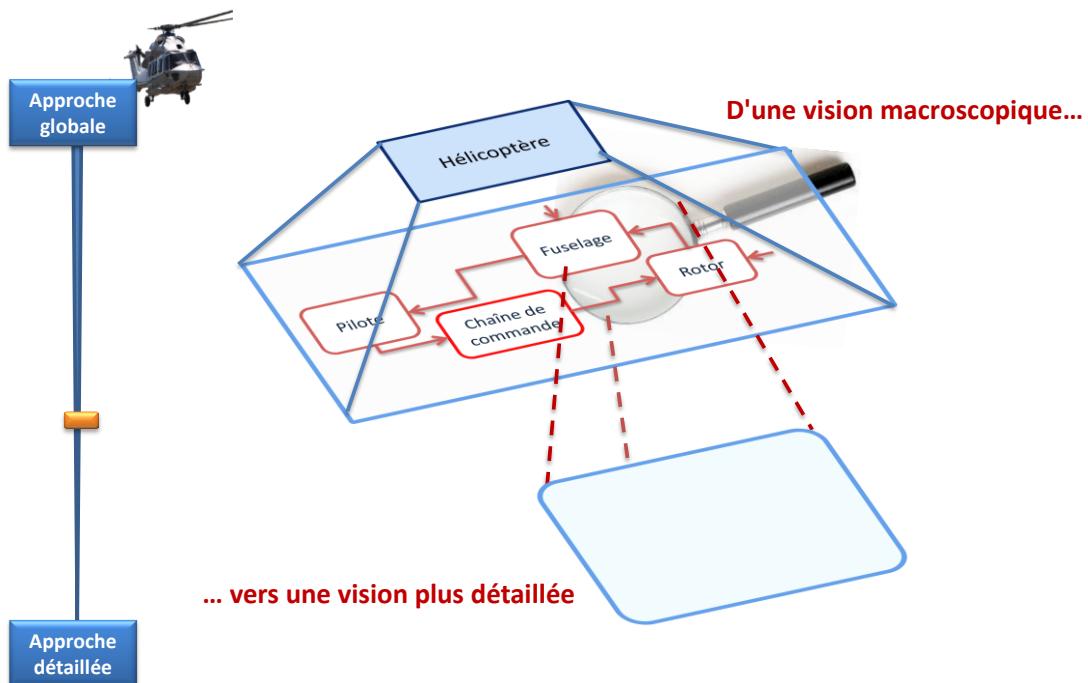


Figure I.8 - Objectif d'une approche de représentation multiniveau de l'hélicoptère

Afin de répondre à ces objectifs, une partie importante des travaux est consacrée à une recherche bibliographique sur les différents outils de représentation multiphysique existants, pour étudier quels sont ceux qui correspondent le mieux à nos objectifs. Une autre partie est consacrée à l'application des outils retenus pour la proposition de la représentation multiniveau.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les premiers verrous scientifiques identifiés et les objectifs fixés dans le cadre du projet de la chaire industrielle "Dynamique des Systèmes Mécaniques Complexes". En effet, les travaux de cette thèse constituent les premiers pas de ce projet et sont centrés sur la modélisation et la représentation des hélicoptères des grands industriels, dans le domaine de la mécanique de vol.

Dans ce cadre, notre intérêt s'est porté sur la complexité du système liée à la multiplicité de sous-systèmes en fortes interactions ainsi qu'à la superposition de différents comportements physiques tels que mécaniques, électriques, hydrauliques, aérodynamiques. La multiplicité des sous-systèmes dans l'hélicoptère, chacun

associé à des domaines différents de la physique, implique généralement l'emploi de plusieurs types de modélisation. La réunion de ces modèles n'est alors pas chose aisée, ce qui complique l'analyse du système dans sa globalité.

Le besoin d'une approche de modélisation qui soit la plus globale possible nécessite la réflexion sur une représentation multiphysique afin de faciliter le transfert d'informations entre équipes. Il est aussi nécessaire d'avoir une vision plus ou moins détaillée sur les différents sous-systèmes qui composent l'hélicoptère ainsi que leurs interactions. Ainsi, l'idée d'envisager plusieurs niveaux de représentation pour permettre d'aller d'une vision globale vers une vision locale, est intéressante.

