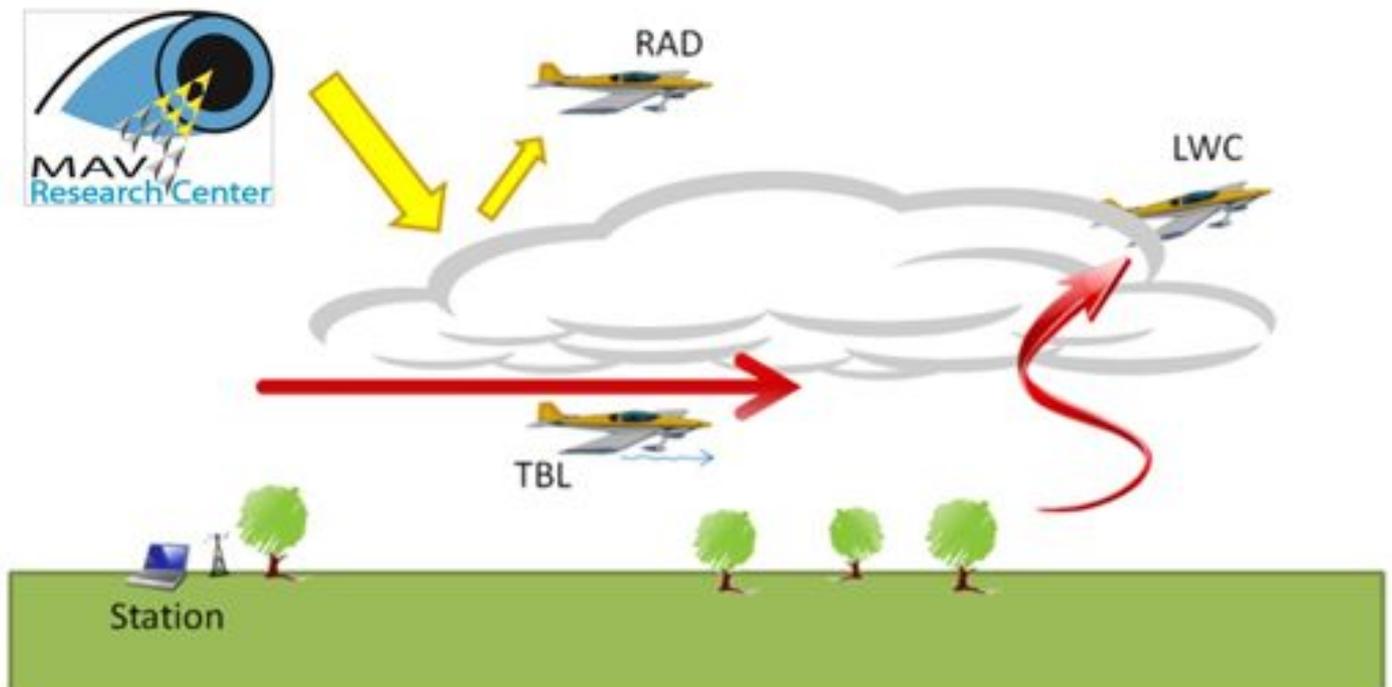




Fondation de Coopération Scientifique Sciences et
Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace

Appel à Projets 2013 Dossier de soumission

SkyScanner



1. FICHE DE SYNTHÈSE - PROJET 2013

Intitulé et acronyme du projet : SkyScanner

Intitulé du chantier ou du groupe de travail dont est issu ce projet : MAV-RC (Micro Air Vehicles Research Center)

Coordinateur du projet :

Simon Lacroix
LAAS/CNRS, 7 Avenue du colonel Roche, BP 54200, 31031 Toulouse Cedex 4
Tél : 05 61 33 62 66 Fax : 05 61 33 64 55
simon.lacroix@laas.fr

Summary

This project defined in the context of the RTRA-supported MAV-RC working group aims at designing long endurance fixed-wing UAVs, and their integration within a fleet for the detailed understanding of the physical mechanisms in the atmospheric boundary layer, in particular in clouds. It integrates fundamental and multidisciplinary researches on atmospheric science, on the conception of innovative UAVs capable of detecting and exploiting air disturbances, on the flight control of such drones, and on the operation of a fleet of drone within wide atmospheric volumes in which air flows are poorly known. These basic researches will rely on experimental developments, that pertain on one hand to single UAV flight tests, and on the other hand to the operation of a small fleet to achieve adaptive atmospheric sampling. To investigate the problems on a larger scale, work on the deployment of distributed simulations incorporating hybrid simulated real drones and actual drones will be developed.

Résumé

Ce projet défini dans le contexte du chantier MAV-RC vise la conception de drones à voilure fixe de très longue endurance, et à leur mise en œuvre au sein d'une flotte pour la compréhension fine des mécanismes physiques se produisant dans la couche limite atmosphérique, et en particulier au sein des nuages. Il intègre des recherches pluridisciplinaires et fondamentales sur les sciences de l'atmosphère, sur la conception de drones innovants capables de détecter et d'exploiter les perturbations aérologiques, sur la commande de tels drones, et sur la conduite d'une flotte de drone au sein de large volumes au sein desquels les flux aérologiques sont mal connus. Ces recherches fondamentales s'appuieront sur des développements expérimentaux destinés à les valider, qui portent d'une part sur la réalisation et l'instrumentation d'un drone exploitant au mieux les perturbations aérologiques, et d'autre part sur le vol coordonné d'une flotte de quelques unités pour des missions d'échantillonnage adaptatif. Afin d'étudier les problèmes à une plus large échelle, des travaux sur le déploiement de simulations distribuées hybrides intégrant drones réels et drones simulés seront développés.

Laboratoires partenaires et responsables scientifiques associés

1 : LAAS/CNRS

4 : CNRM

2 : ISAE

5 : ONERA

3 : ENAC

Applications envisagées (industrie ou services) ; le cas échéant, entreprises associées

Le projet concerne l'ensemble des acteurs concernés par l'analyse de volumes atmosphériques, à des fins de modélisation scientifique ou d'analyse de situation : météorologues, climatologues, vulcanologues, agences de surveillance de l'environnement et de sécurité civile. Les développements menés peuvent par ailleurs être exploités pour la conception de flottes de drones de surveillance d'environnements naturels ou anthropisés. L'entreprise DelairTech a exprimé son intérêt à suivre les développements menés dans le projet – voir lettre jointe en annexe.

4. PRESENTATION DU PROJET

4.1. Description du projet

Contexte et objectifs

L'exploitation de drones à des fins de mesures de phénomènes aérologiques connaît actuellement un fort développement. Alors que les drones sont largement utilisés pour des applications militaires, ils sont de plus en plus intégrés dans les utilisations civiles, notamment pour la surveillance ; pourtant, la recherche atmosphérique avec les drones reste largement sous-développée. Des chercheurs aux États-Unis ont utilisé les drones pendant la dernière décennie pour aborder les questions du bilan énergétique de la Terre [Corrigan et al., 2008; Ramana et al., 2007; Ramanathan et al., 2007; Roberts et al., 2008], la recherche polaire [Holland et al., 2001; Inoue et al., 2008], et les émissions volcaniques [Diaz et al., 2010]. En Europe, les programmes drones dans la recherche atmosphérique ont été développés dans plusieurs pays, notamment en Norvège et en Allemagne (e.g., Van den Kronenberg et al. [2011], Reuder et al., [2011], Mayer et al., [2010], Speiss et al., [2007]). Mais la compréhension fine des phénomènes aérologiques locaux tels que gradients de vent ou formation de brouillard et de nuages nécessite de nombreuses mesures réparties spatialement et simultanées, ce qu'aucune technologie ne permet d'acquérir aujourd'hui. De telles mesures peuvent être réalisées avantageusement par une flotte coordonnée de micro-drones, qui permettraient de connaître la situation aérologique et son évolution de manière simultanée dans un volume de l'atmosphère, soit un « scan » à 4 dimensions. Cette stratégie s'appuie aussi sur la faculté à raffiner le champ de mesure ainsi échantillonné, et de détecter rapidement les zones où des mesures complémentaires sont nécessaires. En outre, sur le plan opérationnel la mise en œuvre d'une flotte de micro-drones coordonnés représente une alternative extrêmement intéressante à l'emploi de drones de grande taille, en facilitant le déploiement et en faisant décroître de manière considérable le coût d'une opération de surveillance à grande échelle.

L'objectif du projet est donc de définir des solutions et stratégies de déploiement permettant de mettre en œuvre une flotte de micro-drones capable d'échantillonner de manière adaptative des volumes de l'ordre du km^3 . Une telle mission repose sur la capacité à mener des vols assez longs : la principale difficulté réside donc dans l'endurance des micro-drones, qui doit être de l'ordre de quelques heures. Cette endurance est obtenue d'une part par l'optimisation de leur conception et des lois de commande associées, et d'autre part grâce à l'exploitation en ligne de l'ensemble des informations sur les flux aérologiques acquises pour le pilotage de la flotte – lequel pilotage doit justement optimiser l'acquisition des données aérologiques, et ce sur la base d'informations largement incertaines.

Le premier problème donc est celui de la conception de configurations aéro-propulsives innovantes permettant d'assurer des vols de plusieurs heures, et la prise en compte au niveau du pilote automatique des conditions aérologiques locales, parfois difficiles (vents, turbulences, température, humidité). En particulier, les lois de commande et les capteurs embarqués doivent permettre de réagir efficacement à des situations de dépassement de l'enveloppe nominale de vol. Le second problème est posé par la navigation coopérative d'une flotte de micro-drones pour modéliser au mieux un phénomène aérologique découvert au fur et à mesure de l'opération de la flotte : il s'agit de définir les échantillonnages optimaux en fonction de la connaissance courante du phénomène, de l'état et des capacités de vol de chacun de drones impliqués, tout en maximisant l'endurance globale du système. Pour ce faire, il est indispensable de disposer d'un modèle du phénomène observé, en particulier des flux aérologiques, qui permet d'une part de définir les zones de l'espace à échantillonner en temps réel, et qui est d'autre part nécessaire à la définition des trajectoires à réaliser par chacun des drones. La définition de tels modèles pour différents phénomènes (panache, formation de nuage) et leur instanciation à partir des données perçues localement par chacun des drones joue une place centrale dans l'ensemble du projet, et constitue le troisième problème à étudier.

Si l'état de l'art en ce qui concerne les drones couvre maintenant un spectre extrêmement large, très peu de travaux sont menés sur l'étude de drones capables d'exploiter au mieux les perturbations aérologiques locales – à notre connaissance seuls quelques travaux relatifs à « l'atmospheric energy harvesting » sont menés à l'ACFR de Sydney (Lawrence et al. [2009]) et à Stanford (Patel and Kroo [2008]). La situation est analogue en ce qui concerne la mise en œuvre d'une flotte de drones : de nombreux travaux relatifs à la cartographie coopérative ont été proposés, mais les travaux relatifs à l'échantillonnage adaptatif de

l'atmosphère sont beaucoup plus rares (*Boslough [2002], Nguyen et al. [2013]*) : le projet SkyScanner vise à l'étude et la conception de systèmes encore rarement considérés dans la littérature.

Notons qu'au delà de la mesure de phénomènes aérologiques, le développement d'une flotte de drones endurants et capables de coordonner leurs déplacements et observations peut permettre de réaliser des missions d'exploration ou de surveillance de l'environnement dans de nombreux autres contextes : observations de phénomènes naturels au sol, localisation de victimes après catastrophe de grande ampleur, suivi de situation de crise...

Inscription du projet SkyScanner dans le chantier MAV Research Center

Dès sa fondation, deux projets de recherche ont été envisagés pour donner corps à l'ambition scientifique du chantier MAV Research Center. Ces deux projets multidisciplinaires visent à lever des verrous scientifiques dans deux domaines emblématiques de l'utilisation des micro-drones : le vol extérieur (SkyScanner), et le vol indoor (Compact-Explorer). La complémentarité de ces deux propositions tient non seulement à la différence d'environnement dans lesquels évoluent les micro-drones : environnement ouvert avec une dynamique aérologique forte correspondant au cadre de l'étude des phénomènes météorologiques (SkyScanner), et environnement complexe et fortement confiné correspondant au cadre de l'archéologie souterraine (Compact-Explorer). Elle tient également à une grande différence d'approche sur le plan des systèmes embarqués : navigation coopérative d'un essaim de drones, réseau de capteurs et déconflition des trajectoires (SkyScanner), navigation sans GPS en environnement inconnu, fonction « sense & avoid » et cartographie 3D (Compact-Explorer). Elle s'illustre enfin sur le plan conceptuel avec des vecteurs aériens de configurations innovantes alliant forte compacité, endurance et discrétion aérodynamique (Compact-Explorer) et des vecteurs aériens de longue endurance, tolérants aux conditions perturbées et capables d'extraire l'énergie de leur environnement aérologique (SkyScanner).

Méthodologie proposée

Les trois grands problèmes étudiés dans le contexte de SkyScanner constituent naturellement trois axes de recherche, entre lesquels les interactions sont fortes. Il s'agit de travaux de recherche fondamentale, qui seront cependant nourris de conception de prototypes et d'essais en vol.

Axe 1 : Modèles aérologiques (CNRM, LAAS-RIS)

Les nuages sont extrêmement importants pour la prévision numérique du temps et du climat et doivent être bien représentés dans les modèles de prévision. Or la représentation des nuages, en particulier ceux de basse altitude, est la principale source d'incertitude des projections climatiques en terme de précipitation et de variabilité climatique (*Dufresne and Bony [2008]*). Notre connaissance des processus nuageux est en effet encore limitée en particulier en ce qui concerne les interactions entre les nuages et le rayonnement, le couplage avec la dynamique, les transitions de phase dans les nuages convectifs, la formation de précipitations, et l'effet indirect des aérosols.

Des études à fine échelle sont donc actuellement menées afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans les nuages et d'identifier ceux qu'il est nécessaire de paramétrer dans les modèles de grande échelle. Mais les moyens d'investigation sont encore limités en particulier car les plateformes d'observations aéroportées (avion de recherche) ne permettent pas de mesurer simultanément l'ensemble des paramètres et que la résolution des moyens de télédétection n'est pas encore assez fine.

L'objectif est de réaliser des simulations haute résolution (« large eddy simulation ») des principaux types de nuages de couche limite (stratocumulus et cumulus peu profond) afin de bien représenter l'évolution spatio-temporelle de l'atmosphère dans ces conditions représentatives de celles qui seront rencontrées par les drones. Il s'agit d'une part de caractériser la structure dynamique et les écoulements de l'air (clair et nuageux) afin de permettre l'évolution des drones instrumentés dans le volume de mesure et d'autre part d'identifier avec la représentation actuelle des processus les zones clés à échantillonner puis de caractériser leur évolution temporelle afin de définir la séquence de mesures la plus adaptée (voir axe 3). L'étude de l'évolution dynamique des structures sera donc cruciale pour définir la stratégie optimale de vol des drones. Un autre aspect est la définition des moyens de mesure des drones. Ils seront équipés des capteurs

météorologiques permettant de caractériser l'ensemble des paramètres (température, humidité, absorption de lumière solaire, contenu en eau liquide, ...). Cette stratégie doit permettre la validation des modèles actuels et aussi d'acquies des séries de mesures permettant de conduire des recherches expérimentales novatrices sur les processus encore mal représentés comme l'entraînement-mélange d'air clair dans le nuage, la formation des précipitations, le détrainement et l'évaporation de l'air nuageux, et plus généralement sur la dynamique du nuage lui-même et son impact sur son environnement.

Axe 2 : Conception et contrôle de micro-drone endurant (ISAE-DAEP, ONERA-DCSD)

L'objectif est ici d'optimiser un vecteur individuel portant l'instrumentation requise à la quantification des flux. Il s'agit aussi d'augmenter l'autonomie de vol, par exploitation des ressources aérologiques locales : exploitation d'ascendances et de rafales et gradients de vent (« dynamic soaring » – *Lawrance and Sukkarieh [2009], Bonnin et al. [2013]*), tout en assurant des qualités de vol satisfaisantes, à signature énergétique minimale.

Une première phase consistera en la prise en compte de profils statistiques d'ascendances/descendances, dans le contexte des profils de mission proposés, afin de dégager les caractéristiques optimales du drone. Ce travail d'optimisation s'appuiera sur une analyse globale du vecteur, prenant en compte les aspects énergétiques, structurels, aérodynamiques, propulsifs, de charge embarquée (mesures liées à la mission – choix issu des spécifications émanant des Axes 1 et 3) et de gestion du système. En particulier le modèle aérodynamique reposera sur des évaluations par calculs et par essais en soufflerie du modèle statique de l'avion, menant à la construction du modèle en vol (essais en vol). A l'issue de cette étape le vecteur sera totalement défini, et un modèle des performances du drone sera établi pour déterminer les angles et vitesses optimales (polaire) en ascendance et descendance, qui serviront comme signaux de référence. Ce modèle adressera également la caractérisation des paramètres intervenant dans les équations de la dynamique du vol (efficacité gouvernes, réponses statique et dynamique), et prendra en compte les caractéristiques dynamiques de l'instrumentation. Il sera notamment exploité dans les travaux de l'axe 3.

Sur la base de ces modèles de synthèse, les lois assurant de bonnes qualités de vol et un suivi optimal de trajectoire seront déterminées, tout en optimisant la consommation d'énergie et l'efficacité des mesures aérologiques. Plusieurs méthodes sont envisageables : commande optimale, commande robuste, commande modale, commande multi-critères, commande par apprentissage. Une attention particulière sera apportée au protocole d'essai et les manœuvres à suivre pour recalibrer les modèles théoriques du vecteur par estimation et/ou par identification, ce qui permettra d'améliorer les résultats des mesures aérologiques. Ensuite, les lois seront implémentées sur les drones exploités dans la mise en œuvre réalisée dans l'axe 3, ou sur un drone du commerce analogue. A l'issue de ces travaux une première tentative de vol autonome en situation réaliste (ascendances, descendances, rafales ...) sera menée.

Les verrous scientifiques associés à cet axe sont les suivants : (1) optimisation multi-points dans un environnement fortement instationnaire, à contraintes énergétiques, (2) modélisation du micro-drone, (3) optimisation des lois de pilotage, et (4) vol libre autonome.

Axe 3 : Conduite de la flotte de drones : « explore and exploit » (LAAS-RIS, ENAC, CNRM)

Le problème est ici de définir des stratégies de vol qui permettent d'optimiser au mieux les déplacements d'une flotte de drones pour augmenter l'information sur les flux aérologiques de la zone étudiée (ou sur toute autre caractéristique d'intérêt : température, humidité, concentration d'aérosols), tout en minimisant les déperditions énergétiques des drones. Pour ce second point, et contrairement aux développements menés dans l'axe 2 où la consommation d'énergie est optimisée par un seul drone en fonction des perturbations détectées *localement*, c'est la connaissance *globale* de la situation aérologique qui est exploitée pour piloter l'ensemble des drones, afin notamment d'exploiter au mieux les ascendances.

Toute la difficulté réside dans le fait que cette connaissance globale, dont l'acquisition est l'objectif de la flotte, est partielle et incertaine, et que la situation aérologique n'est pas stationnaire. Dans ces conditions la notion de conduite *optimale* de la flotte est mal définie (plus précisément, elle ne peut être définie que relativement à la connaissance courante de la situation, et évolue donc en permanence) : ceci nous semble à

priori exclure les techniques de planification qui raisonnent par étapes bien distinctes (identification des objectifs, définition de plan pour les atteindre, exécution des plans), au profit de techniques d'optimisation qui définissent des incréments de déplacements et les révisent au fur et à mesure de leur réalisation (*Renzaglia et al. [2012]*). Ces techniques se baseront sur les modèles du phénomène aérologique observé définis dans l'axe 1, exploités en fonction des connaissances courantes pour définir le gain d'information associé aux déplacements possibles ; et aussi bien sûr sur les modèles des drones définis dans les travaux de l'axe 2, exploités pour définir les déplacements possibles et les consommations ou gains d'énergie associés. Les recherches menées dans cet axe nécessitent l'étude des différents aspects suivants :

- Identification des flux aérologiques par analyse des trajectoires réalisées par les drones et des mesures de vitesse air embarquées ;
- Définition de trajectoires optimisant la dépense énergétique *et* le gain d'information, et réalisation de ces trajectoires (la plupart des micro-drones à voilure fixe exploitent aujourd'hui des techniques de navigation dites « par points de passage », et ne considèrent pas de telles optimisations) ;
- Définition d'une solution décentralisée de la conduite de la flotte (une approche centralisée se heurtera à une trop grande complexité algorithmique au delà de quelques drones) ;
- Exploitation de schémas d'exploration prédéfinis, tels que le vol « en râteau » : de tels schémas peuvent être requis en début de mission afin d'initialiser la connaissance des flux aérologiques, et aussi en cours de mission pour échantillonner un volume identifié comme étant le siège de phénomènes particuliers ;

Cet axe de travail est par nature « intégrateur ». Il comportera des mises en œuvre (à échelle réduite), et sera aussi l'occasion de développer une solution de simulation distribuée basée sur un simulateur « métier » de dynamique du vol (par exemple JSBSim). Une norme d'interopérabilité comme HLA est un point de départ pour ces travaux, mais des recherches spécifiques doivent être conduites pour le passage à l'échelle d'une part, pour des *simulations hybrides* d'autre part (intégration d'un micro-drone réel dans une flotte et un environnement virtuels).

Pilotage

Le projet sera piloté par un Comité de Pilotage se réunissant deux fois par an. L'une de ces réunions sera organisée dans le cadre du Séminaire projet annuel du MAV Research Center au cours duquel les différents projets portés par le MAV RC seront discutés (projet « Compact-Explorer » et projet « SkyScanner »). Les membres permanents du COPIL du projet « SkyScanner » sont les 5 correspondants scientifiques des établissements partenaires dont les CV sont annexés au présent projet (annexe 3). Selon l'ordre du jour de la réunion bisannuelle, le COPIL invitera au besoin un chercheur ayant contribué au projet sur une question particulière.

Compétences et savoir-faire des partenaires : voir annexe 2.

4.2. Moyens nécessaires au projet

Les principaux moyens demandés sont des post-doctorants qui mèneront les recherches sur les problèmes posés par les trois axes de recherche considérés. Les trois laboratoires impliqués sur les développements expérimentaux (ISAE, ENAC et CNRM) sollicitent par ailleurs un support en petits matériels.

4.2.1. Ressources humaines

Un premier post-doctorant encadré par le CNRM/GAME abordera dès le début du projet des recherches sur la modélisation des phénomènes aérologiques dans la couche limite atmosphérique (Axe 1). Il s'agit de réaliser des simulations numériques à haute résolution (Large Eddy Simulations) avec le modèle de recherche non-hydrostatique Meso-NH de différents cas de couche limite convective avec nuages de basse altitude du type Cumulus peu précipitants et Stratocumulus. Les objectifs de ces travaux sont doubles : affiner la compréhension des mécanismes mis en jeu dans les nuages convectifs peu profonds, en particulier l'entraînement-mélange d'air clair environnant au sein du nuage, le couplage avec la turbulence, la formation des précipitations, et aussi définir des modèles qui permettront de guider l'acquisition des informations pour le pilotage de la flotte. Ce travail doit permettre de définir les stratégies de vol de la flotte

(Axe 3) qui permettront d'exploiter au mieux les mesures météorologiques adaptatives pour la recherche expérimentale des processus physiques et apporter la meilleure connaissance possible du milieu.

Un post-doctorant encadré par l'ISAE-DAEP aura pour tâche de développer les stratégies de conception d'un drone individuel optimisé pour la mission dès le début du projet (Axe 2). L'objectif principal sera d'augmenter l'autonomie de vol, par exploitation des ressources naturelles offertes dans le contexte des mesures météorologiques, soit l'exploitation d'ascendances, la potentielle utilisation de rafales, et de l'énergie solaire. Une première phase consistera en la prise en compte de profils statistiques d'ascendances/descendances, liés à des modèles de mission proposée, afin de dégager les caractéristiques optimales du drone avec une analyse globale du vecteur. À l'issue de cette étude le vecteur sera totalement défini et un modèle des performances du drone sera proposé afin de développer les lois de pilotage compatibles avec l'exploitation optimale des ressources du milieu à sonder.

Un post-doctorant encadré par l'ONERA-DCSD travaillera sur les lois de pilotage permettant de voler au sein d'un nuage tout en minimisant l'énergie pour scanner l'atmosphère selon un profil demandé (Axe 2). Ces travaux seront menés sur la base des avancées réalisées à l'ISA-DAEP, et commenceront à l'issue de la première année du projet. La première étape de la synthèse des lois de pilotage est la description des performances du drone pour connaître les angles et vitesses optimales pour la finesse en ascendance qui serviront comme signaux de référence. Lors de la seconde étape, on développera les modèles de synthèse à partir des équations de la dynamique du vol en s'appuyant sur les mesures disponibles sur les drones (vitesse d'air, vitesse ascensionnelle, vitesses rotationnelles, position et attitude). Basé sur ces références et ces modèles de synthèse, les lois assurant de bonnes qualités de vol et un bon suivi de trajectoire seront déterminées de manière à optimiser la consommation d'énergie et l'efficacité des mesures aérologiques. Plusieurs méthodes sont envisageables : commande optimale, commande robuste, commande modale, commande multi-critères.

Un post-doctorant encadré au LAAS travaillera dès la première année sur la définition de schémas de conduite de la flotte (Axe 2). Doté d'une bonne expérience en techniques d'optimisation, il définira sur la base des travaux commencés au CNRM et à ISAE-DAEP des modèles exploitables des phénomènes aérologiques et de vol des drones – ces modèles seront simplifiés dans un premier temps, afin de pouvoir rapidement commencer à définir des techniques d'optimisation des déplacements. Il concevra ensuite une technique d'optimisation permettant à la flotte d'augmenter la connaissance sur les phénomènes aérologiques (selon des critères définis sur la base des travaux de l'Axe 1), tout en minimisant la dépense énergétique individuelle des drones et globale de la flotte.

Un post-doctorant encadré par l'ENAC travaillera en collaboration avec un post-doctorant du LAAS pour la mise en œuvre de la flotte de drones pendant la seconde année du projet (Axe 3). Son étude se focalisera d'une part sur la mesure et l'estimation des phénomènes aérologiques globaux (type ascendances), et d'autre part sur le suivi de la trajectoire (y compris la problématique de l'évitement de collisions). La première étape vise à fournir une cartographie de l'environnement aérologique permettant d'optimiser le compromis entre performance du vol et atteinte des objectifs de mission. Cela inclut l'étude de l'instrumentation nécessaire, en s'appuyant éventuellement sur les travaux menés dans les axes 1 et 2. La seconde partie concerne la conduite du vol et en particulier le suivi des trajectoires résultants de la planification de mission. Cet aspect intégrera des procédures d'évitement de collision de façon à garantir la sécurité du vol.

Deux post-doctorants (18 mois chacun) seront ensuite impliquée dans la seconde phase du projet, qui commencera au début de la 3ème année du projet :

- Un post-doctorant co-encadré par l'ISAE-DAEP et l'ONERA-DCSD aura la charge de mettre en œuvre les principes définis lors des travaux des 2 premiers post-doctorants recrutés par ces deux partenaires. Il s'agira de concevoir un prototype permettant des essais en vol destinés à valider et affiner les modèles préalablement établis.
- Un post-doctorant co-encadré par le LAAS et l'ENAC aura la charge de mettre en œuvre les méthodes développées lors de la première phase pour l'observation de l'atmosphère par une flotte de drones. Les travaux porteront sur l'étude de l'architecture logicielle et matérielle adaptée à ce type de mission, et sur la mise en œuvre d'essais impliquant d'abord un drone interconnecté à une plateforme de simulation, puis deux ou trois drones.

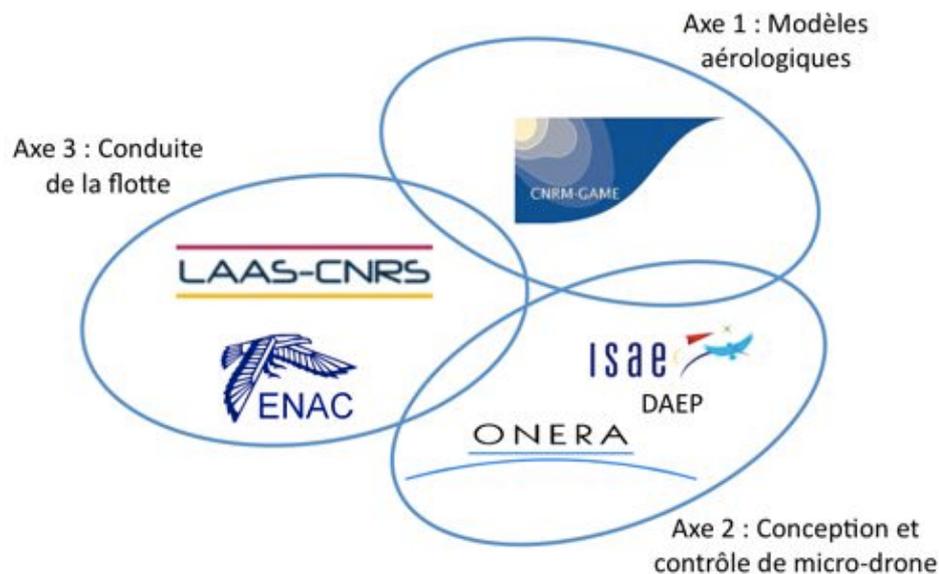
5. ANNEXES

ANNEXE 1 : Références bibliographiques

- M. Boslough. Autonomous Dynamic Soaring Platform for Distributed Mobile Sensor Arrays. Technical report, Sandia National Laboratories, 2002.
- V. Bonnin , C. Toomer , J.- M. Moschetta , E. Bénard « Energy Harvesting Mechanisms for UAV Flight by Dynamic Soaring ». AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference: (Bio-Inspired Flight Mechanics), Boston, August 2013.
- Corrigan, C., G. Roberts, M. Ramana, D. Kim, and V. Ramanathan, Capturing Vertical Profiles of Aerosols and Black Carbon over the Indian Ocean using Autonomous Unmanned Aerial Vehicles, *Atmos Chem Phys*, 8, 737-747, 2008.
- Diaz, J. A., D. Pieri, C. R. Arkin, E. Gore, T. P. Griffin, M. Fladeland, G. Bland, C. Soto, Y. Madrigal, D. Castillo, E. Rojas, and S. Achi, Utilization of in situ airborne MS-based instrumentation for the study of gaseous emissions at active volcanoes, *Int J Mass Spectrom*, 295(3), 105-112, 2010.
- J.-L. Dufresne and S. Bony. An Assessment of the Primary Sources of Spread of Global Warming Estimates from Coupled Atmosphere–Ocean Models. *J. Climate*, 21, 5135–5144, 2008.
- Holland, G. J., P. J. Webster, J. A. Curry, G. Tyrell, D. Gauntlett, G. Brett, J. Becker, R. Hoag, and W. Vaglianti, The Aerosonde robotic aircraft: A new paradigm for environmental observations, *B Am Meteorol Soc*, 82(5), 889-901, 2001.
- Inoue, J., J. A. Curry, and J. A. Maslanik, Application of Aerosondes to melt-pond observations over Arctic Sea ice, *J Atmos Ocean Tech*, 25(2), 327-334, 2008.
- N. Lawrance and S. Sukkarieh. A guidance and control strategy for dynamic soaring with a gliding UAV. IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe, Japan, May 12-17, 2009
- C. Patel and I. Kroo. Theoretical and Experimental Investigation of Energy Extraction from Atmospheric Turbulence. 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage AK, Sept. 2008.
- Mayer, S., A. Sandvik, M. Jonassen, and J. Reuder, Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models, *Meteorol. Atmos. Phys.*, DOI10.1007/s00703-00010-00063-00702, 2010.
- J. Nguyen, N. Lawrance, R. Fitch and S. Sukkarieh. Energy-Constrained Motion Planning for Information Gathering with Autonomous Aerial Soaring. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013
- Ramana, M., V. Ramanathan, D. Kim, G. Roberts, and C. Corrigan, Albedo, Atmospheric Solar Absorption, and Atmospheric Heating rate measurements with light weight Autonomous stacked UAVs, *Q J Roy Meteor Soc*, 133, 1913-1931, 2007.
- Ramanathan, V., M. Ramana, G. Roberts, D. Kim, C. Corrigan, C. Chung, and D. Winker, Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, 448, 575-578, 2007.
- A. Renzaglia, L. Doitsidis, A. Martinelli, E. Kosmatopoulos. Multi-robot three-dimensional coverage of unknown areas. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 31, Num 6, 2012
- Reuder, J., M. Ablinger, H. Agustsson, P. Brisset, S. Brynjolfsson, M. Garhammer, T. Johannesson, M. Jonassen, R. Kühnel, S. Lämmlein, T. de.Lange, C. Lindenberg, S. Malardel, S. Mayer, M. Müller, H. Olafsson, O. Rögnvaldsson, W. Schäper, T. Spengler, G. Zängl, and J. Egger, FLOHOF 2007: An overview of the mesoscale meteorological field campaign at Hofsjökull, Central Iceland, *Meteorol. Atmos. Phys.*, DOI: 10.1007/s00703-00010-00118-00704, 2011.
- Roberts, G., M. Ramana, C. Corrigan, D. Kim, and V. Ramanathan, Simultaneous observations of aerosol-cloud-albedo interactions with unmanned aircraft, *PNAS*, 105, 7370-7375, 2008.
- Spieß, T., J. Bange, M. Buschmann, and P. Vörsmann, First Application of the Meteorological Mini-UAV 'M2AV', *Meteorol. Z. N. F.*, 16(2), 159–169, 2007.
- Van den Kronenberg, A., S. Martin, F. Beyrich, and J. Bange, Spatially-Averages Temperature Structure Parameter Over a Heterogenous Surface Measured by an Unmanned Aerial Vehicle, *Boundary-Layer Meteorology*, DOI: 10.1007 /s10546-10011-19662-10549, 2011.

ANNEXE 2 : Présentation des équipes partenaires

Le projet réunit 5 partenaires impliqués dans le chantier MAV-RC, qui se connaissent (certains ont déjà collaboré de manière directe à l'occasion d'autres projets), et dont les domaines de compétences sont complémentaires et recouvrent l'ensemble des défis scientifiques posé par la mise en œuvre d'une flotte de micro-drones pour l'observation de l'atmosphère. La figure suivante synthétise les relations entre les partenaires pour chacun des grands axes de recherche identifiés dans le projet, et les compétences des partenaires relatives aux travaux à mener sont ensuite résumées.



LAAS-CNRS Le groupe RIS du LAAS a une grande expérience du spectre des problèmes posés par le déploiement d'équipes de robots : planification de déplacements coordonnés, planification de tâches coopératives, techniques d'allocation de tâches, localisation multi-robots... Ces travaux ont été abordés dans différents contextes : robot transbordeurs [1], drones d'observation [2], vol en formation (en collaboration avec le partenaire ENAC) [3], coopération entre robots terrestres et drones [4], détection de cibles sous-marines [5]. En particulier, le laboratoire a développé une forte expertise sur les *architectures décisionnelles* qu'il est nécessaire de mettre en œuvre au sein de tels systèmes [5,6], qui permet de spécifier, d'organiser et de superviser l'exécution des différentes fonctionnalités embarquées à bord des robots, particulièrement dans un contexte distribué imposé par les contraintes sur les communications entre les robots.

- [1] R. Alami, S. Fleury, M. Herrb, F. Ingrand, F. Robert. Multi Robot Cooperation in the Martha Project. In *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5, N° 1, March 1998.
- [2] A. Ollero, S. Lacroix, et al. Multiple Eyes in the Sky: Architecture and Perception issues in the COMETS Unmanned Air Vehicles Project. In *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(2):46-57, June 2005.
- [3] G. Hattenberger, R. Alami, S. Lacroix. Planning and control for Unmanned Air Vehicle formation flight. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing (China)*, 2006.
- [4] S. Lacroix, G. Le Besnerais. Issues in cooperative air/ground robotic systems. In *13th International Symposium on Robotics Research, Hiroshima (Japan)*, 2007.
- [5] A. Belbachir and F. Ingrand and S. Lacroix. A Cooperative Architecture for Target Localization using Multiple AUVs. In *Intelligent Service Robotics*, Vol 5, Num 2, April 2012.
- [6] An Architecture for Autonomy. R. Alami, R. Chatila, S. Fleury, M. Ghallab, F. Ingrand. In *International Journal of Robotics Research*, Vol 17, N° 4, April 1998.



Au CNRM, l'équipe MNPCA a développé une expertise de niveau international en mesure des aérosols et des particules nuageuses au sol et aéroportées, ainsi que dans le développement des charges utiles pour les drones. Les sujets de recherche spécifiques à MNPCA sont 1) étude de processus physiques, en particulier la turbulence et les nuages dans la couche limite, la microphysique des nuages ; 2)

mesures in-situ et à distance de paramètres d'état de l'atmosphère et des flux turbulents ; 3) développement instrumental et méthodologique des mesures au sol et aéroportées de particules et de nuages.

Dr. Gregory Roberts est chercheur CNRS au CNRM-GAME à Toulouse. Ses recherches portent sur le développement de l'*instrumentation* miniaturisée pour les drones et les interactions aéro-sol-nuage. Il coordonne un projet drone pour étudier le brouillard en utilisant une approche d'observation multidimensionnelle (VOLTIGE ; ANR Blanc 2012). Il est aussi représentant de la France dans l'Action COST ES0802 (Unmanned Aerial Systems in Atmospheric Research). Dr. Frédéric Burnet est chercheur Météo France au CNRM-GAME, responsable de l'équipe GMEI/MNPCA. Ses recherches portent sur les processus microphysiques des nuages chauds avec un intérêt particulier pour l'entraînement-mélange, la formation de précipitations et les effets indirects des aérosols. F. Burnet coordonne la contribution du CNRM au projet PreViBOSS (RAPID DGA 2010-2013) dédié à l'étude expérimentale du brouillard.

[1] Roberts, G., et al., *Simultaneous observations of aerosol-cloud-albedo interactions with unmanned aircraft*. PNAS, 105: p. 7370-7375, 2008.

[2] Ramanathan, V., M. Ramana, G. Roberts, D. Kim, C. Corrigan, C. Chung, and D. Winker, *Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption*, Nature, 448, 575-578, 2007.

[3] Ramana, M., V. Ramanathan, D. Kim, G. Roberts, and C. Corrigan, *Albedo, Atmospheric Solar Absorption, and Atmospheric Heating rate measurements with light weight Autonomous stacked UAVs*, Q J Roy Meteor Soc, 133, 1913-1931, 2007.

[4] Corrigan, C., G. Roberts, M. Ramana, D. Kim, and V. Ramanathan, *Capturing Vertical Profiles of Aerosols and Black Carbon over the Indian Ocean using Autonomous Unmanned Aerial Vehicles*, Atmos Chem Phys, 8, 737-747, 2008.

[5] Brenguier J.-L., F. Burnet and O. Geoffroy, 2011: *Cloud optical thickness and liquid water path. Does the k coefficient vary with droplet concentration?* Atmos. Chem. Phys., 11, 9771-9786, doi: 10.5194/acp-11-9771-2011.

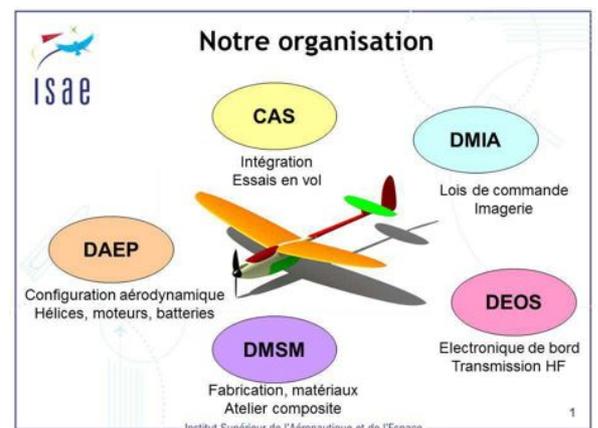
[6] Burnet F., and J.-L. Brenguier, 2007: *Observational study of the entrainment-mixing process in warm convective clouds*. J. Atmos. Sci., 64, 1995-2011.



L'ISAE conçoit et réalise des systèmes de drones depuis environ 15 ans et s'intéresse à la fois aux drones de type avion ou de type vol stationnaire. Trois

des cinq départements de l'ISAE contribueront au projet Sky-Scanner. Le Département Aérodynamique, Énergétique et Propulsion (DAEP) de l'ISAE s'intéresse plus particulièrement aux aspects aérodynamique, propulsion, interaction aéropropulsive et aéroacoustique. Le Centre Aéronautique et Spatial (CAS) est quant à lui spécialisé dans la partie conception système, métrique de performances, analyse des qualités de vol et conduite des essais en vol. Le Département Mathématiques, Informatique et Automatique (DMIA) pour la synthèse des lois de commande, l'architecture du système embarqué et la réalisation des lois de navigation.

Le Département Mathématiques, Informatique et Automatique (DMIA) pour la synthèse des lois de commande, l'architecture du système embarqué et la réalisation des lois de navigation.



Une action emblématique de l'effort portant sur les drones de longue endurance est le projet Projet MIDLE. Il s'agit d'un système de mini-drone (moins de 2 kg, envergures allant de 1m pour le drone Eternity à 1,60 pour le DT16) de type avion configuration classique destiné à réaliser des missions de surveillance de type longue endurance [1]. Ce système est appelé à être équipé de cellules

photovoltaïques disposées sur l'extrados de l'aile dans le but d'accroître l'endurance. A terme, la même architecture embarquée développée au DMIA équipera ce système. Des études ont aussi été démarrées pour proposer des stratégies liées à l'exploitation d'énergie de la masse d'air (utilisation de thermique, du relief terrestre, d'effets de rafale...) [2]. En particulier il sera envisagé de mettre au point des critères d'utilisation / d'abandon de telles sources de courant ascendants afin d'automatiser le pilotage et ce en relation avec une instrumentation de type variométrie parfaitement adaptée aux types de détection désirée.

[1] M. Bronz, J.-M. Moschetta, P. Brisset, M. Gorraz, « Towards a Long Endurance MAV », International Journal of Micro Air Vehicles, Volume 1, Number 4, pp. 241-254, December 2009.

[2] V. Bonnin , C. Toomer , J.- M. Moschetta , E. Bénard « Energy Harvesting Mechanisms for UAV Flight by Dynamic Soaring ». AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference: (Bio-Inspired Flight Mechanics), Boston, August 2013.

ONERA

Le Département de Commande des systèmes et Dynamique du vol (DCSD) de l'Onera mène des recherches et développements sur la modélisation et la commande de systèmes aérospatiaux (aéronefs à voilures tournantes ou fixes, lanceurs, satellites, ...). Il comprend environ 85 ingénieurs de recherche et 20 doctorants, et est structuré en 3 axes complémentaires. Les recherches qui seront menées dans le contexte de SkyScanner relèvent principalement de l'axe Identification des Systèmes et de l'axe Commande de Vol.



L'équipe drones de L'ENAC a une activité mini et micro-drone qui fait intervenir de nombreuses disciplines : mécanique du vol, électronique, informatique [4]. Des travaux ont également été menés plus spécifiquement sur le contrôle d'une flotte de drones [2,3]. Un système complet pour micro et mini drones, dénommé Paparazzi [1], a été développé en OpenSource (licence GPL V2). De nombreuses coopérations avec les laboratoires de l'ENAC et des laboratoires étrangers ont vu le jour à cette occasion [6]. L'équipe Drones contribue également au développement de nouvelles applications civiles pour les drones (en particulier météorologiques [5], en coopération avec le partenaire CNRM/GAME) et, en coopération avec la DGAC, aux évolutions réglementaires nécessaires à l'insertion des drones dans l'espace aérien.

[1] Brisset, Drouin, Gorraz, Huard et Tyler, The Paparazzi Solution, MAV06, 2006.

[2] P.S. Huard, N. Barnier, and C. Pralet, Automated mission planning for a fleet of micro air vehicle. In Proc. of the 3rd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicle and 7th European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (MAV07), Toulouse, France, 2007

[3] P. Brisset and G. Hattenberger, Multi-UAV control with the Paparazzi system. In proceedings of the Conference on Human Operating Unmanned Systems (HUMOUS'08), Brest (France), 2008

[4] Murat Bronz, Jean-Marc Moschetta, Pascal Brisset and Michel Gorraz, Towards a Long Endurance MAV. IJMAV Volume 1 – Number4, 2009

[5] Mayer, Hattenberger, Brisset, Jonassen and Reuder, A "no-flow-sensor" wind estimation algorithm for unmanned aerial systems. In International Journal of Micro Air Vehicles, Volume 4, N°1, March 2012

[6] Balazs Gati. Open Source Autopilot for Academic Research – The Paparazzi System. Proceeding of the American Control Conference 2013, 17-19. Juni 2013, Washington, USA; accepted, under publication