Ballons dirigeables autonomes

Simon Lacroix
LAAS/CNRS
7, Ave du Colonel Roche
31077 Toulouse Cedex 4
Simon.Lacroix@laas.fr

Résumé

Depuis une petite dizaine d'années, les ballons dirigeables connaissent un certain succès dans la communauté robotique, et chaque année voit de nouveaux projets se concrétiser dans les laboratoires. L'objet de cet article est de faire le point sur ces activités, en recensant les principaux travaux réalisés et en identifiant les points durs qui restent encore à résoudre pour que ces projets débouchent sur des applications effectives. Après une brève introduction sur les différents aspects propres aux ballons dirigeables (historique, technologies et applications), les principaux projets de robotisation de ballons dirigeables sont présentés. L'article se conclut par une discussion sur les travaux à mener et les perspectives futures.

1 Introduction

Bien que déjà opérationnels depuis plus 10 ans, les drones intéressent de plus en plus la communauté des roboticiens. D'une part le développement des technologies permet d'envisager des concepts innovants, pour lesquels la commande de vol commence seulement à être étudiée, notamment dans la famille des drones à voilure tournante. D'autre part, il s'agit aussi d'étendre les capacités opérationnelles de ces engins, en passant de *l'automatique* qui permet de réaliser des trajectoires pré-programmées à *l'autonomie*, qui permet de réaliser des missions plus complexes, en considérant notamment les informations fournies par la perception de l'environnement survolé.

Les ballons dirigeables font partie des vecteurs considérés, et de nombreux projets de ballons dirigeables autonomes ont récemment vu le jour dans différents laboratoires. Ces engins ont une place un peu à part, et présentant vraisemblablement des intérêts opérationnels dans certains contextes. L'objet de cet article est de faire un point sur les travaux menés, et d'essayer d'entrevoir l'avenir de tels systèmes.

Après un très bref rappel historique, la section 3 donne brièvement quelques éléments techniques sur les ballons dirigeables, et la section 4 mentionne les différentes applications de ces engins. La section 5 présente les principaux projets de ballons dirigeables autonomes. Enfin, l'article se conclut par une brève discussion.

2 Bref historique

Il ne s'agit bien entendu pas de présenter ici en détail l'histoire des technologies des ballons dirigeables (de nombreux ouvrages et sites web existent sur le sujet - par exemple [30]), mais les grandes lignes de cette histoire sont utiles à connaître, notamment pour mettre en perspective le potentiel des ballons dirigeables.

Après les vols en ballons *non dirigeables* durant la première moitié du XIX^{me} siècle, le premier vol en ballon motorisé a été réalisé par H. Gifffard en 1852 (à bord d'un ballon de 300 m^3 d'hydrogène mû par un moteur... à vapeur !), mais le premier vol en ballon à proprement parler *dirigeable* a été réalisé par deux officiers français en 1884. La fin du XIX^{me} siècle a vu de nombreux progrès réalisés, et le développement des moteurs à explosion a permis la réalisation d'engins opérationnels. Les premières applications effectives ont vu le jour au début du XX^{me} siècle, en Grande Bretagne, en France et particulièrement en Allemagne où plus de 40000 passagers ont été transportés à bord de Zeppelins entre 1910 et 1914. Pendant le premier conflit mondial, quelques ballons ont été utilisés pour des missions de reconnaissance, mais ils ont été bien vite armés, et plusieurs dizaines de ballons allemands ont été utilisés lors de raids au dessus de Londres et Paris. Ces opérations on cessé en 1917, à cause de leur vulnérabilité face aux progrès des plus lourds que l'air.

L'entre-deux-guerres apparaît véritablement comme l'âge d'or des ballons dirigeables, avec les liaisons transatlantiques réalisées par les Zeppelins bien entendu, mais aussi avec des expéditions polaires et des développements militaires britanniques et américains. Mais cette période est aussi émaillée de catastrophes retentissantes. Durant le second conflit mondial, de très nombreux ballons sont exploités par la marine américaine, avec pour fonction d'escorter les navires et de les aider à détecter les sous-marins.

Les ballons dirigeables ont ensuite connu une véritable traversée du désert jusqu'au début des années 70, avec la réapparition de ballons modernes exploités à des fins publicitaires (les célèbres "Good-Year"). À partir de cette période, de nombreux projets de recherche visant à des systèmes permettant de transporter des charges très lourdes où à maintenir en l'air une charge utile pendant de très longues durées ont aussi été étudiés dans le monde.

L'histoire du développement et de l'utilisation des ballons dirigeables est bien entendu indissociable de celle des plus lourds que l'air : les différents records établis par les engins aériens (distance, temps de vol, altitude) ont d'abord tous été établis par des ballons, avant d'être rapidement battus par des avions, et le même schéma s'est reproduit avec les applications des engins aériens, qui ont d'abord été réalisées par des ballons. Cependant, nous verrons dans la section 4 qu'il existe des applications pour lesquelles les ballons présentent toujours un intérêt opérationnel ou économique certain.

La situation aujourd'hui

Depuis la "renaissance" des ballons dirigeables au début des années 1970, le nombre de ballons pilotés stagne à un très faible niveau : en 2000, seulement 30 ballons étaient homologués et en service dans le monde entier, dont la moitié aux États-Unis [24], et la situation a peu évolué depuis. Ces engins sont essentiellement dédiés à des opérations promotionnelles, voire à des "vols de croisières", et parfois pour des missions d'observation ou de surveillance (ainsi lors des JO d'Athènes en 2004). Bien plus nombreux sont les petits ballons radio-commandés, mais ils sont aussi principalement utilisés pour des opérations de communication commerciale.

Mais l'évolution des technologies semble indiquer la possibilité du développement de nouveaux systèmes opérationnels - même si les esprits les plus critiques ne manquent pas de remarquer que s'il en est ainsi depuis près de trente années, aucune application industrielle sérieuse n'a vu le jour depuis. Les évolutions qui laissent espérer un retour effectif des ballons dirigeables sont essentiellement liées aux matériaux, à la meilleure compréhension de lois qui régissent le vol des ballons, et à l'optimisation des rendements des systèmes de propulsion. Les modèles "NT", derniers nés de la compagnie Zeppelin, dont un exemplaire promène régulièrement des passagers amateurs au dessus du lac de Constance depuis quelques années, sont tout à fait représentatifs de ces progrès technologiques.

La communauté académique et industrielle est très active : des conférences "Lighter than air" sont organisées aux État-Unis tous les deux ans par l'American Institute of Aeronautics and Astronautics, et en alternance l'association britannique Airship Association [1] organise en Europe les "Airship Conventions and Exhibitions" - cette dernière association édite par ailleurs un bulletin d'actualités trimestriel très complet. En France, l'association Aerall organise de manière moins régulière des rencontres autour des ballons dirigeables [2].

3 Quelques éléments techniques

Les technologies impliquées dans la conception des ballons dirigeables sont très nombreuses, et font appel à des domaines variés (aérodynamique, matériaux, systèmes de propulsion...). L'inventivité des chercheurs et ingénieurs dans le domaine a été est est toujours très grande, et la majorité des communications données dans les conférences porte sur ces aspects. Nous rappelons ici juste quelques notions élémentaires - le lecteur intéressé pourra se rapporter à [21], ouvrage qui fait référence en la matière.

3.1 Notions de bases

La principale caractéristique des ballons dirigeables est bien entendu que leur sustentation est principalement dûe à la poussée d'Archimède : cela a directement une conséquence bénéfique sur leurs besoins énergétiques, qui sont essentiellement requis pour leur déplacements et non pour leur maintien en vol. De nos jours plus aucun ballon dirigeable n'est gonflé à l'hydrogène pour des raisons évidentes de sécurité, et la grande majorité utilise de l'hélium[1], quelques rares prototypes fonctionnant à vapeur, voire à air chaud.

Notons cependant que l'expression "plus léger que l'air" est impropre : la densité de tout ballon dirigeable doit *toujours* être légèrement supérieure à celle de l'atmosphère où il évolue, sans quoi il devient quasiment incontrôlable. Le supplément de portance nécessaire à leur maintien en vol est obtenu soit grâce à des effets aérodynamiques provoqués par une vitesse de déplacement et une inclinaison de l'enveloppe ou de surfaces de contrôle, soit grâce à des actionneurs qui propulsent de l'air vers le bas (voir section 3.3). La maintien d'une densité constante par rapport à l'atmosphère où le ballon évolue doit lui aussi être contrôlé, pour pallier les variations de température et de pression de l'atmosphère, mais aussi la variation de masse du ballon dûe à la consommation de carburant : cela est le plus souvent réalisé grâce à des "ballonnets", petites enveloppes localisées à l'intérieur de l'enveloppe principale, remplies d'air et dont la pression est contrôlée. Le contrôle de la pression des ballonnets modifie aussi leur volume, assurant ainsi indirectement un contrôle de la pression de gaz porteur, ce qui permet de maintenir la forme des enveloppes souples. Pour les ballons les plus sophistiqués, les ballonnets sont aussi utilisés pour contrôler l'équilibrage.

Les effets de la loi dite des "carrés-cubes" sont utiles à connaître : il s'agit tout simplement des conséquences du fait que la surface d'une enveloppe croît avec le carré de sa taille, tandis que le poids du gaz qu'elle embarque croît avec le cube de sa taille. La première conséquence est que le ratio charge utile embarquable / poids de l'enveloppe est plus favorable quand la taille du ballon grandit, mais la conséquence la plus importante est que la sensibilité aux perturbations aérologiques diminue avec la taille d'un ballon, ces perturbations étant proportionnelles à la surface de l'enveloppe, tandis que l'inertie d'un ballon est bien entendu proportionnelle à son poids.

3.2 Types de dirigeables

On distingue trois types de ballons dirigeables :

– Les dirigeables rigides (tels les Zeppelin des années 30),

[1] La densité relative de l'hélium fait que l'on considère en première approximation qu'un m^3 d'hélium permet de soulever 1 kg.

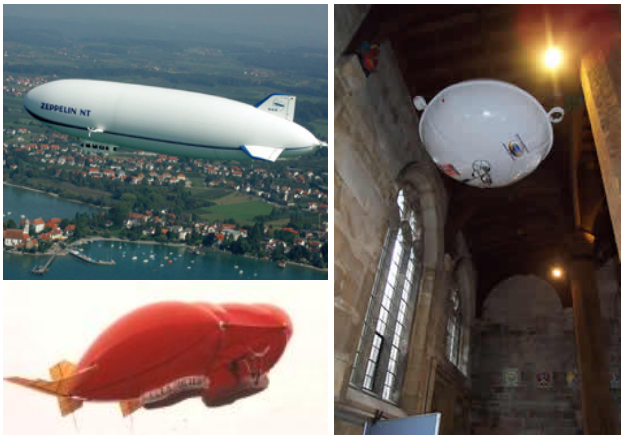

FIG. 1 – Quelques formes de ballon dirigeables : le Zeppelin NT (2000, forme “classique”), le prototype Dinausaure (1978, forme hybride), le mini ballon Skycell (2000, forme lenticulaire).

dont la forme de l’enveloppe est assurée par la structure mécanique, indépendemment de la pression du gaz porteur ;
– Les dirigeables semi-rigides, qui consistent en une enveloppe souple fixée sur une longue structure rigide qui en constitue le socle (on parle de “quille”). Tous les concepts modernes de ballons de grande taille sont réalisés ainsi.
– Et les dirigeables souples (“blimp” en anglais), qui sont constitués d’une enveloppe à laquelle sont fixés les éléments nécessaires à son opération (actionneurs, énergie et charge utile). La plupart des petits dirigeables sont réalisés ainsi, la loi des carrés-cubes empêchant l’utilisation de structures rigides.

Les principales formes d’enveloppe rencontrées sont les suivantes (figure 1) :
– Forme “classique” ou “en cigare” : c’est la forme la plus répandue, et c’est celle de tous des ballons pilotés actuellement opérationnels dans le monde. Cette forme permet en effet d’obtenir une bonne portance aérodynamique en déplacement, tout en minimisant la traînée.
– Forme “ailes hybrides” : il s’agit cette fois d’optimiser encore plus la portance aérodynamique.
– Formes lenticulaire et sphériques : lorsque des ballons sont conçus pour voler en conditions quasi-statiques (à l’intérieur de bâtiments par exemple), on peut avoir intérêt à avoir une forme symétrique.

Enfin de nombreuses formes plus originales ont été proposées dans le développement de certains prototypes, sans qu’aucun concept particulier ne rencontre de grand succès.

3.3 Moyens de contrôle

Hormis le contrôle de la pression interne de l’enveloppe et éventuellement de l’équilibrage, deux moyens de contrôle sont couramment utilisés pour les ballons dirigeables :
– Les propulseurs, quasiment exclusivement basés sur des hélices. Ils peuvent être placés en différentes positions, et même être “vectorisés” (orientables). Une configuration classique assez répandue est une paire de propulseurs couplés, situés au niveau de la nacelle, dont l’angle de tangage peut être réglé afin d’obtenir une composante de poussée verticale, permettant ainsi le décollage vertical et le maintien d’une altitude à des vitesses où les effets aérodynamiques ne sont pas opérants.
– Les surfaces de contrôle, le plus souvent situées à la queue de l’appareil pour permettre un contrôle de la profondeur et du lacet.

Bien entendu, les engins destinés à des vols quasi statiques (le plus souvent sphériques ou lenticulaires) sont dépourvus de surfaces de contrôles.

3.4 Avantages et inconvénients

On trouvera dans la littérature de nombreuses analyses des vertus comparées entre les ballons dirigeables et les autres engins aériens (ainsi dans l’introduction de [14] pour les engins de faibles dimensions), dans lesquelles les ballons semblent être les vecteurs idéals pour un très grand nombre d’applications. Mais force est de reconnaître que l’histoire dément souvent les défenseurs des ballons les plus enthousiastes... En simplifiant à l’extrême, nous retenons que les deux principaux avantages des ballons sont les suivants :
– Faible consommation énergétique, ce qui favorise bien entendu les plateformes aériennes dites “à grande endurance”
– Sécurité : si les vols sont effectués dans des conditions météorologiques adéquates, les ballons sont des vecteurs extrêmement sûrs, pour eux-mêmes et pour leur environnement.

Mais leur inconvénient principal et de taille est leur sensibilité aux conditions météorologiques, et particulièrement aux rafales de vent : ainsi le ballon dirigeable de 18 m^3 Karma utilisé au LAAS devient très difficile à manoeuvrer avec un vent supérieur à 10 km/h (mais la loi des carrés/cubes fait que des engins plus gros restent opérationnels pour des vents plus grands). Comme pour tout engin aérien, ce sont bien entendu les phases de décollage et d’atterrissage qui sont les plus délicates - mais à cela s’ajoutent aussi les phases de manoeuvres au sol, qui deviennent vite problématiques par grand vent[2].

4 Quelles applications ?

L’histoire a montré que si les ballons dirigeables ont souvent été les premiers vecteurs utilisés pour la plupart des applications envisagées des engins aériens, ils ont toujours été rapidement remplacés par les plus lourds que l’air. Mais leur spécificités font qu’ils restent des systèmes intéressants pour différentes niches applicatives, que nous présentons rapidement ici.

[2] De nombreux accidents dommageables pour les ballons dirigeables ont lieu alors qu’ils sont au sol.

FIG. 2 – Illustrations du CargoLifter et du Skycat d'ATG (aucun prototype de ces tailles n'a encore vu le jour).

4.1 Transport de charge

De très nombreux projets de ballons dirigeables de grande taille dédiés au transport de charges exceptionnelles ont été initiés (ainsi le projet Titan, ballon lenticulaire de de 188 mètres de diamètre pour un volume 900.000 m^3 mené au CNRS pendant les années 1970). Ce type d'engin pourrait permettre de transporter des charges jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes sans rupture de charge entre le départ et l'arrivée, et sans besoin d'infrastructure spécifique, le ballon ne devant pas nécessairement atterrir pour prendre et déposer la charge. Le projet industriel CargoLifter initié en Allemagne en 1997 est sans doute un des projets qui a le plus marqué les esprits, tant l'ambition et les investissements financiers étaient importants. L'objectif était de construire un engin de 260 mètres de long, capable d'embarquer des charges de 160 tonnes, mais le projet a malheureusement fait faillite en 2002, après que de nombreux retards aient été pris dans le développement de différents démonstrateurs technologiques.
Les difficultés technologiques pour réaliser ces systèmes hors du commun sont encore nombreuses, mais motivent toujours des investissements industriels. Ainsi le groupe britannique ATG continue à envisager le développement de tels engins [29].

4.2 Plateformes stratosphériques

Une autre application propre pour laquelle les ballons dirigeables pourraient s'avérer idéaux sont les plateformes stratosphériques ou "Hale" (High Altitude Long Endurance). Ce genre de système pourrait réaliser les mêmes tâches qu'un satellite (observation, relais de communication...) en restant plusieurs semaines au dessus d'une zone donnée, à des altitudes de l'ordre de 20 à 30 kilomètres. Aucun projet n'a encore abouti à des systèmes opérationnels, et à notre connaissance aucun prototype n'a non plus démontré la faisabilité technologique. Mais la viabilité économique par comparaison aux coûts de satellites est telle que c'est sans aucun doute le type d'application qui génère actuellement le plus de développements industriels dans le domaine des ballons dirigeables [22, 25]. Notons qu'un des éléments qui fait que ce genre de système peut être considéré de manière réaliste est que les vents stratosphériques sont biens plus faibles qu'aux altitudes auxquelles volent les avions civils par exemple : ajouté au fait que la pression atmosphérique est aussi très faible, cela rend possible le déploiement et la stabilisation d'engins avec de faibles moyens énergétiques.

4.3 Exploration planétaire

De nombreuses études sur la possibilité d'utiliser des ballons pour explorer une planète ont été menées par différentes agences spatiales [12]. Le système le plus abouti était sans doute le système Franco-Russe "Mars 94", dont le lancement fut repoussé en 1998, et finalement annulé après l'échec de la mission Mars 96, mais il ne s'agissait pas à proprement parler d'un ballon dirigeable, puisqu'il devait se déplacer au gré des vents martiens et des variations thermiques jour/nuit [31]. Si aujourd'hui aucune mission n'est programmée, des travaux de plus en plus précis sont toujours réalisés, tant pour l'exploration de Mars [17, 13] que pour celle de Vénus [28]. Les travaux sont principalement menés au JPL, mais l'ESA supporte aussi des travaux exploratoires [4].

4.4 Observation

Comme la plupart des vecteurs aériens, les ballons dirigeables peuvent bien entendu être exploités pour des missions d'observation, leur intérêt étant dans ce cas la capacité d'évoluer lentement sur de longues périodes. Une mission de détection de mines au Kosovo avec un radar à pénétration de sol a ainsi été largement médiatisée [7]. Aux États-Unis, la emploi de ballons pour la surveillance des frontières a été promu : c'est ici l'effet dissuasif qui est recherché.

4.5 Publicité

Il s'agit d'une application à ne pas négliger, puisque la plupart des ballons dirigeables actuellement en service, qu'ils soient pilotés ou radio-commandés, sont dédiés à cela.

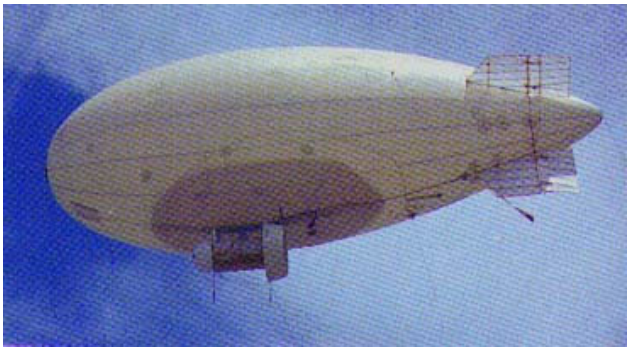

FIG. 3 – Un des ballons du projet Sass Lite.

4.6 Intérêt de l'autonomie ?

Au vu des différents contextes applicatifs possibles, il est pertinent de se demander si l'autonomie peut être utile. Nous pensons que la réponse est affirmative, pour plusieurs raisons :

– Il y a d'une part les contextes où elle s'impose naturellement, le pilotage par un opérateur n'étant pas envisageable. Il s'agit bien entendu des plateformes stratosphériques et des ballons d'exploration planétaire.
– Et il y a d'autre part les applications où l'autonomie peut apporter en termes de coûts (missions d'observation et de communication publicitaires), et permettre des opérations de plusieurs dizaines d'heures.

Enfin, il est raisonnable de penser que des techniques de contrôle de vol avancées pourront à terme permettre des opérations de tous types de ballons plus sûres et plus robustes aux perturbations aérologiques.

5 Aperçu des principaux projets de ballons autonomes

5.1 SASS LITE

Si on excepte les contrôleurs automatiques de cap qui équipaient déjà les Zeppelins transatlantiques pendant les années 30, à notre connaissance le premier projet de ballon autonome est le Sass Lite ("Small Aerostat Surveillance System, Low Intensity Target Exploitation") mené par la société américaine Applied Research Associates[3] dans un contexte militaire [6] (figure 3). Le projet a été initié à la fin des années 80, et en 1993 différents ballons de 300 à 600 m^3, munis d'un moteur thermique de 35 chevaux, ont réalisés des déplacements autonomes de plusieurs dizaines de kilomètres, pendant plusieurs heures. Malheureusement aucune information technique sur les lois de commandes utilisées n'est donnée dans les publications.

5.2 Aurora

Le projet de ballon dirigeable autonome Aurora est sans doute celui qui est le plus connu dans la communauté des roboticiens, et aussi un de ceux qui produit le plus de résultats (ce projet a été présenté en détail aux JNRR 2001 [27]). Initié par Alberto Elfes à la fin des années 90 à l'Information Technology Center de Campinas (Brésil), le projet concerne le contrôle autonome du vol d'un ballon, et a d'entrée inclut l'instrumentation et le développement d'un prototype [14, 15]. Le ballon utilisé est un modèle AS-800 de la société britannique Airspeed Airship (aujourd'hui disparue), de 25 m^3 et doté de deux moteurs thermiques de modélisme montés selon sur un axe orientable en tangage (mécanisme classique de propulsion vectorisée). Outre les développements matériels et logiciels qui ont consisté à "robotiser" ce ballon y installant les capteurs nécessaires (GPS, compas, gyromètres...), des travaux ont été menés sur la modélisation dynamique [16, 3] et bien entendu sur le contrôle de vol [8, 9]. Ces travaux ont été étendus par des collaborations avec l'Institut Superior Tecnico de Lisbonne et l'équipe Icare de l'INRIA, en considérant notamment le contrôle par asservissement visuel [27]. À notre connaissance, seuls des contrôleurs de type PID pour asservir des paramètres de vol (cap, altitude) et rallier des points de passage ont été effectivement testés en conditions réelles (figure 4)

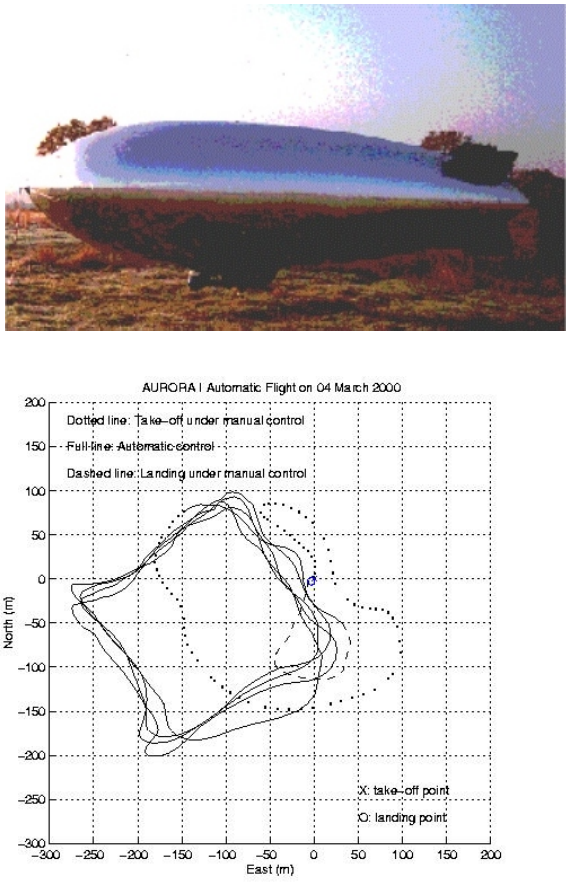

FIG. 4 – Le ballon du projet Aurora, et un résultat de suivi de points de passage

[3] Société maintenant devenue "Bosch Aerospace".

FIG. 5 – Le ballon Lotte de l'Université de Stuttgart. Noter l'unique propulseur situé à l'arrière.

5.3 Lotte

Le projet Lotte est mené par l'Université de Stuttgart depuis le début des années 90. Il a d'abord consisté à réaliser un ballon d'une longueur de 16 m et de 105 m^3 de volume (figure 5), et différents développements technologiques associés, notamment l'utilisation de cellules photovoltaïques [23]. De sérieuses études aérodynamiques ont ensuite été menées (modélisation, identification de paramètres en soufflerie, développement de contrôleurs [33, 32]). Malheureusement peu de communications internationales sont publiées autour de ce projet, dont nous ne connaissons aujourd'hui pas précisément l'avancement.

5.4 Karma

Le Laas a commencé à s'intéresser aux ballons dirigeables autonomes en 2000, et a développé un prototype dont le premier vol a eu lieu en Mars 2003 (figure 6). Outre le développement du prototype et son exploitation pour mener des travaux sur la cartographie de l'environnement survolé, différents travaux relatifs au contrôle de vol ont été menés : modélisation du système et identification des paramètres du modèle (en soufflerie en collaboration avec SupAéro [5], ou bien à partir de données de vol [26]), développement de différents contrôleurs (stabilisation de paramètres de vol et suivi de trajectoires [20, 19]), et plus récemment planification de trajectoire.
Tous ces travaux ont été évalués en simulation, mais aucun n'a encore débouché sur un contrôle effectif du ballon, qui est toujours téléopéré lors de ses vols.

5.5 Autres projets

De très nombreux autres projets de ballons dirigeables autonomes ont été et sont menés dans d'autres laboratoires et méritent d'être mentionnés :

- Le projet mené au LSC, où les travaux portent surtout sur la planification de trajectoires faisables et leur suivi [18]
- Le projet Alpha mené entre l'ENST et l'AnimatLab et avec la société Airstar, dans lequel des contrôleurs sont générés par des techniques évolutionnistes [11]
- Un projet est mené à l'université Hagen en Allemagne
- Deux projets sont en genèse à l'Université des Andes à Bogotta (projet "Uran") et à l'Institut Supérieur de Robotique au Portugal

FIG. 6 – Le ballon Karma du Laas

Cette liste est loin d'être exhaustive, et ne mentionne notamment pas les projets de ballons autonomes "indoor" (qui ont été notamment menés au laboratoire GRASP d'Upenn [34] et à Berkeley - projets qui semblent avoir été abandonnés).

6 Discussion

Le développement futur des ballons dirigeables sera vraisemblablement restreint à des applications très particulières, mais potentiellement utiles et économiquement viables. L'automatisation de leur vol, fonctionnalité bien évidemment indispensable à leur autonomie, permettra sans aucun doute de favoriser ce développement, notamment pour les applications où elle s'impose.
Si le nombre de projets de recherche dans le domaine croît, le contraste reste saisissant entre le grand volume des études théoriques et le très faible nombre de prototypes qui ont effectivement validé des développements - et le plus souvent en exploitant des techniques de contrôle extrêmement simplifiées. Nous pensons qu'il y a principalement deux raisons à cette situation : d'une part le déploiement d'un ballon est une opération logistiquement assez lourde, et d'autre par la difficulté du problème est grande. Le modèle d'un ballon dirigeable n'est en effet pas aisément simplifiable, ses paramètres ne sont pas faciles à déterminer précisément, et surtout il s'agit d'un système qui a une grande inertie et qui est extrêmement sensible aux perturbations aérologiques.

Références

[1] The Airship Association. www.airship-association.org.

[2] Association Aerall. www.aerall.com.

[3] J.R. Azinheira, E. de Paiva, J. Ramos, S.S. Bueno, M. Bergerman, and S.B.V. Gomes. Extended dyna-

mic model for aurora robotic airship. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.

[4] D. Barnes, P. Summers, and A. Shaw. An investigation into aerobot technologies for planetary exploration. In *6th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, Noordwijk (The Netherlands)*, Dec. 2000.

[5] A. Bonnet, E. Hygounenc, and P. Soueres. Modélisation d'un dirigeable sans pilote pour le développement d'une stratégie de vol autonome. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 62(4) :43–51, Dec. 2003.

[6] J.H. Boshma. The devlepment progress of the U.S. Army's SASS LITE, unmanned robot airship. In *10th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Scottsdale, AZ (USA)*, Sept. 1993.

[7] S. Christoforato and P.K. Bishop. Mineseeker deployment to kosovo for mine survey. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.

[8] E.C. de Carneiro, S.S. Bueno, and M. Bergerman. A robust pitch attitude controller for aurora's semin-autonomous robotics airship. In *13th AIAA Lighter-than-air Systems Technology Conference, Norfolk, Va. (USA)*, pages 141–148, July 1999.

[9] E.C. de Paiva, J.R.H Carvalho, P.A.V. Perreira, and J.R. Azinheira. An h2/h-infinity pid heading controller for aurora-i semi-autonomous robotic airship. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.

[10] A.G DiCicco, K.T. Knock, and G.E. Powell. Balloon experiments at venus (bev). In *11th AIAA Lighter Than Air Systems Technology Conference, Clearwater Beach, Fl. (USA)*, pages 144–154, May 1995.

[11] S. Doncieux and J.-A. Meyer. Evolving neural networks for the control of a lenticular blimp. In G. R. Raidl and Cagnoni, editors, *Applications of Evolutionary Computing, EvoWorkshops2003*, pages 626–637, 2003.

[12] A. Elfes, M. Bergermann, and S. Bueno. The potential of robotic airships for planetary exploration. In *10th International Conference on Advanced Robotics, Budapest (Hungary)*, pages 131–138, Aug. 2001.

[13] A. Elfes, S.S. Bueno, M. Bergerman, E.C. De Paiva, Jr. J.G. Ramos, and J.R. Azinheira. Robotic airships for exploration of planetary bodies with an atmosphere : Autonomy challenges. *Autonomous Robots*, 14(2-3) :147–164, 2003.

[14] A. Elfes, S.S. Bueno, M. Bergerman, J.G. Ramos, and S.B Varella Gomes. Project AURORA : development of an autonomous unmanned remote monitoring robotic airship. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 4(3) :70–78, April 1998.

[15] A. Elfes, S.S. Bueno, and J.G. Ramos. A semi-autonomous robotic airship for environment monitoring missions. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven (Belgium)*, Aug. 1998.

[16] S.B. Varella Gomes and J. Jr G. Ramos. Airship dynamic modeling for autonomous operation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuwen (Belgium)*, pages 3462–3467, May 1998.

[17] M.K. Heun and H.M. Cathey andR. Haberle. Mars balloon trajectory model for mars geoscience aerobot development. In *13th AIAA Lighter Than Air Systems Technology Conference, San Francisco, CA (USA)*, pages 48–57, June 1997.

[18] S. Hima and Y. Bestaoui. Time-optimal path planning for lateral navigation of an autonomous airship. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Austin (TX), USA*, Aug. 2003.

[19] E. Hygounenc and P. Soueres. Lateral path following gps-based control of a small-size unmanned blimp. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei (Taïwan)*, pages 540–545, Sept 2003.

[20] E. Hygounenc, P. Soueres, and S. Lacroix. Trajectory tracking for autonomous blimb. In *4th International Airship Convention and Exhibition, Cambridge (UK)*, July 2002.

[21] G.A. Khoury and J. David Gillett, editors. *Airship Technology*, volume 10 of *Cambridge Aerospace Series*. Cambridge university press, 1999.

[22] R. Kueke, P. Lindstrand, P. Groepper, and I. Schaefer. High altitude long endurance aerostatic platforms : the European approach. In *3rd International Airship Convention and Exhibition, Friedrichshafen (Germany)*, July 2000.

[23] P. Kungl, M. Schlenker, and B. Kröplin. Research and testing activities with the solar powered airship lotte within the scope of the airship research group at the university of stuttgart. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.

[24] A. Nayler. Airship activity and development worldwide - 2000. In *3rd International Airship Convention and Exhibition, Friedrichshafen (Germany)*, July 2000.

[25] G. Olmo, T.C. Tozer, and D. Grace. The european HeliNet project. In *3rd International Airship Convention and Exhibition, Friedrichshafen (Germany)*, July 2000.

[26] D. Patino, L. Solaque, S. Lacroix, and A. Gauthier. Estimation of the aerodynamical parameters of an experimental airship. In *EEE/RSJ IROS 2005 Workshop on Robot Vision for Space Applications, Edmonton, Alberta, Canada*, Aug. 2005.

[27] P. Rives, J.R. Azinheira, J.R.H. Carvalho, G.F. Silveira, E.C. de Paiva, and S.S. Bueno. Dirigeable d'observation : le projet AURORA. In *Troisièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Giens (France)*, Oct. 2001.

[28] M.S. Smith, R.S. Schallenkamp, C.J. Ekstein, and K. Blizard. Development of venusian aerobots. In *13th AIAA Lighter Than Air Systems Technology Conference, San Francisco, CA (USA)*, pages 48–57, June 1997.

[29] Advandced Technologies Group. www.atg-airships.com.

[30] S. Ungermark. Airships : Misconceptions and Myths. www.ungermark.se/lakehurst.html.

[31] A. Vargas, J. Evrard, and P. Mauroy. Mars 96 aerostat : an overview of technology developments and testing. In *13th AIAA Lighter Than Air Systems Technology Conference, San Francisco, CA (USA)*, pages 29–36, June 1997.

[32] D-A. Wimmer, M. Bildstein, K.H. Well, M. Schlenker, P. Kungl, and B-H. Kröplin. Research airship lotte. development and operation of controllers for autonomous flight phases. In *Workshop on Aerial Robotics - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne (Switzerland)*, Oct. 2002.

[33] D-A. Wimmer and K.H. Well. Instrumentation, identification and control of airship lotte. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Conference and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.

[34] H. Zhang and J.P. Ostrwoski. Visual servoing with dynamics : Control of an unmanned blimp. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Mi. (USA)*, pages 618–623, May 1999.