

Conception et réalisation d'un démonstrateur pour un système hybride projectile/drone miniature

Etat des travaux après 32 mois

P. GNEMMI¹, S. CHANGEY¹, C. REY¹, E. ROUSSEL¹, K. MEDER¹, N. METZGER¹, S. SCHERTZER¹,
E. PECHEUR¹, A. DROUOT², C. CHAUFFAUT³, R. SIRYANI⁴, C. BERNER¹, L. BERNARD¹,
P. WEY¹, B. MARTINEZ¹, M. BOUTAYEB², R. LOZANO³

¹ISL, Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 5 rue du Général Cassagnou, 68301 Saint-Louis Cedex

²CRAN, Institut Universitaire de Technologie Henri Poincaré, 186 rue de Lorraine, 54400 Cosnes et Romain

³HEUDIASYC, Université de Technologie de Compiègne, Centre de Recherches de Royallieu, 60205 Compiègne Cedex

⁴SBG-Systems SAS, 6 rue Lionel Terray, 92500 Rueil Malmaison

patrick.gnemmi@isl.eu, sebastien.changey@isl.eu, boutayeb@univ-lorraine.fr, rogelio.lozano@hds.utc.fr, siryani@sbg-systems.com

Résumé – Dans le cadre de la protection du citoyen et des infrastructures vitales et des réseaux, l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL) propose un concept innovant de drone miniature : il s'agit de lancer à partir d'un tube portable dédié, un projectile subsonique qui se transforme en drone miniature (MAV) une fois arrivé au-dessus du site à observer. Un tel système hybride, appelé GLMAV pour Gun Launch Micro Air Vehicle, est dédié à toutes formes de surveillance et de contrôle de personnes et d'infrastructures par la voie aérienne puisqu'il sera doté d'un système de vision embarqué avec transmission des images en temps réel. L'ISL s'est associé au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN – Université de Lorraine), à l'unité mixte de recherche HEURistique et DIAgnostic des Systèmes Complexes (HEUDIASYC – Université de Technologie de Compiègne) et à la très petite entreprise SBG Systems SAS. Le consortium étudie le projet « DEMONSTRATEUR_GLMAV » dans le cadre de l'ANR CSOSG qui aboutira vers la fin de 2013 à la réalisation d'un démonstrateur. Le Groupe d'Intervention de la Gendarmerie Nationale (GIGN) et la Direction Générale de l'Armement (DGA) en tant qu'experts opérationnels et MBDA-Systems en France en tant qu'expert industriel sont associés au comité de pilotage du projet. L'état d'avancement des travaux relatifs à ce projet après trente deux mois d'études est présenté dans cette publication. Certains points durs non soupçonnés au début de l'étude se sont révélés et ils devront être levés afin de conduire, à l'issue du projet, à la réalisation d'une démonstration de mise en œuvre du système GLMAV.

Abstract – Within the framework of the protection of the citizen and of the vital infrastructures and the networks, the French-German Research Institute of Saint Louis (ISL) proposes an innovative concept of a miniature air vehicle: it is a question of launching from a dedicated portable tube, a subsonic projectile which is transformed into a Micro Air Vehicle (MAV) once arrived over the site to be observed. Such a hybrid system, named GLMAV for Gun Launch Micro Air Vehicle, is devoted to any forms of surveillance and control of people and infrastructures by air, because it will be equipped with an embarked vision system with real-time image transmission. The ISL has associated the "Centre de Recherche en Automatique de Nancy" (CRAN – University of Lorraine), the CNRS joint unit of research "HEURistique et DIAgnostic des Systèmes Complexes" (HEUDIASYC - University of Technology of Compiègne) and the very small company SBG Systems SAS. The consortium studies the project "DEMONSTRATEUR_GLMAV" within the framework of the ANR CSOSG which will end toward the end of 2013 in the realization of a demonstrator. The "Groupe d'Intervention de la Gendarmerie Nationale" (GIGN) and the "Direction Générale de l'Armement" (DGA) as operational experts and MBDA-Systems in France as industrial expert are associated to the steering committee of the project. The state of the work progressing after thirty two months of studies concerning that project is presented in this report. Some hard points unexpected at the beginning of the study have been underlined and they must be resolved in order to lead, at the end of the project, to the realization of a demonstration of the implementation of the GLMAV system.

1. Introduction

Un tour d'horizon des activités drones dans le contexte international montre que l'utilisation de véhicules aériens sans pilote (Unmanned Air Vehicle soit UAV ou drone) est primordiale. En effet, les drones font l'objet d'un intérêt croissant de la part de plusieurs pays et l'emploi de ces engins qui volent sans pilote semble particulièrement bien

adapté à des opérations de surveillance et détection sur des sites sensibles ou en milieu hostile.

Un état sur le positionnement des drones dans l'espace aérien est brièvement présenté dans [1]. Dans les cadres de la sécurité civile et de situations conflictuelles ou de combats rapprochés, un opérateur ou un groupe d'intervenants (policiers, gendarmes, douaniers, pompiers, fantassins, etc.) devrait pouvoir utiliser un drone miniature

pour explorer la zone difficile, afin d'accéder immédiatement à la vue du terrain et pour éviter les pertes humaines.

Après examen des différents types d'appareils existants ou en cours de développement et fort des compétences de l'ISL en lancement de projectiles par « effet canon » et en aérodynamique des voilures tournantes, un nouveau concept utilisant ces compétences est proposé : le **Gun Launched Micro Air Vehicle (GLMAV)** [2]. Il s'agit d'amener le drone miniature très rapidement sur le site où il commence à être opérationnel en utilisant une énergie délivrée extérieurement à l'appareil (Fig. 1). Cet appareil original conditionné dans une enveloppe constituant un projectile est donc lancé par un tube dédié portable. Puis, lorsque le projectile atteint son apogée il est transformé en une plateforme drone miniature qui devient opérationnelle au-dessus du site à observer. Les avantages majeurs de ce concept par rapport à un drone miniature plus classique à décollage vertical sont exposés dans [1].

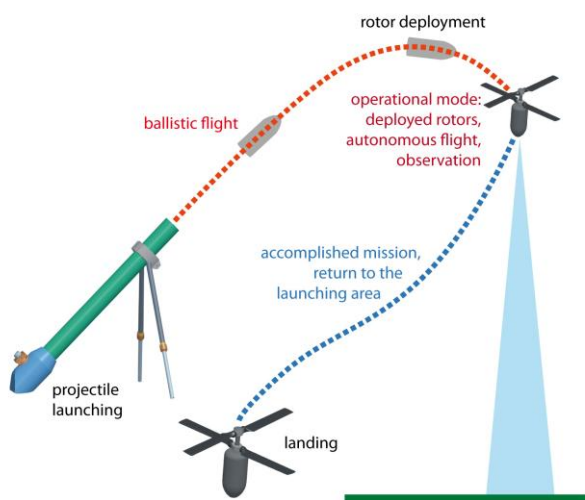


Fig. 1 : concept du GLMAV

Compte tenu des dimensions et des contraintes de symétrie imposées par le concept de lancement par effet lance-grenade, des vitesses de rotation en jeu et du type de missions envisagées, la solution suivante se dégage parmi différents choix exposés dans [1] et [2]. L'appareil GLMAV comporte deux rotors coaxiaux contrarotatifs. Le rotor supérieur assure la sustentation de l'appareil tandis que le rotor inférieur assure l'anti-giration et sa manœuvrabilité longitudinale et latérale. La superposition des rotors conduit à des interactions de différentes natures entre les rotors qui dépendent du type de vol et qu'il y aura lieu d'étudier.

Le GLMAV devra avoir un rayon d'action de 500 mètres et une autonomie d'au moins 20 minutes. Il sera équipé d'un système de navigation par GPS et il devra être pourvu d'un certain pouvoir décisionnel (c'est un point dur certain). Il sera équipé de capteurs, d'un autopilote assurant l'asservissement entre les mesures des capteurs et les commandes de vol à fournir aux différents organes. Il sera

équipé d'un système de vision jour pour observer la zone sensible de quelques centaines de mètres carrés.

Deux scénarii opérationnels sont envisagés : l'engin devient opérationnel à 100 m au dessus de la zone à observer située à 100 m ou 500 m du lieu de lancement. Le vol du GLMAV peut donc être scindé en 3 phases :

- le vol balistique d'un projectile classique jusqu'au voisinage de son apogée,
- la phase transitoire de transformation du projectile en drone miniature,
- le vol opérationnel piloté.

Le projet de 36 mois étendus à 45 mois devrait aboutir à un démonstrateur vers la fin de 2013. Ce projet est étudié dans le cadre d'un financement ANR dans le thème CSOSG. Le projet « DEMONSTRATEUR_GLMAV » est bâti autour d'un consortium composé des 4 partenaires suivant :

Tab. 1 : partenaires du consortium

	Partenaire	Organisme de recherche	Entreprise
1	Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL)	Oui	
2	Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) UMR-CNRS-7039	Oui	
3	Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes (HEUDIASYC) UMR-CNRS-6599	Oui	
4	SBG Systems SAS		Oui

L'ISL assure la coordination des travaux du consortium. Le Groupe d'Intervention de la Gendarmerie Nationale (GIGN) et la Direction Générale de l'Armement (DGA) se sont déclarés en tant « qu'opérateur étatique » et MBDA-Systems en France s'est annoncé en tant « qu'opérateur industriel » potentiellement intéressé par un éventuel transfert de technologie et comme conseil pour les aspects industriels.

2. Etat d'avancement des travaux du programme scientifique et technique du projet

Le programme scientifique et technique de ce projet est décomposé en 1 tâche de management et en 7 tâches techniques. Des compétences multiples sont mises en œuvre dans ce projet. Sa structure est élaborée par compétences de manière à ce que chacune des tâches constitue un bloc dont le taux de recouvrement est inférieur à 15% sauf pour la dernière tâche qui recouvre l'ensemble des travaux techniques. Toutes les tâches qui nécessitent un recouvrement seront coordonnées entre elles ; en particulier, la réalisation des essais pour la validation des différentes phases du projet sera réalisée dans l'une ou l'autre tâche et l'on veillera à éviter la redondance des essais. Le diagramme de la figure 2 synthétise l'imbrication des tâches entre-elles.

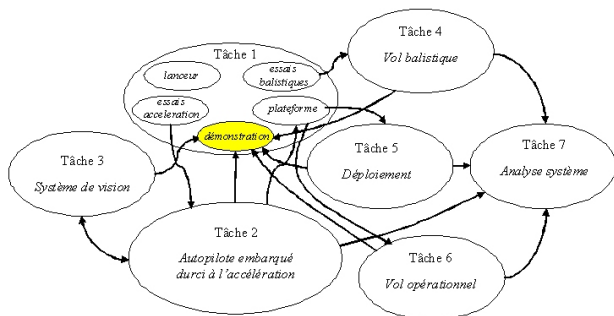


Fig. 2 : diagramme synthétique des tâches

2.1 Tâche 0

Cette tâche consiste à faire le lien entre les différents partenaires, à s'assurer de la cohérence des travaux effectués dans les différentes tâches et sous-tâches et à assurer la présidence du comité de pilotage.

Le suivi des travaux de ce projet est assuré par le comité de pilotage. Le comité de pilotage est composé des partenaires ISL, CRAN, HEUDIASYC et SBG Systems, des opérateurs publics GIGN et DGA et de l'opérateur industriel MBDA Systems en France.

Les articles référencés [1] et [6-8] ont été publiés en 2010, ceux référencés [9-11] puis [12-19] l'ont été en 2011 puis en 2012, respectivement. L'ISL a présenté ce projet à une douzaine de délégations issues du monde universitaire et industriel ou provenant des ministères français et allemand de la défense. Des scientifiques de l'ISL ont également participé en tant qu'observateurs à l'« IEEE International Conference on Robotics and Automation » qui s'est tenu à Saint-Paul aux USA en mai 2012 et à l'« International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition » qui s'est déroulé à Braunschweig en Allemagne en juillet 2012.

2.2 Tâche 1 – réalisation du lanceur et de la plateforme GLMAV, réalisation des essais

Cette tâche est consacrée à la réalisation du lanceur dédié, à la conception et à la réalisation de la plateforme GLMAV durcie à l'accélération, à la réalisation des essais de tenue à l'accélération des différents composants ainsi qu'à la réalisation des essais de démonstration.

2.2.1 Sous-tâche 1 – réalisation du lanceur

Le lanceur de laboratoire spécifiquement dédié à cette application et dont le diamètre intérieur est de 80 mm est opérationnel (Fig. 3).

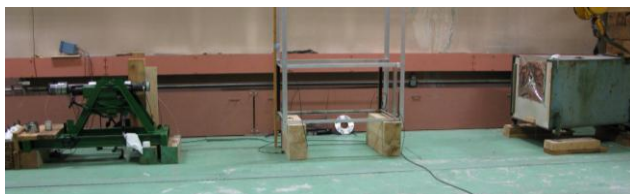


Fig. 3 : montage expérimental pour tests à l'accélération

Ce lanceur sert principalement à l'étude de la tenue à l'accélération de 2 500 g de tous les composants du GLMAV pour une vitesse de sortie de tube de 130 m/s.

La conception et la réalisation du lanceur balistique dédié sont reportées au début de l'année 2013, lorsque les premiers essais de vols balistiques auront été réalisés en extérieur avec le lanceur de laboratoire.

2.2.2 Sous-tâche 2 – réalisation de la plateforme GLMAV

La plateforme GLMAV est l'ensemble projectile/drone miniature, c'est-à-dire l'ensemble volant. Son étude se poursuit en permanence par un processus itératif fermé, compte tenu des contraintes et des performances liées à chacun des composants. Le design de la plateforme version 2.0 a été finalisé en 2012 (Fig. 4) et tous les composants ont pu y être intégrés [12].

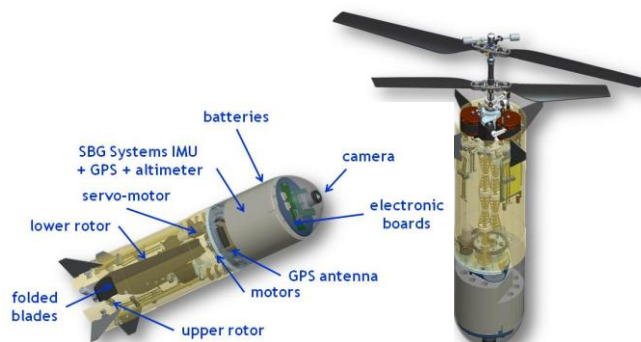


Fig. 4 : plateforme du GLMAV version 2.0 ; à droite mode balistique, à gauche mode opérationnel

Compte tenu de la diversité des travaux de cette sous-tâche, celle-ci a été décomposée en plusieurs points traités ci-après.

2.2.2.1 Réalisation d'un projectile empenné

Le dispositif à ailettes déployables a été fabriqué à l'ISL. Les premiers tests de déploiement des ailettes avec le lanceur de laboratoire utilisé sur le terrain d'expériences de l'ISL ont permis de valider le fonctionnement du dispositif et la bonne stabilité du projectile lors du vol balistique.

2.2.2.2 Système de déploiement de la platine supportant les rotors

Le système de déploiement de la platine où sont montés les deux rotors est maintenant opérationnel et les premiers tests à l'accélération ont débuté.

Une étude spécifique relative à des pales à charnières a été réalisée et quelques concepts ont été fabriqués (Fig. 5), puis testés avec succès à la tenue aux vitesses de rotation des rotors.



Fig. 5 : concepts d'articulation pour les pales

2.2.2.3 Performances aérodynamiques de la plateforme déployées

Antérieurement des simulations numériques en dynamique des fluides ont été réalisées avec le code ANSYS CFX pour dimensionner les rotors contrarotatifs permettant de satisfaire les conditions de fonctionnement de la plateforme pour la phase transitoire. Ainsi une poussée d'environ 18 N est nécessaire pour ralentir le GLMAV jusqu'à obtenir une vitesse de translation nulle de l'appareil [11].

Pour ce faire, il est prévu de réaliser un rotor supérieur de 0,35 m de diamètre et un rotor inférieur de 0,25 m de diamètre. Des premières investigations théoriques rapides conduisent à avoir des vitesses de rotation de l'ordre de 3 000 et de -7 000 tr/mn pour les rotors supérieur et inférieur, respectivement. Cette conception, GLMAV version 2.0, a le grand avantage d'utiliser la plateforme existante, puisque la distance entre les deux rotors est de 0,05 m et que les pales du rotor supérieur sont prolongées d'autant.

Une simulation a été réalisée en 2011 pour des vitesses de 3 500 et -7 300 tr/mn pour les rotors supérieur et inférieur, respectivement. Le résultat montre que les vitesses de rotation envisagées pour les dimensions des rotors imposées sont suffisantes pour la phase de vol opérationnel et devraient l'être pour la phase de vol transitoire puisque la traction calculée est de 18,2 N. Cependant, le couple résiduel qui est de 0,18 mN devra être annulé par une compensation des vitesses de rotation qui sera assurée par l'autopilote.

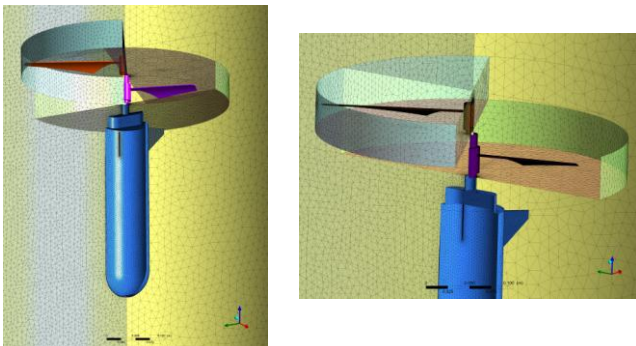


Fig. 6 : maillage du domaine de calcul pour le GLMAV complet version 2.0

Des nouvelles simulations numériques ont été entreprises en 2012 pour déterminer les vitesses de rotation des rotors et la traction pour un couple résiduel

pratiquement nul. Ainsi, le maillage réalisé antérieurement avec une distribution d'environ 6 millions de nœuds a été utilisé pour ces simulations (Fig. 6). Les calculs montrent que la vitesse du rotor supérieur de 0,35 m de diamètre devrait être de 4700 tr/mn alors que celle du rotor inférieur de 0,25 m de diamètre devrait être de -6500 tr/mn ; ceci conduit à une force de traction de 19,8 N et à un couple résiduel de -0,0216 mN, ce qui sera compensé en diminuant sensiblement la vitesse du rotor supérieur (Fig. 7).

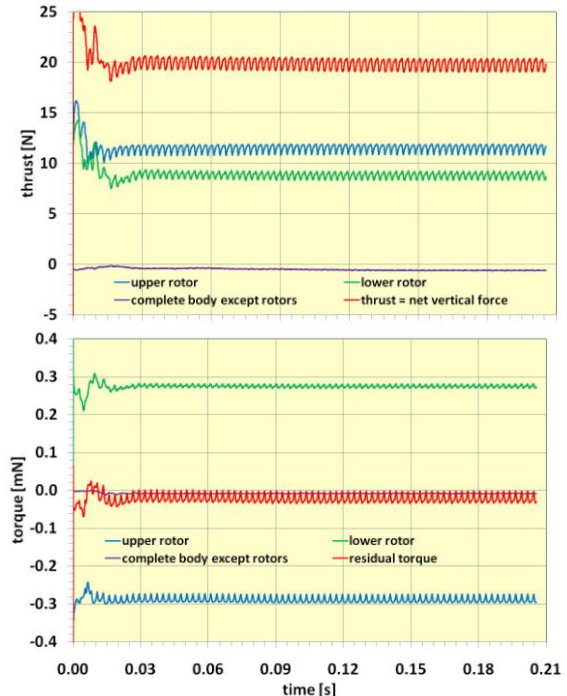


Fig. 7 : traction et couple pour le GLMAV complet version 2.0

2.2.2.4 Réduction de la masse du GLMAV

Maintenant que tous les éléments conçus et intégrés, l'étude de réduction de la masse va pouvoir commencer dans le but d'atteindre une masse de l'ordre de 800 g.

2.2.3 Sous-tâche 3 – réalisation des essais de tenue à l'accélération des composants

L'objectif consiste à vérifier la capacité des différents composants électroniques et mécaniques à résister à l'accélération d'environ 2 500 g lors du lancement du projectile, la vitesse initiale étant inférieure à 130 m/s. La majorité des composants a été testée à l'accélération avec succès.

Après avoir conditionnée une nouvelle centrale inertielle IG-500N de SBG Systems équipée d'accéléromètre 18 g, des tests à l'accélération en laboratoire pour 1500 g, 2000 g puis 2500 g ont mis en évidence des problèmes de surchauffe de la centrale. L'utilisation d'une autre résine d'enrobage est à l'étude. Les performances de la centrale seront évaluées avant et après les tests à l'accélération qui

devraient se faire par des essais balistiques, donc dans des conditions proches des conditions d'emploi.

La centrale inertielle IG-500N, le système de déploiement des pales, la nouvelle configuration de la carte électronique, la platine birotor complète et l'ensemble optique seront testés au début de l'année 2013.

2.2.4 Sous-tâche 4 – réalisation des essais balistiques avec projectile « mulet »

En liaison avec la tâche 4, il s'agira de définir une campagne d'essais à base de tirs instrumentés dans le but de vérifier la phase du vol balistique et de tester le lanceur en configuration extérieure. Le projectile « mulet » possèdera des caractéristiques dimensionnelles, massiques et inertielles équivalentes à celles du GLMAV. Il sera seulement équipé de la centrale de navigation inertielle IG-500N, de son interface électronique et d'un système d'enregistrement de données étudiés lors de la tâche 2, et éventuellement du système d'observation de la tâche 3.

Les tests réalisés au terrain d'expériences de Baldersheim ont commencé en mars 2012 et ils ont montrés que la balistique du projectile à ailettes possède une trajectoire balistique correcte. Cependant, ces premiers résultats restent à être confirmés.

L'intégration d'un système de parachute avec son dispositif de déclenchement à la demande est en cours d'étude afin d'équiper chaque projectile mulet de ce moyen pour la récupération en douceur du projectile et de ces composants. Cette étude est également intéressante pour, ultérieurement, éventuellement équiper le GLMAV d'un dispositif de récupération du véhicule en douceur.

2.2.5 Sous-tâche 5 – réalisation des essais de démonstration de la validité du concept GLMAV

Cette demi-douzaine d'essais initialement prévue après 30 mois d'étude environ sera réalisée vers la fin de 2013. Il s'agira de vérifier les différentes phases de vol du GLMAV avec prise d'images vidéo montrant les aptitudes de l'engin à enregistrer des images stables.

L'évolution permanente de la plateforme durant toute la durée du projet sera prise en compte en fonction des résultats obtenus pour chacune des tâches. De ce fait, il est tout à fait possible que des solutions autres que celles prévues lors de la rédaction de ce projet voient le jour.

2.3 Tâche 2 – réalisation de l'autopilote embarqué durci à l'accélération

Pour que le drone miniature soit capable de naviguer dans des milieux délicats tel que le milieu urbain, son système de navigation et de stabilisation doit être très performant. Le drone miniature doit pouvoir garantir un comportement sain et une stabilité optimale dans des

conditions de vents complexes. Un des organes principaux du système de stabilisation et de navigation est la centrale inertielle qui fournit à la fois des données de position et d'orientation en 3D.

Cette tâche est dévolue à la conception et à la réalisation de l'autopilote embarqué durci à l'accélération de départ du projectile. Dans la version proposée de l'autopilote, il n'est pas encore envisagé qu'il y ait une fonctionnalité d'évitement d'obstacles.

L'objectif de cette tâche est de réaliser une interface électronique durcie permettant de piloter le GLMAV avec précision. Le but est d'atteindre une précision de mesure de l'ordre du degré en mode dynamique sur les trois angles de lacet, de roulis et de tangage par fusion des données issues d'accéléromètres, de gyromètres, de magnétomètres et d'un GPS. Il s'agit également d'intégrer un altimètre précis à 2% de la hauteur mesurée. A l'aide de tous ces capteurs, les fonctionnalités de navigation sont assurées par la centrale IG-500N en cours d'amélioration pour atteindre les précisions requises. Ces précisions sont nécessaires lors du vol stationnaire afin d'éviter les dérives de l'appareil utilisé dans des conditions venteuses.

Des tests du GPS U-Blox 4 avaient montrés qu'après un catapultage, le signal GPS était indisponible pendant environ 25 secondes. De nouveaux tests avec un GPS U-Blox 6 intégré dans la centrale IG-500N ont été menés durant le printemps 2012 et ils montrent que la perte GPS passe de 25 secondes à 3 secondes avec un comportement du GPS plus stable. Malgré ces bons résultats, un tube de Pitot a été intégré à la carte électronique afin de sécuriser la mesure de vitesse durant la phase balistique.

2.3.1 Sous-tâche 1 – réalisation d'un prototype électronique

L'objectif est de développer et réaliser un autopilote permettant de commander en temps réel les actionneurs embarqués sur le GLMAV, à partir de lois des commandes exécutées par un processeur embarqué et des mesures provenant des capteurs embarqués.

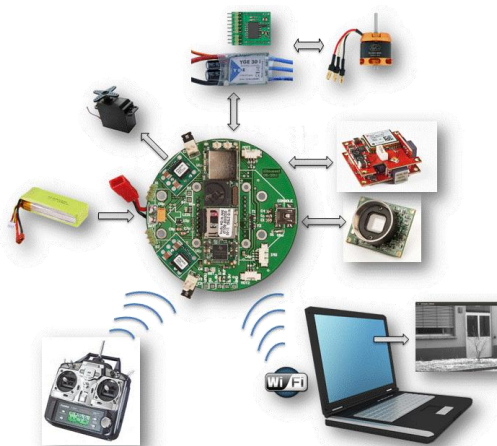


Fig. 8 : synoptique des éléments du GLMAV

Le prototype (Fig. 8) décrit dans [12] ne subit plus que des aménagements d'optimisation et de fiabilisation. Cependant, le programme embarqué est adapté et évolue constamment en fonction des besoins des utilisateurs, suite aux essais de pilotage des maquettes GLMAV-Lite.

2.3.2 Sous-tâche 2 – amélioration de la précision de la centrale inertielle

Dans une première phase, il est nécessaire de mettre en place une série d'expériences permettant de mesurer et valider la précision des capteurs embarqués vis-à-vis des besoins de navigation du GLMAV. Un banc de test a été réalisé à l'ISL, afin de simuler très précisément les mouvements du GLMAV durant différentes phases de vol (Fig. 9).



Fig. 9 : rotule 3D motorisée

SBG Systems a poursuivi l'étude du comportement aux vibrations de la centrale IG-500N et en particulier la tenue des capteurs d'accélération ADXL 320 et ADXL 321 a été testée. Afin de compléter ces tests, et en particulier de mieux valider le comportement du filtre utilisé par la centrale pour calculer son orientation, des interfaces mécaniques ont été réalisées pour permettre de simuler l'attitude de l'IG-500N sur les axes X, Y et Z.

L'amélioration de la précision de l'IG-500N par SBG Systems se déroule en deux étapes. La première consiste à augmenter la qualité des capteurs embarqués (rotation, accélérations, GPS, ...). La seconde partie porte sur l'optimisation des algorithmes utilisés pour calculer une orientation et une position 3D à partir des valeurs brutes des capteurs.

Pour améliorer la calibration des accéléromètres et gyromètres, SBG Systems a développé une nouvelle interface mécanique (Fig. 10). L'objectif est de garantir un meilleur alignement de la centrale sur les outils de calibration pour éliminer de fait de nombreuses sources d'imprécisions.

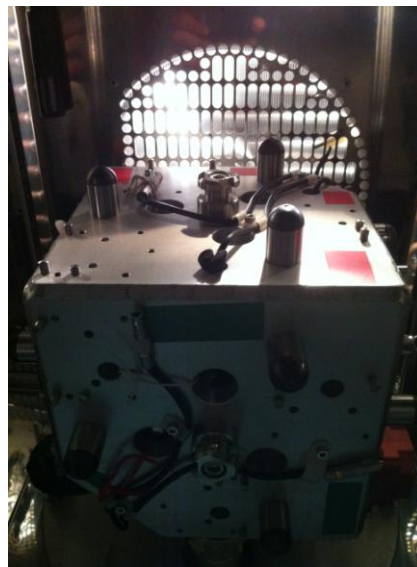


Fig. 10 : nouvelle interface de calibration

Cette nouvelle interface permet de garantir à la fois un alignement de la centrale à mieux que $0,05^\circ$ avec l'outil d'étalonnage ainsi qu'une orthogonalité meilleure que $0,01^\circ$. En conséquence, la calibration des gyromètres et accéléromètres devrait être améliorée par un facteur 2 pour les paramètres de gain et de désalignement des capteurs. Cependant, il reste encore de nombreuses validations et tests avant de pouvoir utiliser cette interface pour recalibrer les centrales utilisées dans le projet GLMAV.

Un autre point sur lequel SBG Systems travaille activement est une nouvelle procédure de calibration du gain et de la linéarité des accéléromètres. Il a été démontré précédemment que les accéléromètres 18 g utilisés pour le projet GLMAV souffraient d'une non linéarité importante. Les premiers résultats de ce nouveau procédé devraient être disponibles début 2013.

De nouveaux gyromètres sont disponibles depuis peu. Ils sont parfaitement compatibles avec les capteurs utilisés jusqu'à présent et plus performants et ne nécessitent que très peu d'efforts pour les intégrer. Avant d'intégrer ces nouveaux capteurs dans la centrale inertielle du GLMAV, SBG Systems a procédé à des tests visant à mieux caractériser le comportement de ces capteurs en température. En effet, les données des fabricants sont souvent incomplètes, voire erronées, aussi il est commun de revalider les spécifications des constructeurs en configuration inertielle. Malheureusement, les premiers tests ont montré que ces capteurs avaient une dérive très importante en température, bien plus que les capteurs utilisés actuellement. Ces problèmes de dérive en température sont rédhibitoires et ne permettent pas de les utiliser dans une application réelle.

Le nouvel algorithme de fusion des données a été implanté sur les centrales du GLMAV et doit être testé d'ici la fin de l'année 2012. Les données recueillies durant

des vols réels permettront de peaufiner encore les réglages afin d'obtenir la précision de 1° recherchée.

2.3.3 Sous-tâche 3 – durcissement de l'électronique

Le procédé de lancement du drone miniature impose de fortes contraintes en termes de résistance à l'accélération. L'objectif de cette sous-tâche est de durcir l'ensemble de l'électronique embarquée vis-à-vis des accélérations que rencontrera le GLMAV lors de son lancement.

Pour mener à bien le projet, la centrale inertielle doit être caractérisée et également durcie à ces fortes accélérations. Dans ce cadre, l'ISL et SBG Systems travaillent conjointement aux tests et à l'amélioration de l'IG-500N aux fortes accélérations. L'ISL apporte à la fois son expertise et les moyens matériels pour réaliser les tests. SBG Systems fourni les prototypes de centrales à tester et apporte, compte tenu de ses connaissances en capteurs inertiels, les améliorations nécessaires.

Les résultats du durcissement sont exposés à la section 2.2.4 relatives aux essais de tenue à l'accélération des différents composants.

2.4 Tâche 3 – système complet de vision avec transmission des images

Cette tâche consiste à étudier et à réaliser les dispositifs pour l'observation de la scène et pour le pilotage de la plateforme, si possible en stéréovision. Compte-tenu de l'encombrement d'un système vidéo en stéréovision l'ISL a trouvé des solutions disponibles pour coupler le système d'observation de la scène au système de vision pour le pilotage du GLMAV.

Le dispositif a été étudié et une solution a déjà été définie : une caméra « Chameleon Mono Point Grey » associée à une équerre optique qui sépare l'image de 1296 pixels par 964 pixels en deux régions d'intérêt (ROI) de 640 x 480 compatibles avec la bande passante de l'émetteur.



Fig. 11 : montage de test de prises de vues à l'ISL

La figure 11 montre le montage statique de test réalisé à l'ISL qui a permis la prise de vues dans des directions perpendiculaires. La fonction de transfert du montage a été mesurée par l'utilisation d'une mire de référence.

La figure 12 présente un enregistrement des 2 scènes perpendiculaires ainsi que le découpage exploitable pour l'analyse de l'observation. A la demande du GIGN, l'étude sera poursuivie pour déterminer s'il est possible d'identifier des visages dans l'une des 2 scènes, compte tenu de la résolution de la CDD. L'étude sera également poursuivie par des tests dynamiques où le système de vision sera embarqué sur une plateforme volante en attendant la version opérationnelle du GLMAV.

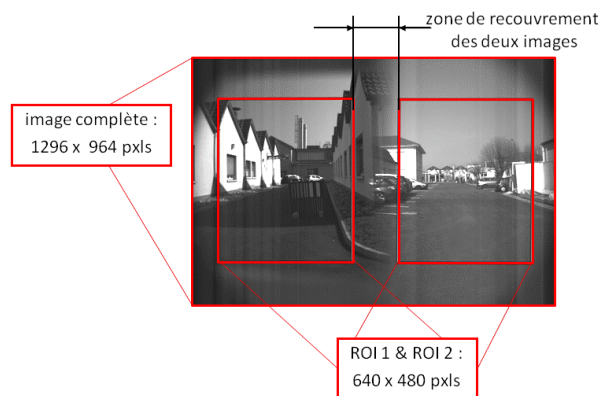


Fig. 12 : vision de 2 scènes avec bi-champ de vue

Il est rappelé que la transmission des flux vidéo est réalisée par le protocole WIFI. Les tests réalisés à l'ISL ont montré la faisabilité d'obtenir un débit de 10 images/s avec un rapport de compression 14:1 lorsque la transmission est réalisée sur une distance supérieure à 500 m. Le temps de latence est évalué à environ 100 ms (acquisition de l'image : 43 ms, compression : 53 ms, transmission : < 8 ms). Ces tests ont également montré la validation du module WIFI intégré au Gumstix pour transmettre les images, la validation du module Xbee @2.4 GHz pour transmettre les commandes de vol, ainsi que leur fonctionnement en simultané.

En même temps, l'étude sur le rayonnement des antennes a montré qu'il est nécessaire de remplacer l'AU4G par du polyéthylène pour les tiges de guidage de la platine des rotors [12]. Ces nouvelles tiges ont été fabriquées mais le diagramme de rayonnement des antennes reste à être établi.

2.5 Tâche 4 – étude de la phase de vol balistique

Cette tâche aborde l'étude de la phase de vol balistique du projectile, afin de maîtriser sa trajectoire. Le deuxième scénario en termes de portée est considéré ; il s'agit donc d'amener le véhicule de manière que l'observation (phase opérationnelle) commence lorsqu'il est à 100 m de hauteur pour 500 m de portée.

La stabilisation du projectile par empennages a été démontrée au terrain d'expériences de l'ISL à l'aide du lanceur de laboratoire. Cependant, les tirs balistiques réalisés avec les projectiles « mulot » n'étaient pas instrumentés pour acquérir une trajectoire de vol. Dès que

la centrale inertielle IG-500N sera intégrée dans l'un des projectiles, l'analyse des signaux enregistrés permettra de valider les simulations obtenues antérieurement et rapportées dans [12].

2.6 Tâche 5 – étude de la phase transitoire de déploiement des rotors

Cette tâche est consacrée à la phase de vol transitoire de transformation du projectile en drone miniature dans le but d'optimiser le déploiement de la plateforme des rotors, l'instant de mise en route des rotors et l'instant de la prise du contrôle du GLMAV par l'autopilote. L'objectif de cette tâche consiste à modéliser et optimiser la phase transitoire du GLMAV afin d'assurer une certaine stabilité tout en basculant du modèle projectile au modèle drone miniature.

2.6.1 Sous-tâche 1 – étude expérimentale

Compte tenu de la difficulté à modéliser un tel déploiement, il est envisagé dans une première partie de faire des expériences en laboratoire puis en soufflerie subsonique de l'ISL pour plusieurs configurations de déploiement des rotors.

Des premiers essais en soufflerie subsonique de l'ISL ont été réalisés à l'aide du montage du type rotule pour examiner la stabilité du projectile empenné. Maintenant que le GLMAV version v2.0 est quasiment réalisé, l'étude expérimentale de la phase transitoire pourra réellement commencer en soufflerie. Les expériences devraient permettre d'obtenir un jeu de données pertinent, permettant de comprendre les phénomènes physiques impliqués par le déploiement des rotors en vol.

2.6.2 Sous-tâche 2 – modélisation de la phase transitoire

La phase de vol transitoire de transformation du projectile en drone miniature doit permettre d'optimiser le déploiement de la plateforme des rotors, l'instant de mise en route des rotors et l'instant de la prise du contrôle du GLMAV par l'autopilote. Une modélisation simplifiée sans tenir compte de l'aérodynamique proprement dite lors du déploiement montre qu'une force d'environ 18 N doit freiner le drone miniature pour atteindre le point de rendez-vous avec une vitesse quasiment nulle

Du point de vue théorique, l'HEUDIASYC a tout d'abord analysé les instants de disponibilité des capteurs pour pouvoir donner des commandes de vol au GLMAV. Il semble que le GPS serait disponible après 3 s d'après SBG Systems, ce qu'il faudra vérifier par des expériences en vol avec la centrale IG-500N. Il est également montré la nécessité de disposer des mesures de l'IMU après 12 secondes de vol en l'absence de vent et 8 secondes en présence de vent. L'HEUDIASYC a proposé une stratégie de commande de vol pour cette phase de transition en absence de signal GPS (Fig. 13).

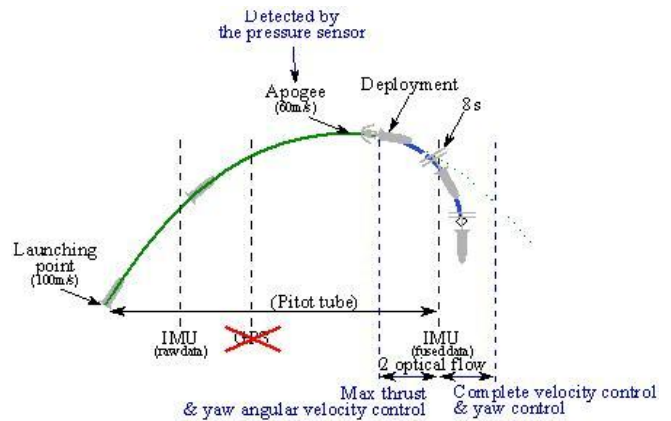


Fig. 13 : stratégie de la commande

En considérant qu'aucune information ne sera disponible pendant cette phase de vol, l'HEUDIASYC développe des lois de commande en vitesse, en intégrant dans le processeur embarqué des algorithmes de flux optique, de manière à avoir une mesure de la vitesse linéaire du GLMAV. Le choix de la caméra, de l'objectif et de la cadence d'acquisition est important pour obtenir une valeur correcte du flux optique car il faut pouvoir localiser des points d'intérêts communs à deux images successives. Le flux optique ajoute une contrainte d'orientation en lacet (ou roulis balistique) car lors de la transition, la caméra latérale doit être dirigée vers le sol pour mesurer la vitesse linéaire du GLMAV : ceci conduit au diagramme de la commande de la figure 14.

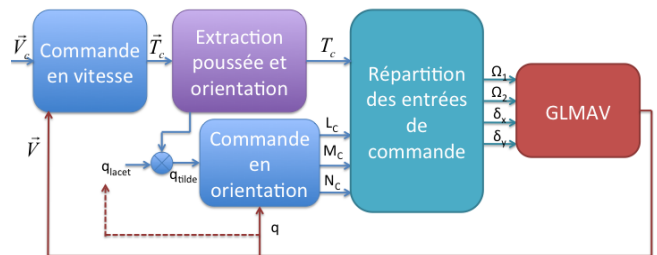


Fig. 14 : commande hiérarchique avec contrôle en lacet

2.7 Tâche 6 – étude de la phase de vol fonctionnel opérationnel

Cette tâche concerne l'étude du vol fonctionnel opérationnel stabilisé pour permettre la prise d'images vidéo rendue difficile par d'éventuelles rafales de vent. Il s'agit dans cette tâche de faire l'analyse et la synthèse de lois de commande garantissant un vol sûr du GLMAV en mode opérationnel qui tient compte des différentes contraintes liées au tir, rafales de vent et incertitudes.

La modélisation fine de la dynamique du birotor consiste en l'obtention d'un modèle dynamique précis de l'évolution en 6 degrés de liberté du birotor GLMAV. Ce modèle prend en compte les effets aérodynamiques dus aux rotors et devra permettre de prédire les effets des rafales de vent sur le mouvement de l'engin. Ce modèle sera utilisé pour la mise au point des lois de commande du birotor et

pour réaliser des essais en simulation de manière à faciliter les essais expérimentaux.

Antérieurement [12], il a été montré que le suivi de trajectoires en présence d'efforts aérodynamiques constants était possible en utilisant des commandes de type backstepping. En revanche, pour des efforts aérodynamiques variables, le suivi de trajectoires n'était plus garanti.

Une loi de commande non linéaire permettant le suivi de trajectoire même en présence d'efforts aérodynamiques variables a été développée par le CRAN. Il s'agit d'une commande linéarisante couplée avec un observateur identifiant les efforts aérodynamiques. Il a été montré que les variables d'état convergent vers leur valeur de référence et que l'estimation des efforts aérodynamiques convergent vers leur vraie valeur. Des résultats de simulation sont présentés aux figures 15 à 17.

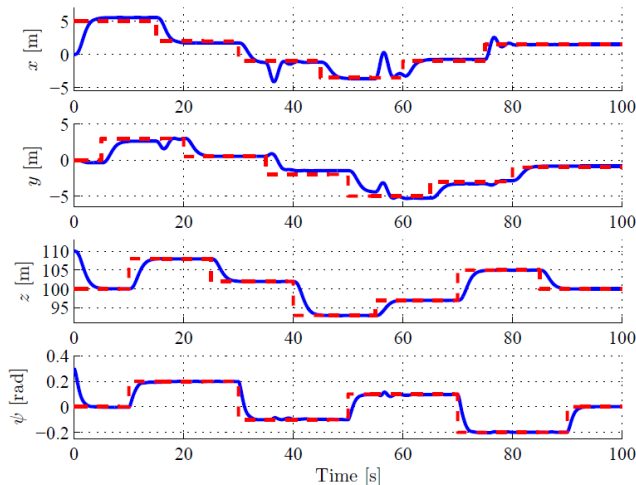


Fig. 15 : position et orientation du drone vis-à-vis des consignes

La figure 15 montre l'évolution des sorties du drone (lignes continues bleues) vis-à-vis des consignes qui lui sont imposées (lignes pointillées rouges). Il est clair que, malgré les perturbations extérieures, le GLMAV parvient à suivre la trajectoire imposée.

La figure 16 illustre l'estimation des efforts (forces et moments) inconnus extérieurs. Les efforts appliqués (lignes pointillées rouges) sont correctement estimés par la loi de commande utilisée (lignes continues bleues).

La figure 17 montre quant à elle les entrées de commande à appliquer au drone pour permettre ce suivi de trajectoire. Pour rappel, les entrées de commande sont les vitesses de rotation des rotors et les angles d'incidence du plateau cyclique. A la figure 17, on voit bien que les entrées de commande ont un comportement borné et n'atteignent pas des valeurs aberrantes.

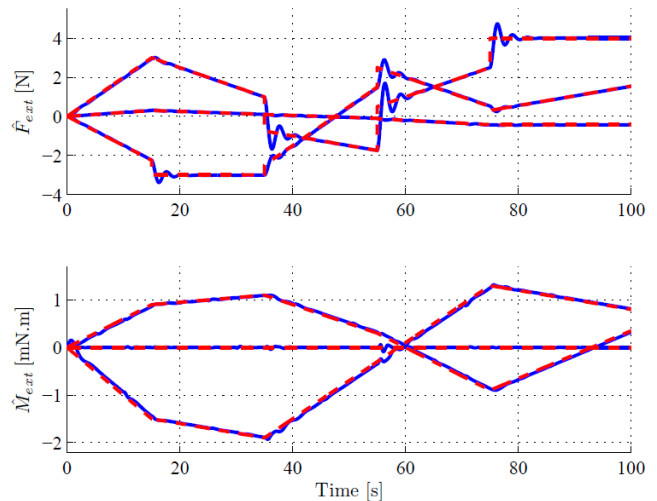


Fig. 16 : estimation des efforts aérodynamiques

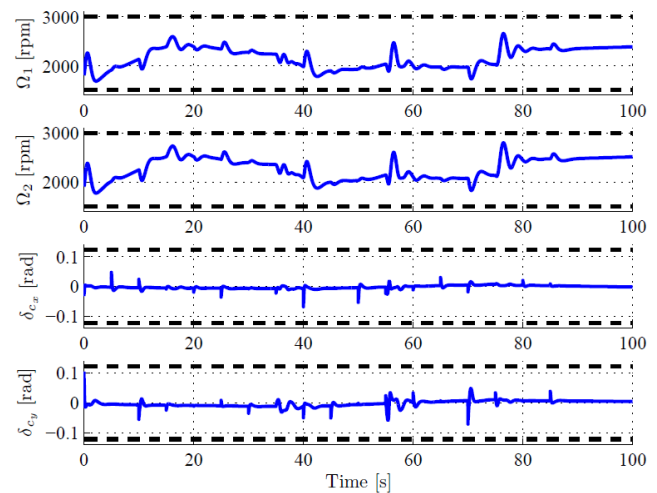


Fig. 17 : entrées de commande

Toutes les lois de commandes seront testées et validées en simulation numérique sous Matlab/Simulink et ensuite avec les codes implantés par l'ISL dans le calculateur embarqué. Les validations expérimentales des lois de commandes mises en place dans le cadre de cette tâche seront faites à l'ISL et au CRAN, à l'aide du personnel et des infrastructures existantes.

2.8 Tâche 7 – analyse système

Pour anticiper les difficultés liées aux travaux de la tâche 6, il a été décidé de minimiser voire de ne pas réaliser les travaux de simulations liés à la présente tâche pour consolider les travaux de la tâche 6 qui sont primordiaux pour le projet.

En effet, les résultats que l'on attend de cette tâche initialement planifiée sont très intéressants et permettraient de mieux optimiser le système pour une industrialisation future. Cependant, cette analyse système n'est pas indispensable pour la finalité du projet qui, rappelons-le, consiste en la réalisation de la faisabilité du système par un vol de démonstration.

2.9 Conclusion

Le lanceur de laboratoire permettant de réaliser les tests à l'accélération des composants du GLMAV est opérationnel même pour les premiers essais balistiques au terrain d'expériences de l'ISL. Les essais de résistance à l'accélération ont montré que la majorité des composants intégrés dans la plateforme résiste à l'accélération de lancement. Cependant, une attention s'est focalisée sur la centrale de navigation IG-500N de SBG Systems qui a nécessité des améliorations en termes de résistance à l'accélération. La plateforme GLMAV a été réalisée en tenant compte des points durs rencontrés. Ainsi, l'aéromécanique du GLMAV version 2.0 a été optimisée à partir de simulations aérodynamiques (tâche 1).

Le développement d'une nouvelle carte électronique du GLMAV est finalisé. Le programme principal est encore en cours de développement ; l'avancement et l'ajustement de celui-ci est très directement lié à l'avancement des autres tâches. SBG Systems poursuit l'étude sur l'amélioration des performances de la centrale inertielle IG-500N, notamment sa résistance aux vibrations parasites. Des travaux d'optimisation des algorithmes de fusion de données devraient aboutir à la centrale inertielle miniature qui équipera le GLMAV. La centrale nouvellement conçue devra encore être validée car les accéléromètres 18 g sont moins sensibles que les versions 5 g et il convient de caractériser précisément l'influence de ces accéléromètres sur la précision de la centrale inertielle (tâche 2).

Concernant la fonctionnalité de vision du GLMAV avec transmission des images, le couplage du système d'observation de la scène au système de vision pour le pilotage du véhicule a été réalisé avec succès et pourra être intégré dans le nez de la plateforme (tâche 3).

La stabilisation du projectile par empennages a été démontrée au terrain d'expériences de l'ISL à l'aide du lanceur de laboratoire. Cependant, les tirs balistiques réalisés avec les projectiles « mulot » n'étaient pas instrumentés pour acquérir une trajectoire de vol afin de valider les simulations balistiques (tâche 4).

Les premières simulations de déploiement montrent que la poussée doit être de l'ordre de 18 N pour freiner le GLMAV jusqu'à une vitesse nulle au point de rendez-vous situé à 500 m de portée et 100 m de hauteur. Ces investigations doivent encore être confirmées par des expériences en soufflerie. La stratégie de pilotage du GLMAV pendant cette phase est encore en cours d'étude (tâche 5).

Un modèle aérodynamique du GLMAV a été expérimentalement validé dans les cas des vols stationnaire et quasi-stationnaire. De plus, les résultats sur l'estimation des perturbations aérodynamiques seront utiles à la synthèse de lois de commande robustes aux perturbations de type rafale de vent. Un contrôleur stabilisant pour le vol quasi-stationnaire est en cours de test sur un prototype simplifié GLMAV-Lite. La synthèse de lois de commande

de haut-niveau pour des domaines de vol complexes, comme l'asservissement sur trajectoire, est en cours de développement (tâche 6).

L'analyse système du concept GLMAV pour vérifier les performances globales du système sera probablement abandonnée au profit de la tâche précédente qui nécessite des travaux d'identification de la plateforme assez conséquent (tâche 7).

L'ensemble des travaux doit conduire à l'issue du projet, à la réalisation d'un démonstrateur d'un projectile se déployant en drone miniature à rotors coaxiaux contrarotatifs. Celui-ci sera durci aux accélérations afin d'être lancé à partir d'un tube dédié. Cet engin permettra d'effectuer de la surveillance aérienne de zone.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement l'Agence Nationale de la Recherche pour le support qu'elle accorde à ce projet dans le cadre du thème « Concepts Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale ».

Les auteurs remercient également le GIGN, la DGA et MBDA-Systems en France de s'être associés au comité de pilotage de ce projet ANR.

Les auteurs de l'ISL remercient A. Blenner, G. Boeglen, D. Chargelègue, F. Christnacher, V. Gassmann, H. Kauffmann, V. Lieby, F. Saada, H. Simon et S. Theodoulis pour leur contribution dans ce projet ANR.

Références

- [1] P. Gnemmi, S. Changey, M. Boutayeb, R. Lozano, R. Siryani. *Conception et réalisation d'un démonstrateur pour un système hybride projectile/drone miniature*. WISG 2010, Troyes, France, 26-27 janvier 2010
- [2] P. Gnemmi, J. Haertig. *Concept du GLMAV (Gun Launched Micro Air Vehicle)*. Rapport ISL N 806/2007, 2007
- [3] P. Gnemmi, J. Haertig. *Gun Launched Micro Air Vehicle : a New Concept for MAV's*. EMAV 2008, Braunschweig, Germany, July 8-10, 2008
- [4] P. Gnemmi, J. Haertig. *Concept of a Gun Launched Micro Air Vehicle*. 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu/Hawaii, USA, August 18-21, 2008
- [5] P. Gnemmi, A. Koehl, B. Martinez, S. Changey, S. Theodoulis. *Modeling and Control of Two GLMAV Hover-Flight Concepts*. EMAV 2009, European Micro Air Vehicle Conference and Competition, Delft, The Netherlands, September 14-17, 2009
- [6] K. Meder. *Conception mécanique de la plateforme GLMAV « Gun Launched Micro Air Vehicle »*. Mémoire d'ingénieur CNAM, Mulhouse, France, 10 juillet 2010.

- [7] A. Koehl, H. Rafaralahy, M. Boutayeb, B. Martinez. *Modeling and Identification of a Launched Micro Air Vehicle: Design and Experimental Results*. Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Toronto Canada, AIAA, 2010.
- [8] A. Koehl, H. Rafaralahy, M. Boutayeb, B. Martinez. *Wind-Disturbance and Aerodynamic Parameter Estimation of an Experimental Launched Micro Air Vehicle Using an EKF-like Observer*. Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, USA, December 2010.
- [9] P. Gnemmi, S. Changey, E. Roussel, K. Meder, A. Koehl, P. Wey, L. Bernard, C. Berner, B. Martinez, M. Boutayeb, R. Lozano, R. Siryani. *Conception et réalisation d'un démonstrateur pour un système hybride projectile/drone miniature. Etat des travaux après 8 mois*. WISG 2011, Troyes, France, 25-26 janvier 2011
- [10] A. Koehl, H. Rafaralahy, M. Boutayeb, B. Martinez. *Time-varying observers for launched unmanned aerial vehicle*. 18th IFAC World Congress, IFAC WC, Milano, Italy, September 2011.
- [11] P. Gnemmi, K. Meder, C. Rey. *Aerodynamic Performances of a Micro Air Vehicle Based on Two Coaxial Counter-Rotating Rotors*. ANSYS Conference & 29th CADFEM Users' Meeting 2011, Stuttgart, Germany, October 19-21, 2011
- [12] P. Gnemmi, S. Changey, E. Roussel, K. Meder, C. Rey, B. Grandvallet, C. Chauffaut, L. Bernard, S. Schertzer, P. Wey, M. Boutayeb, R. Lozano, R. Siryani, A. Koehl. *Conception et réalisation d'un démonstrateur pour un système hybride projectile/drone miniature. Etat des travaux après 20 mois*. WISG 2012, Troyes, France, 24-25 janvier 2012
- [13] C. Chauffaut, E.S. Espinoza, J. Escareno, R. Lozano. *Towards gun - and aircraft - launched mavs : Embedded flight control system*. 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control. Würzburg, Germany, April 3-4, 2012
- [14] P. Gnemmi, S. Changey, M. Boutayeb, R. Lozano, R. Siryani. *Gun Launched Micro Air Vehicle (GLMAV)*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Forum. Poster ISL PO 710/2012, Berlin, Allemagne, 19 avril 2012
- [15] C. Chauffaut, J. Escareno, R. Lozano. *The transition phase of a Gun-Launched Micro Air Vehicle: Nonlinear Modeling and Control*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS'12). Philadelphie, Pennsylvanie, USA, June 12-15, 2012
- [16] A. Drouot, E. Richard, M. Boutayeb. *An Approximate Backstepping Based Trajectory Tracking Control of a Gun Launched Micro Aerial Vehicle*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS'12). Philadelphie, Pennsylvanie, USA, June 12-15, 2012
- [17] E. Roussel, P. Gnemmi, S. Changey. *State of Progress of the Gun Launched Micro Air Vehicle*. International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV 2012), Braunschweig, Germany, July 3-6, 2012
- [18] A. Drouot, E. Richard, M. Boutayeb, S. Changey. *Commande par backstepping pour la poursuite de trajectoires d'un drone projectile miniature*. 7^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2012), Grenoble, 4-6 juillet 2012
- [19] A. Drouot, E. Richard, M. Boutayeb. *Nonlinear Backstepping Based Trajectory Tracking Control of a Gun Launched Micro Aerial Vehicle*. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Co-located Conferences, Minneapolis, Minnesota, USA, August 13-16, 2012