

Avant-propos

L'objet de cet ouvrage est de décrire les principes de conception orientée modèle utilisés dans le domaine aéronautique, et plus spécifiquement pour le domaine des drones civils (UAV : *Unmanned Aerial Vehicle* en anglais). Nous nous intéresserons particulièrement à la conception d'un système embarqué pour les drones permettant d'établir une communication *ad hoc* à l'intérieur d'une flotte de drone. Dans ce contexte, une méthodologie originale de prototypage rapide pour les systèmes embarqués complexes sera présentée. Les avantages de cette approche seront défendus, notamment en matière de gain de temps pour les phases de vérification et de validation formelle pour contribuer à la certification du système UAS (*Unmanned Aerial System*). Il sera aussi traité des phases de vérification plus traditionnelle, mais néanmoins nécessaires, qui doivent être réalisées pour vérifier les performances du système. Cette évaluation sera réalisée en simulation, mais également en utilisant des expérimentations réelles. Les différents outils nécessaires à la mise en œuvre de cette méthodologie seront décrits pour permettre au lecteur d'implémenter à son tour tout ou partie de l'approche décrite dans cet ouvrage. Enfin, afin d'illustrer l'apport de cette méthodologie originale, un exemple de développement de système embarqué aéronautique sera présenté dans lequel les différentes phases de la méthodologie seront explicitées afin de pouvoir concevoir, valider et tester un nouveau protocole de routage sécurisé, développé pour le contexte des communications au sein d'une flotte de drones.

Introduction et positionnement de l'ouvrage

L'industrie des drones est en pleine évolution. Cette dernière a vu le type et les missions des drones industriels évoluer de façon très rapide ces cinq dernières années. Les drones sont maintenant capables d'emporter des charges utiles de plus en plus complexes et d'offrir une autonomie de déplacement et un niveau d'automatisation sans précédent pour les missions pour lesquelles ils sont utilisés.

Cette augmentation du niveau de complexité des drones industriels doit se traduire par une amélioration des processus et méthodes qui sont utilisés pour les concevoir, les évaluer et conduire les missions dans lesquelles ils sont engagés. L'objectif de cet ouvrage est donc de présenter une nouvelle méthode de prototypage rapide qui permet de concevoir un système embarqué complexe à l'aide d'outils de conception simples et intuitifs. Les travaux qui sont présentés dans cet ouvrage sont inspirés de travaux menés précédemment dans le domaine aéronautique, domaine dans lequel la problématique de la complexité de développement des systèmes embarqués a été abordée depuis plusieurs décennies maintenant.

L'originalité des travaux présentés dans cet ouvrage porte à la fois sur la pertinence de la méthode de prototypage rapide qui sera abordée dans le deuxième chapitre, mais également sur l'utilisation de cette méthode qui en est faite. En effet, le projet de réseau de drones communicants, qui sera présenté dans la suite de cet ouvrage, représente une des premières réalisations expérimentales permettant à plusieurs drones qui partagent des objectifs de mission commune d'échanger des informations de surveillance (vidéo) en temps réel et de façon sécurisée. Ainsi, pour ce cas d'application, la sécurité est mise en œuvre par l'intermédiaire du type de réseau de communication qui est utilisé (un réseau *ad hoc* dans lequel chaque drone peut être tour à tour émetteur, relais ou récepteur de l'information) mais également grâce aux mécanismes de sécurité utilisés pour l'échange des informations pendant la mission de la flotte de drone. À ce titre,

il est important de préciser pour le lecteur que l'ensemble des protocoles qui seront présentés ultérieurement ont été définis, conçus et évalués grâce à la méthode de prototypage rapide définie dans cet ouvrage. Il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux similaires dans le domaine des systèmes embarqués qui couplent l'utilisation de méthodes orientées modèles pour le contexte spécifique des réseaux de drones communicants.

La suite de cet ouvrage sera découpée de la façon suivante. Le deuxième chapitre sera consacré à dresser un état de l'art des méthodes orientées modèles appliquées aux systèmes aéronautiques. En effet, les drones sont des aéronefs autonomes, mais qui répondent à des exigences logicielles qui sont proches de celles d'un aéronef classique. Dès lors, il sera intéressant pour le lecteur de pouvoir comparer ce qui existe dans le domaine de la conception orientée modèle (MDD en anglais pour *Model Driven Development*) pour les aéronefs traditionnels (par exemple un AIRBUS A380) avec le domaine des systèmes de drones (UAS en anglais pour *Unmanned Aerial System*).

Dans une deuxième partie, nous présenterons notre méthode de prototypage complexe pour les systèmes embarqués de drones. Cette méthode originale s'appuie sur le paradigme du MDD pour permettre de concevoir des systèmes complexes (par exemple un réseau de drones communicants) à l'aide d'artefacts de plus haut niveau. Ces artefacts reposent sur l'utilisation d'un formalisme orienté modèle qui permet de définir simplement et rapidement les fonctionnalités du système final. Ces modèles de haut niveau ont un pouvoir d'expressivité plus élevé qu'une spécification logicielle classique et simplifient donc la phase de validation des fonctionnalités du système final. D'autre part, l'utilisation de modèles de haut niveau ouvre le champ à l'ensemble des méthodes de vérification formelles qui seront également abordées dans ce chapitre. En effet, la phase de validation et de vérification des fonctionnalités du système final est très importante pour les systèmes aéronautiques (dont les drones font partie). Ces derniers ont, en effet, des contraintes de certification très importantes pour permettre d'obtenir une autorisation de vol. Dès lors, les méthodes de vérification formelles, lorsqu'elles sont associées à l'utilisation de modèles de haut niveau pour la conception du système, permettent de réduire la charge de l'ingénieur lors de la phase de validation du code logiciel qui est dérivé de cette phase de modélisation. Ces différents points seront abordés en détail dans ce deuxième chapitre et les avantages conjoints de l'utilisation des méthodes formelles sur des modèles de haut niveau seront développés. Néanmoins, il est important de préciser que la validation formelle utilisée sur des modèles de haut niveau ne permet pas de vérifier l'ensemble des fonctionnalités du système final. Il est toujours nécessaire de compléter cette première phase de vérification formelle par de la vérification plus traditionnelle (par exemple à l'aide de tests unitaires). Ce chapitre présentera donc également les outils de vérification plus standard qui ont été utilisés pour valider les fonctionnalités du système final. Nous mettrons en particulier l'accent sur un outil de simulation hybride qui a été développé spécifiquement pour valider le fonctionnement réseau (au niveau protocolaire) de la flotte de drones. D'autre part, nous ferons un *focus* sur les cartes matérielles qui ont été nécessaires pour pouvoir

mettre en œuvre les fonctionnalités d'échange d'information dans le système embarqué que nous avons utilisé (drone DT18 de la marque Delair Tech).

Pour conclure cet ouvrage, nous aborderons, en détail, en dernière partie, le cas d'utilisation qui nous a conduit à définir la méthode de prototypage rapide qui a été présentée dans le chapitre précédent. Ce cas d'utilisation représente une application très prometteuse des flottes de drones. Il s'agit d'utiliser plusieurs drones en simultané, pour leur permettre de voler en flotte et ainsi pouvoir couvrir un périmètre géographique beaucoup plus important que ce qui serait couvert par un drone unique. Ainsi, lorsque plusieurs drones volent en flotte, il est nécessaire de pouvoir faire communiquer ces drones entre eux afin de réduire le nombre de stations de contrôle et d'échange d'information qui sera nécessaire pour la mission de télésurveillance. Ce principe permet de définir un réseau *ad hoc* de drone. Dans ce contexte, de nouveaux protocoles de communication ont été définis et mis en œuvre grâce à la méthode de prototypage rapide que nous avons présentée. En particulier, un nouveau protocole de routage sera introduit dans ce dernier chapitre. Ce protocole prend en compte les vulnérabilités inhérentes aux réseaux *ad hoc* de communication et propose de nouveaux mécanismes pour permettre d'apporter une solution efficace à ces vulnérabilités. L'objectif de ces améliorations du protocole de routage est de rendre le réseau *ad hoc* plus sûr et ainsi offrir un niveau de service pour la mission de télésurveillance plus élevé. Ainsi, dans ce dernier chapitre, la conception orientée modèle de ce nouveau protocole de routage sera détaillée. L'évaluation du protocole de routage qui a été réalisée sera également détaillée. Cette évaluation portera sur trois aspects : une première sur l'utilisation des méthodes formelles, une deuxième sur l'utilisation de l'outil de simulation hybride et enfin une dernière qui porte sur la réalisation d'expérimentations réelles, pour lesquelles plusieurs drones sont impliqués, au travers d'une mission de télésurveillance géographiquement distribuée.