

L'utilisation scientifique des dirigeables : historique, bilan et perspectives.

Exemples d'applications lors de missions naturalistes: inventaire de la biodiversité dans la canopée de forêts tropicales et études océanographiques

Eric Faure

Laboratoire Systématique Evolutive, case 5, EA 2202 Biodiversité, Place Victor Hugo, Université de Provence, 13331 Marseille cedex 3, France.

Téléphone : 00 33 491 10 61 77 – email : Eric.Faure@up.univ-mrs.fr

« L'aérostat est une manière de nuage artificiel très léger, emprisonné dans une enveloppe étanche qui, gravitant par l'espace en vertu du principe d'Archimède, emporte, avec le surcroît de son énergie ascensionnelle, des savants ...»

Georges Blanchet, aéronaute, 1907.

Résumé - Depuis plus de trois décennies, des dirigeables sont utilisés dans un grand nombre de missions scientifiques. Les capacités offertes par ces aérostats sont à la fois uniques et complémentaires de celles des autres plates-formes employées lors de recherches scientifiques. Divers exemples d'applications sont détaillés en insistant d'une part, sur l'inventaire de la biodiversité au niveau de la canopée des forêts tropicales et/ou équatoriales et d'autre part, sur les travaux portant sur l'étude de mammifères marins appartenant à des espèces protégées et/ou en voie de disparition. Sont aussi présentées les « nouvelles » perspectives en s'intéressant tout particulièrement à la France où le changement de réglementation sera probablement bénéfique à l'utilisation des dirigeables lors de missions naturalistes.

Mots clés : dirigeable, biodiversité, *Radeau des cimes*, écologie, océanographie, mammifères marins.

Scientific use of of the airships : history, evaluation and prospects.

Examples of use during naturalist missions : inventories of biodiversity in tropical rain forest canopies and oceanographic studies

Abstract – Airships have been used in a variety of research applications for more than three decades. The capabilities offered by these aerostats are both unique and complementary to other research platforms. An inventory of the missions used to date will be given. Detailed examples of applications relating firstly to the inventory of biodiversity in the canopy of a tropical rain forest and secondly to the study of marine mammals belonging to protected and/or endangered species will also be given. " New " prospects will also be discussed, particularly from a French point of view as changes in regulations will probably be beneficial to the use of aerostats during naturalist missions.

Key-words : airship, biodiversity, canopy raft, «*radeau des cimes*», ecology, oceanography, marine mammals.

I- Les aérostats, outils d'expérimentation scientifique :

I-A- Introduction :

Les avancées scientifiques sont intimement liées d'une part aux progrès technologiques et d'autre part aux améliorations des divers types de plates-formes utilisables par les scientifiques (sans les progrès dans la construction navale, le *Beagle* n'aurait pas existé ! et qu'aurait fait Darwin ?). Lors des trois dernières décennies, des avancées majeures ont été effectuées dans les domaines des satellites, des submersibles, etc... Face à ces engins modernes ultra-sophistiqués, et de manière plus surprenante, des appareils plus légers que l'air, véritables rétro-innovations par leur allure nous faisant remonter deux siècles en arrière, ont aussi été utilisés avec succès comme plates-formes scientifiques.

Il faut peu de temps pour que l'aérostat ne devienne un vecteur à vocation scientifique. Au tout début du XIX^{ème} siècle, sachant à peine maîtriser leurs machines aérostatiques, des hommes pétris de la culture scientifique, encyclopédistes et curieux de tout profitent de leurs ascensions pour effectuer des prélèvements d'échantillons dans l'atmosphère (Facon et Debaeker, 2001 ; Dans l'air, 2001 ; Faure, 2004, cf aussi divers documents facilement accessibles à partir du site de la Bibliothèque Nationale de France : <http://gallica.bnf.fr/>). Le challenge est alors de monter le plus haut possible afin d'effectuer des prélèvements d'air en vue de les analyser. Ces savants souhaitent tout étudier, aussi bien la composition de l'atmosphère et les limites physiques que l'homme peut supporter en s'élevant dans les airs que la vitesse et la direction des courants aériens, la formation des nuages et les variations du magnétisme terrestre. Dès le deuxième vol humain, des instruments de mesure sont déjà embarqués, en effet, le 1^{ier} décembre 1783, soit 11 jours après le premier vol en montgolfière, le physicien Jacques Charles et Anne-Jean Robert prennent les airs sur un aérostat à hydrogène de leur conception, avec un thermomètre et un baromètre pour connaître l'altitude de leur aéronef (Arago, 1856).

Même si c'est le plus souvent de manière épisodique, tous les types d'aérostats (ballons à gaz, montgolfières, dirigeables à air chaud, hélium et hydrogène) ont été et sont encore utilisés au niveau scientifique (si ce n'est le gonflement à l'hydrogène pour les dirigeables). Les avantages et inconvénients en terme d'utilisation de chacun des types d'aérostats sont présentés dans le tableau I. Il en ressort que montgolfières ou ballons à gaz (motorisés ou non) ne peuvent être utilisés que de manière très ponctuelle car peu maniables. Bien que plus maniable, il en est de même pour les dirigeables à air chaud (d'ailleurs, un seul est employé dans un but scientifique à ce jour). Seuls, les dirigeables à hélium, en dépit du coût, sont promis à un grand avenir au niveau scientifique.

Type d'aérostat	Vitesse max. en km/h (par rapport au vent)	Avantages	Inconvénients	Equipage au sol (moyenne)
Montgolfière	0	Coût d'achat et d'utilisation faible Masse faible Assez facile à transporter Mise en œuvre aisée et rapide Contrôle de la flottabilité aisée	Peu maniable Conditions d'utilisation restreintes	3
Montgolfière motorisée	≈7	Idem à ci dessus	Guère maniable Conditions d'utilisation restreintes Bruyant	3
Ballon à gaz	0	Masse faible Assez facile à transporter	Coût de l'hélium Contrôle de la flottabilité plus difficile	3-10
Ballon à gaz motorisé	≈7	Idem à ci dessus	Guère maniable Conditions d'utilisation restreintes Bruyant	3-10
Dirigeable à air chaud	≈40	Peu de composants de haute technologie Contrôle de la flottabilité aisée	Conditions d'utilisation restreintes Coûts d'achat et d'utilisation assez élevé Nombre d'équipiers au sol Bruyant	>10
Dirigeable à hélium	>100	Autonomie Engin sûr Econome en carburant Conditions d'utilisation nombreuses : - de jour et de nuit - possibilité de traversée maritime - survols de plusieurs jours - volant avec des vents >60 km/h	Engin lourd et volumineux hors vol Coût de l'hélium Contrôle de la flottabilité difficile Nombre d'équipiers au sol	3 à 15 suivant volume et les conditions de vent
Rozière dirigeable	>100	Idem à ci dessus Contrôle de la flottabilité assez aisée	Coût de l'hélium Projet expérimental	?

Tableau I : Avantages et inconvénients de chacun des types d'aérostats.

I-B- Bilan succinct des utilisations scientifiques de dirigeables pour les 30 dernières années :

I-B-1- Utilisations scientifiques de dirigeables à air chaud :

Les dirigeables à air chaud sont apparus en 1973 et ne sont rien d'autre que des montgolfières dirigeables. D'un volume moyen de 3 000 m³, ils ne peuvent sortir que par beau temps et par vent de moins de 20 km/h (diverses sociétés ont des projets de dirigeables à air chaud sur-pressurisés pouvant dépasser 60 km/h), principalement utilisés pour la publicité aérienne et les activités de loisirs. Une exception, le dirigeable du « *Radeau des cimes* » qui a un volume de 8 500 m³ est exclusivement utilisé lors de missions scientifiques. La manœuvrabilité est assurée par l'orientation du flux de l'hélice par des demi-coquilles, dans le genre des "Reverses" des *Boeing 737*. L'avantage est que l'on peut s'en servir aussi pour freiner.

Quelques exemples d'utilisation scientifique du dirigeable à air chaud en forêt équatoriale et tropicale lors des missions « *Radeau des cimes* » :

Il serait trop fastidieux de faire l'inventaire de toutes les recherches réalisées lors des missions « *Radeau des cimes* », car elles réunissent en moyenne plus de 25 disciplines telles que l'écologie forestière, l'entomologie, l'ornithologie mais également la biomécanique, l'aérologie, l'aromatologie ou la biophysique (Nous n'avons d'ailleurs

pas répertorier les dizaines de publications scientifiques se reportant à ces missions, se reporter aux rapports des missions et références à l'intérieur (Hallé, 1990; Hallé et coll., 2000 ; Biologie d'une canopée de forêt équatoriale, 1990, 1998, 1992, 1999 et 2003 ; Global Canopy Handbook, 2002). Parmi les travaux originaux menés lors des missions « *Radeau des cimes* », l'un d'entre eux désire répondre à une question soulevée depuis longtemps par le Pr Francis Hallé : les très grands arbres peuvent-ils avoir des variantes du génome dans leurs différentes branches maîtresses ? Si cette hypothèse se confirme, l'une des explications pourrait résider dans les modifications génétiques induites par les UV du soleil ne touchant que le sommet des arbres. Lors de la mission malgache, des récoltes d'échantillons ont été effectuées en différents points des arbres pour en analyser l'ADN et comparer ensuite les résultats en laboratoire. Près de 300 échantillons ont été prélevés sur trois grands arbres de différentes familles, atteignant 30 à 40 mètres de hauteur. A titre d'exemple, concernant la mission malgache de 2001, nous pouvons citer quatre utilisations du dirigeable:

- Prélèvement d'insectes et d'échantillons de flore sur la canopée.
- Dépôt de matériel sur la canopée en vue de son étude.
- Etude de l'organisation et de l'architecture des cimes des arbres de la canopée.
- Etude de la photosynthèse et des échanges gazeux au niveau de la canopée.

Les missions « *Radeau des cimes* » :

La première expédition « *Radeau des cimes* » s'était déroulée en Guyane en 1986. Le Radeau était alors solidaire d'une montgolfière qui ne pouvait aller que là où le vent la poussait. Ce qui a conduit à utiliser un dirigeable à air chaud. Ce dirigeable d'un volume de 8 500 m³ est le plus gros du monde, pour son utilisation en milieu extrême tout a été à inventer. Il peut déposer le Radeau sur la canopée en un site choisi et il a été expérimenté avec succès en 1989 et en 1996 (Guyane), 1991 (Cameroun) et 1999 (Gabon). En 2001, l'aventure a recommencé, à Madagascar. Cette île connue pour son extraordinaire diversité biologique, est une destination privilégiée pour des missions scientifiques à caractère exploratoire. La mission 2001 s'est déroulée sur la péninsule de Masoala, l'un des derniers sites de forêts tropicales humides intactes à Madagascar (Faure, 2000, 2001, 2002). Cette péninsule, située sur la côte Nord-est de l'île, abrite une forêt réputée pour posséder un taux d'endémisme très élevé où de nombreux organismes vivants sont encore à découvrir. « *Le « Radeau des cimes » est en perpétuelle évolution; c'est devenu un nom générique qui désigne maintenant une multitude d'appareils différents : le Dirigeable (Figure 1), la Luge, la Bulle et l'Icos. Ces dispositifs ont le privilège de décliner la mobilité qui nous caractérise de diverses manières. La Bulle à hélium captive ou Bulle des cimes permet une exploration individuelle de la canopée pendant quelques heures. L'Icos est une structure métallique icosaédrique installée pour toute la durée de l'expédition dans la fourche d'un arbre. Le Radeau reste sur le même site pendant une semaine en moyenne. La Luge (Figure 1), suspendue sous le dirigeable, augmente le rayon d'action et multiplie les sites potentiels avec une station de quelques minutes sur des arbres choisis. Les efforts continus de recherche et de développement de nouvelles structures peuvent être résumés de la façon suivante : développer la capacité d'adaptation et de mobilité de personnes physiques dans la canopée des forêts tropicales* » Gilles Ebersolt, concepteur du radeau. Une autre originalité de ces missions, c'est qu'elles ne fonctionnent que sur des fonds privés. En effet, l'ONG Pro Natura International (responsable de la gestion des missions) valorise la biodiversité en établissant des liens de coopération et d'intérêt mutuel entre populations locales, scientifiques, industriels et ONGs du sud. Cette valorisation de la

biodiversité des forêts primaires s'applique aux domaines des produits pharmaceutiques,



agroalimentaires, cosmétiques, des parfums et des arômes alimentaires (www.radeau-des-cimes.org/).

Figure 1 : Dirigeable à air chaud utilisé lors de prélèvement d'échantillons de flore sur la canopée avec un gros plan sur la luge suspendue sous le dirigeable (Madagascar - Mission « Radeau des cimes 2001 ») (photographies : E. Faure).

Ces missions, qui constituent à la fois une aventure scientifique et humaine, permettent à des scientifiques pluridisciplinaires, venus du monde entier, d'étudier la canopée de la forêt tropicale, avec à chaque fois la participation de chercheurs et d'étudiants du pays visité. Tout a commencé au début des années 80, par la rencontre entre Francis Hallé, professeur de botanique, qui rêvait depuis des années d'étudier directement la canopée de la forêt tropicale, Dany Cleyet-Marrel pilote des ballons dans des conditions extrêmes et l'architecte, Gilles Ebersolt. Ensemble, ils mettent au point un « *Radeau des Cimes* » qui flotte sur un véritable océan vert : la canopée des forêts primaires tropicales ou équatoriales, c'est-à-dire le sommet des arbres. La richesse en espèces dans la canopée, dont une grande partie est inconnue, en fait l'une des dernières frontières du vivant, l'un des foyers de la biodiversité de notre planète. Au rythme actuel de la déforestation, les scientifiques s'empressent d'engranger le maximum d'informations avant que bon nombre d'espèces (végétales et animales) ne disparaissent à tout jamais. Les forêts tropicales humides contiennent plus de 50% du matériel génétique de la planète. Cette banque de gènes unique au monde recèle de surcroît les substances chimiques qui pourraient composer les médicaments de demain et pourtant seul 1% des végétaux de ces forêts a fait l'objet de recherche sur leurs propriétés médicinales. Entre les tropiques, les arbres de la canopée reçoivent de plein fouet un rayonnement UV très fort. Ce rayonnement UV peut transformer des molécules assez anodines en des molécules actives, nommées phototoxines. Sous l'influence de ces UV, la toxicité de l'arbre augmente dans la zone qui est en pleine lumière. De plus, dans la zone sommitale de la forêt, se trouvent les trois quarts de la faune entomologique, dont la grande majorité est herbivore. Par ailleurs, certaines plantes lorsqu'elles sont attaquées par un insecte herbivore, produisent dans un délai très court de quelques secondes à quelques minutes, des défenses biochimiques qui ont pour résultat de dissuader la prédation. Lorsque les arbres atteignent la canopée, leur production énergétique n'est plus dirigée vers la croissance puisqu'il n'y a plus de croissance, mais vers la production de métabolites secondaires dont certains constituent des défenses biochimiques contre les insectes. Donc au niveau de la canopée, la combinaison de trois

phénomènes, un rayonnement UV considérable, une très forte attaque de la faune herbivore et l'absence de croissance provoquent la synthèse de nombreux composants biochimiques. La mission au Gabon a permis de démontrer que l'activité biochimique était 4,4 fois plus forte dans la canopée qu'en bas, dans la pénombre du sous-bois. Cela fait très longtemps que l'on cherche des plantes médicinales dans les forêts tropicales or les récoltes sont le plus souvent effectuées à portée de main, donc pas très haut forcément. Lorsque des tests sont effectués pour savoir s'il y a une activité biochimique, il se révèle le plus souvent négatif et on décide que l'espèce en question n'a pas d'intérêt et qu'on ne pourra rien en retirer pour la médecine ou pour la pharmacie. Alors que le même arbre au niveau de la canopée peut produire des molécules extrêmement intéressantes.

I-B-2- Utilisations scientifiques des dirigeables à hélium et/ou hydrogène :

I-B-2-a- Les divers types de dirigeables à hélium et/ou hydrogène :

Le dirigeable n'est rien d'autre qu'un ballon pourvu d'organes de propulsion et de direction qui lui procurent une vitesse propre lui permettant de lutter contre la résistance de l'air. Dès 1784, soit quelques mois après les premiers vols humains en montgolfière et en ballon à gaz, le futur général Jean-Baptiste Meusnier de la Place (1754-1799), complétant des réflexions de Lavoisier, établit les trois conditions essentielles de la « dirigeabilité » des ballons : la forme allongée, la permanence de la forme, obtenue par l'emploi d'un ou plusieurs ballonnets à air et l'utilisation d'un propulseur hélicoïdal. Les premiers essais de dirigeabilité datent de 1784. Toutefois, le premier circuit aérien en dirigeable a été réalisé à Chalais-Meudon, le 9 août 1884 sur le *France* construit par Charles Renard et Arthur Krebs.

Les dirigeables se subdivisent en trois catégories : rigides, semi-rigides et souples. La forme générale des dirigeables rigides est assurée par une armature métallique constituée de poutrelles solides et légères, l'ensemble est recouvert d'un entoilage tendu et imperméable à l'eau. Le gaz porteur est réparti dans plusieurs ballonnets accrochés sur le pourtour de la carcasse. Les modèles les plus connus sont ceux développés par le comte Zeppelin. Toujours de grandes dimensions, les rigides sont lourds mais peuvent atteindre des vitesses plus élevées et transporter des tonnages plus importants grâce à leur grande capacité. L'un d'entre eux (*Graf Zeppelin*) a réussi un tour du monde avec passagers en 1929. Dans les années 30, des dirigeables porte-avions volants existaient aux USA. Avant la première guerre mondiale, des tuberculeux ont effectué des ascensions à visée thérapeutique (Anonyme, 1914). Les semi-rigides, véritable compromis entre le dirigeable souple et le rigide sont constitués d'un ballon souple dont la base s'appuie sur une quille rigide qui répartit les charges. Les modèles les plus célèbres sont ceux construits par l'Italien Umberto Nobile dans les années 20. L'un d'entre eux réussit la traversée de l'Océan Glacial Arctique en passant par le pôle. Les dirigeables souples constituent le type le plus ancien, le principe ayant été établi par Meusnier en 1784. Il s'agit du dirigeable le plus construit car il est économique à la construction et en exploitation. La permanence de la forme est assurée par la pression interne de l'enveloppe, avec l'aide d'un ou plusieurs ballonnets compensateurs. Le plus souvent, les volumes sont situés entre 1500 et 6000 m³. En vol, les ballonnets sont gonflés par le flux d'air prélevé dans celui généré par les hélices. L'enveloppe est maintenant construite en matériaux modernes qui résistent à la pression, aux variations

de température et aux rayons ultraviolets. La cabine est suspendue par des caténaires situées sur la partie supérieure et/ou inférieure de la carène. Le souple jouit d'un regain d'intérêt et la presque totalité des dirigeables actuels appartient à ce type. Il existe aussi de petits dirigeables à hélium souples, non habités et radiocommandés qui peuvent rendre de grands services : les avancées technologiques dans le domaine des matériaux, de la motorisation et du pilotage permettent de les rendre relativement fiables et manœuvrants. De plus, les dirigeables habités ne peuvent pas opérer à des altitudes élevées, leur plage d'utilisation variant le plus souvent de 0 à 2000 m/mer. Pour s'élever à des altitudes supérieures, cela peut être possible en diminuant la quantité d'hélium dans l'enveloppe donc en transportant une charge plus faible. Pour les travaux en altitude, les dirigeables radiocommandés peuvent donc avantageusement remplacer d'autres types de plates formes.

I-B-2-b- Les champs d'application au niveau scientifique des dirigeables à hélium sont très vastes :

Actuellement, les dirigeables à hélium sont principalement utilisés pour des actions de promotion commerciale et de publicité, des prises de vues, des transmissions d'images, du tourisme, des opérations de surveillance (jeux olympiques, pêche, surveillance maritime). Toutefois, des scientifiques ont eu l'opportunité de les utiliser lors de diverses missions scientifiques.

I-B-2-b-1- Etudes physico-chimiques de l'environnement terrestre et/ou maritime :

L'historique sommaire présenté ci-après, nous révèle que l'océanographie physique à partir de dirigeables a presque un siècle. Des travaux de cartographie, de météorologie et des prélèvements d'eau de mer et de glace, dans des régions polaires jusque là inexplorées, ont été effectués en 1926 par Umberto Nobile sur le *Norge* qui survola le pôle Nord et atteignit l'Alaska (5 500 km). Lors de l'année polaire internationale (1931) le *Graf Zeppelin*, réalisa un survol scientifique de régions arctiques sur plus de 13 000 km. A la fin des années 1950, les océanographes W.A. Schevill et W.A. Watkins du « *Wood Hole Oceanographic Institution* » effectuèrent leurs recherches à bord de dirigeables de l'*US Navy* (Hain, 2000). Dans les années soixante, des dirigeables de l'*US Navy* furent utilisés de manière ponctuelle pour diverses études de physique de l'atmosphère, mais les travaux concernant l'étude de l'interface océan/atmosphère ne furent entrepris qu'à partir des années 1984-1986 (Hagen, 1987, 1988). En février 1989, un dirigeable fut évalué en tant que plate-forme d'études géophysiques (Cull, 1989 ; Musgrave 1989). Dans la même année, des dirigeables furent testés en tant que stations océanographiques à 19 miles des côtes et à des altitudes de survol variant de 15 à 80 m/mer. Lors de ces missions furent effectués des prélèvements d'eau en surface, des pêches avec filets à plancton, des suivis de courants marins, des mesures avec des bathythermographes, etc...(Creswell, 1989). Lors de travaux d'océanographie physique, des survols ont été effectués en maintenant des appareils de mesure positionnés entre 5 et 10 mètres au-dessus de la surface océanique (Blanc et coll., 1989a, b et c). Seul un dirigeable peut effectuer ce type de recherche sans perturber la surface aqueuse. Depuis, les travaux n'ont pas cessé. Cependant, les dirigeables appartenant à des militaires ou étant employés comme

support publicitaire n'ont pu être utilisés que de manière sporadique et même si les études furent nombreuses, il n'y a pas de travaux avec un suivi régulier dans le temps. Toutefois, depuis le début des années 90, les utilisations de dirigeables en océanographie ont été relativement nombreuses comme le souligne la liste des travaux publiés traitant de récolte d'échantillons d'eau de mer, d'atmosphère à diverses hauteurs en partant de l'interface eau/air, de plancton, de mesures géophysiques et physico-chimiques, de la mesure des flux océan/surface, de l'étude de la formation des nuages, etc.. (par ex. : Ketchen et coll., 1983 ; Frick & Hoppel, 1993; Hoppel et coll., 1994 ; Hooper, 1997 ; Plant et coll., 1998, 1999; Batchvarova et coll., 1999 ; Genfa et coll., 1999 ; Brandreth , 2000; Frick & Hoppel, 2000 ; Trokhimovski et coll., 2000 ; Kalthoff et coll, 2002 ; Hain, 2000, 2001 et références à l'intérieur). Un dirigeable qui a les moteurs coupés (ou tournant à puissance réduite) peut être considéré comme une bulle dans la masse d'air, ce qui permet de suivre en direct les trajets effectués par divers types d'aérosols et de faire des prélèvements au cours du temps afin d'étudier leur dispersion. Des analyses chimiques *in situ* de divers composants dans des couches aériennes en mer ou sur terre et des prélèvements d'échantillons gazeux ou liquides sur des transects verticaux ou horizontaux (USA, France). Par exemple, en juin 1992, le centre de recherches et de climatologie de la Sorbonne, le C.N.R.S. et le laboratoire d'hygiène de la ville de Paris, ont affrété un dirigeable de 1200 m³, piloté par Pierre Ponomareff, pour une campagne de prélèvement en altitude (<http://perso.wanadoo.fr/dirigeables/ga42.htm>). Cette mission avait pour but d'améliorer les connaissances de l'influence urbaine sur le climat et la pollution atmosphérique. Les travaux les plus récents portant sur des mesures de gaz traceurs (comme le sulfure d'hexafluoride) afin d'étudier leur dispersion, l'objectif étant de mesurer la trajectoire des gaz et leurs vitesses de diffusion lors de diverses conditions météorologiques et sur des mesures physico-chimiques à l'interface air-mer. Bill Plant, chercheur à l'Université de Washington a utilisé des dirigeables en tant que véritables laboratoires de physique appliquée, concevant de nombreuses innovations, comme une petite plate-forme équipée d'appareillages de mesure électronique suspendue 65 mètres sous la nacelle et lui permettant de réaliser ses mesures (Plant et coll., 1999) (Figure 2).

L'ensemble des travaux réalisés que cela soit aux USA, en Europe ou en Australie met en évidence que les dirigeables sont un outil important d'investigation de l'environnement terrestre et/ou maritime. Micah H. Hamley (1994) qui travaille chez le fabricant américain *US-LTA Corporation* a fait un bilan de divers travaux d'océanographie physique dans lesquels avaient été utilisés le dirigeable *US/LTA 138S*. Cet engin dont l'enveloppe fait 3900 m³ c'est révélé être une excellente plate-forme aérienne, très stable, pouvant faire quasiment du vol stationnaire, dont la grande autonomie permettait de collecter un grand nombre de mesures sur des transects verticaux et horizontaux (d'une altitude de 30 m à 3000m). La charge utile d'environ 1500 kg permet d'embarquer une grande quantité de matériel scientifique ainsi que de deux à quatre chercheurs. Voici une liste de missions, fournie par le fabricant américain *US-LTA Corporation* (www.us-lta.com/platform.html), que peuvent remplir ces aérostats (Figure 3) :

- *Airborne gravity measurements*
- *Mesoscale oceanographic phenomena*
- *Langrangian trajectory*
- *Propagation studies in acoustics*
- *Calibration of ground based remote sensors* *Calibration of orbital remote sensors*
- *Atmospheric wind shear*

- Boundary layer inversion studies of turbulence, profiles and cloud/radiation properties
- Atmospheric internal boundary layer at coastal zones
- Whitecap coverage vs. wind shear stress
- Turbulent humidity exchange
- Vertical gas chemistry measurements
- Iceberg tracking.



Figure 2 : Mesures physico-chimiques à l'interface air-mer à l'aide d'une plate-forme météorologique suspendue sous la nacelle d'un dirigeable souple gonflé à l'hélium (US-LTA model 138S) (Photographies fournies par W. Plant).

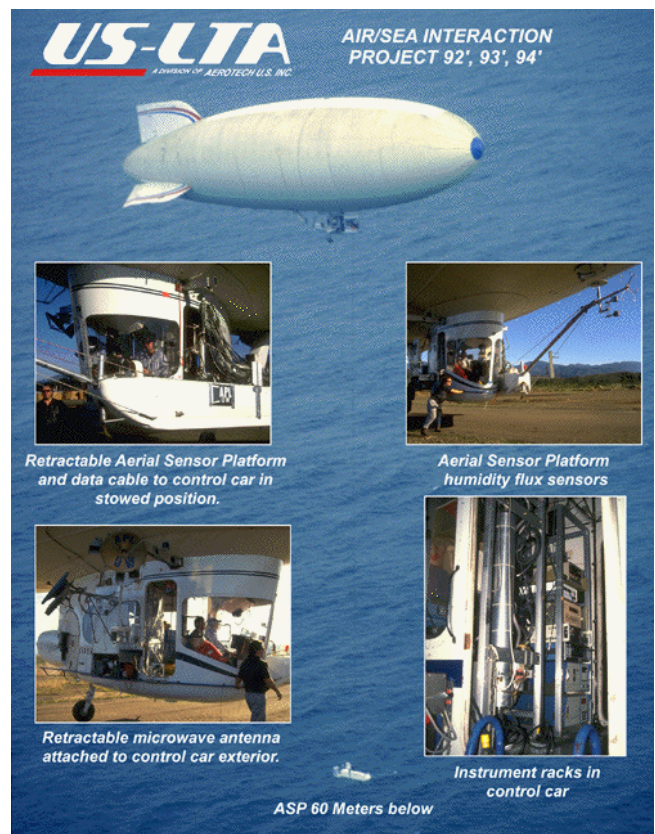
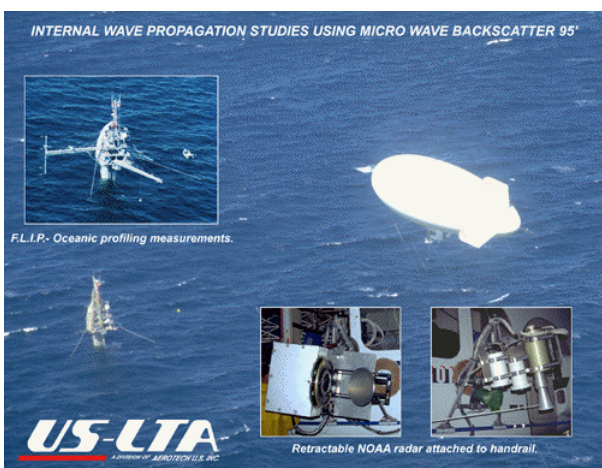
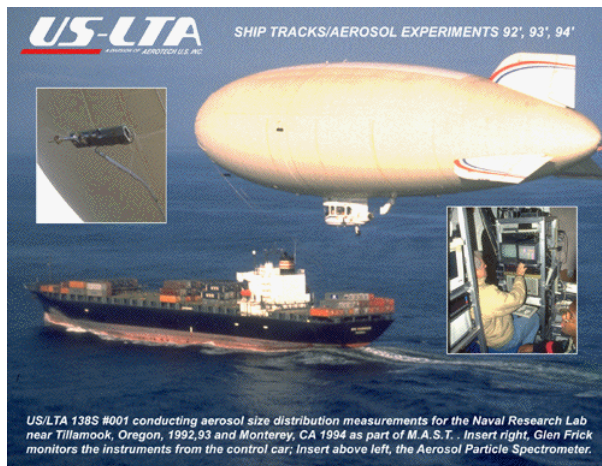


Figure 3 : Missions océanographiques réalisées à l'aide de dirigeables (Reproduit avec l'autorisation de *US-LTA Corporation*, Oregon, USA - www.us-lta.com/platform.html).

I-B-2-b-2- Utilisations de dirigeables à hélium lors de missions naturalistes :

I-B-2-b-2-a- Recherches naturalistes en forêt tropicale :

Un petit dirigeable de 400 m³ construit par Graham Dorrington a été utilisé avec succès en forêt tropicale primaire (Danum-Valley, Sabah, Malaysia) pour aider à la détermination de la densité de populations d'orangs-outans, des piégeages d'insectes lors de survol de la canopée ont aussi été effectués (www.orangutan.org/ - www.eng.qmw.ac.uk/dorrington.shtml).

I-B-2-b-2-b- Etude de mammifères marins :

L'utilisation en biologie marine des dirigeables n'est pas récente, la première mention dans la littérature que nous ayons retrouvée date de 1921 et traite de l'utilisation de ces appareils pour estimer et visualiser les stocks de poissons (Heldt, 1921). Dans ce domaine, la majorité des travaux actuels sont réalisés par des Américains. En juin 1987, Stephen Leatherwood du Muséum d'histoire naturelle de San Diego utilisa un dirigeable pour effectuer des survols de dauphins le long des côtes californiennes. Mais celui qui a donné l'impulsion décisive à l'utilisation de ce type de plate-forme en mammalogie marine est James Hain du « *Wood Hole Oceanographic Institution* » qui avec son équipe a effectué depuis 1989 plus de 50 vols pour un total de plus de 300 heures et de 5000 miles marins lors de survol de mammifères marins ou d'autres espèces protégées (Hain, 2000, 2001 et référence à l'intérieur). La liste de ces travaux portant sur le sujet est considérable et traite à la fois d'observation d'animaux et d'étude de leur comportement, mais aussi des essais de divers nouveaux matériels (acquisition vidéo, dispositif de vision nocturne, radiotracking, etc...). Les premières publications traitent principalement de l'évaluation de matériel et celles plus récentes des résultats des travaux de recherche (Hain, 2000, 2001 et références à l'intérieur). Lors de ces travaux, la côte californienne et de la côte Est des USA furent survolées dans des conditions climatiques allant du calme plat à des vents de plus de 4 sur l'échelle Beaufort. Durant ces vols, ont été observés les comportements de divers mammifères marins, de tortues, de requins, de raies, de poissons et d'oiseaux. Les chercheurs ont pu tester et améliorer diverses techniques d'observation ainsi que les divers équipements de mesure. Dès 1991, Hain avait conclu que le dirigeable constituait une plate-forme d'observation océanique unique pour certaines de ces utilisations. Cet aérostat combine la possibilité d'avoir des vitesses de survol très faibles avec des vitesses de croisière de plus de 65 km/h. De plus, l'aéronef peut être arrêté lorsque des observations le nécessitent, puis redémarrer pour suivre un animal à la nage sans le perturber. En ce qui concerne l'étude de mammifères marins, étant stable et presque sans vibration, le dirigeable constitue la plate-forme idéale pour des observations immobiles et silencieuses et pour l'acquisition de documents photographiques ou d'étude du comportement. De plus, des échantillons d'eau ou de plancton peuvent être

collectés. D'autre part, divers radars ou détecteurs peuvent être installés dans la nacelle, leurs rendements sont optimisés par le fait que la nacelle est quasiment exempte de vibration. Par exemple, l'addition d'un petit détecteur tel que le *AN/AAQ-22FLIR* permet de déceler un homme dans un radeau de survie à 6 km, donc des cétacés de grandes tailles peuvent être détectés en surface à des distances considérables (American blimp, comm. pers.).

Les nombreuses années de recherche effectuées par J. Hain, lui ont permis de conclure que les dirigeables constituaient les meilleurs engins pour des travaux de suivi à petite échelle. Si les autres moyens d'investigation permettent des études à grandes échelles, comme le suivi des migrations, les dirigeables semblent être l'engin le plus approprié pour élucider certains détails (comportement, alimentation, mise bas, etc...). D'autant plus que les zones où les impacts anthropiques sont importants et donc préjudiciables aux animaux y vivant sont le plus souvent compatibles avec leurs rayons d'action.

I-B-2-b-2-b-1- Etude du comportement et de l'habitat :

Il existe dans la littérature de nombreux exemples d'études comportementales effectuées à partir de plates-formes aériennes. Toutefois, grâce à sa grande facilité de positionnement, le dirigeable est nettement avantage par rapport aux avions, où les observations sont le fruit de nombreux survols circulaires ou de la chance. A la fois James Hain, chez les cétacés et Brad Weigle, pour les lamantins et les dauphins ont démontré l'avantage que présentent les aérostats lors de ce type d'étude. Grâce à des survols lents, Weigle a pu observer des comportements jusque là inconnus à la fois chez des dauphins (qui jouaient avec des poissons comme un chat avec une souris) et chez des lamantins qui surfaient dans les vagues d'étrave des bateaux). De plus, chaque observation peut être reliée à des données précises concernant l'habitat, comme par exemple, profondeur, nature du fond, type de végétation, etc... Des observations de baleines ont aussi été effectuées de nuit grâce à des équipements infrarouges spéciaux. Le succès de ces diverses missions est dû aux avantages combinés des aérostats, survols à faible vitesse et à la hauteur désirée.

I-B-2-b-2-b-2- Estimation de l'abondance :

Une fois qu'une zone a été identifiée comme importante pour un certain nombre d'animaux appartenant à une ou plusieurs espèces, il est indispensable d'avoir une estimation précise de l'abondance (recensement) (www.adventurer.co.nz/Airship/applications.html). Le plus souvent, des survols aériens permettent cette estimation qui reste cependant fortement dépendant des chercheurs qui effectuent les comptages et des facteurs de correction qu'ils appliquent à chaque type d'observation (Hiby et Hammond, 1989; Scott et Gilbert, 1982). Des éléments peuvent aussi entraîner des erreurs, par exemple des cétacés montant alternativement à la surface comme cela a été reporté pour de nombreuses espèces (Watkins et Moore, 1982). Une partie non négligeable des erreurs de comptage peuvent être éliminées lorsque les survols sont effectués à vitesse réduite, ce que les dirigeables peuvent parfaitement réaliser. Hain (2000, 2001) a noté, lors de ses nombreuses observations, qu'à faible vitesse, il était possible de repérer et d'identifier des animaux même s'ils évoluaient à faible profondeur sous la surface de l'eau ou effectuaient des apparitions très fugaces en surface. Comme les dirigeables peuvent voler à très basses vitesses, à des altitudes très faibles et cela pendant un temps très long, les divers comptages et observations sont sans ambiguïté. De plus, la distance peut être estimée avec précision et ce qui est

impossible en avion, la température de l'eau peut être mesurée et des prélèvements d'eau et de plancton peuvent être réalisés. Une multitude d'autres données très utiles lors de l'analyse des résultats peut aussi être accumulée, comme d'ailleurs pour les autres plates-formes aériennes, état de la mer, temps météorologique, moment de la journée, durée des immersions, etc...

Une autre méthode d'estimation de l'abondance qui est très utilisée est le marquage et recapture (par photographies successives chez les cétacés). Or cette méthode dépend de la qualité des photographies permettant d'identifier des marques spécifiques. Or, il est possible en dirigeable d'effectuer les prises de vues, vitres ouvertes et à une hauteur minimale sans risquer des embruns et de l'écume sur l'objectif et donc de fournir des éléments d'identification sans aucune ambiguïté. De plus, l'angle de prise de vue peut être choisi à l'avance, ce qui est plus difficile avec un avion effectuant des survols circulaires. Des travaux plus récents, ont montré qu'en utilisant des systèmes de détection électronique employés lors de la lutte anti-sous-marine, il était possible de détecter des cétacés jusqu'à une profondeur d'environ 7 mètres (www.lashwhalesearch.org/home).

I-B-2-b-2-b-3- Aide à la gestion :

Les études effectuées près des côtes correspondent le plus souvent à des zones où les impacts anthropiques sont très importants. L'analyse des données concernant le comportement et la distribution des mammifères montre que les interactions avec les activités humaines sont fréquentes. De ce fait, l'étude en parallèle et simultanée de ces deux éléments, peut aider à trouver les moyens de limiter l'impact humain sur l'environnement marin. Par exemple : Les côtes de la Georgie et du nord-est de la Floride sont connues comme un lieu hivernal de mise bas de la baleine de Biscaye (*Eubalaena glacialis*) (Kraus et coll., 1986). Une importante partie de la mortalité de ces cétacés, qui sont menacés, est d'origine humaine. Cette mortalité qui frappe principalement les juvéniles est due à des collisions avec des navires dans des couloirs où le trafic est important. Les observations à partir de dirigeables permettent d'étudier les comportements des cétacés lorsqu'ils sont en présence de navires, de localiser les sites précis où les risques de collisions sont les plus élevés, d'analyser les réactions des baleines vis à vis des navires et ainsi de proposer des stratégies pour prévenir ces accidents (limitation de vitesse, changements de couloir et/ou de procédures). L'utilisation de dirigeables serait aussi d'un grand secours dans des zones où le « *whale watching* » est intensif et porte préjudice aux animaux observés. La position des cétacés détectés par un dirigeable peut être envoyée à une station au sol qui la retransmet sans délai à tous les navires de commerce ou militaires présents sur zone (www.lashwhalesearch.org/home).

I-B-2-b-2-b-4- Bilan de l'utilisation des dirigeables lors d'étude des mammifères marins :

D'une manière générale, l'étude de l'interface eau/atmosphère ou sol/atmosphère nécessite des engins capables de voler lentement et calmement (peu de turbulences et vibrations), de raser la surface et de pouvoir effectuer du vol stationnaire, toutes des caractéristiques au delà des possibilités des avions. Si les hélicoptères peuvent accomplir ce genre de mission, leurs coûts, les nuisances sonores engendrées et la faible autonomie en fait des engins inappropriés pour des utilisations à longs termes. Comme n'importe quelle plate-forme, et spécifiquement aérienne, le dirigeable a des contraintes qui lui sont associées. Cependant la contrainte la plus souvent mentionnée – conditions

météorologiques – n'en est pas une lors d'étude de mammifères marins. En effet, l'expérience acquise sur diverses plates formes pendant plus de 10 ans par Hain (2000, 2001) a clairement montré que lorsque l'état de la mer dépassait 3 sur l'échelle de Beaufort et que les vents étaient supérieurs à 15 nœuds, l'observation de mammifères marins devient inappropriée. Lorsque le vent dépasse ce seuil, la perte de visibilité décroît rapidement. Ces valeurs sont très en deçà des limitations de vol des dirigeables utilisés pour ces missions qui se situent au minimum à 28 nœuds pour la vitesse de croisière.

Cependant, les vitesses des dirigeables étant faibles, avec des engins de volume inférieur à 6000 m³, il est impossible d'effectuer des survols de plusieurs centaines de miles. Leur emploi se limite donc aux zones côtières. De plus, les caractéristiques de vitesse et de performance des dirigeables impliquent qu'une base terrestre (pas forcément un aéroport) soit bien positionnée par rapport au théâtre d'opération. Un aérodrome situé à 45 miles des sites d'observations en mer, n'est qu'un handicap mineur pour un avion, alors qu'un dirigeable mettrait en moyenne une heure et demie pour le rejoindre, voire beaucoup plus, si les vents sont contraires. Confronté à ce problème, un dirigeable volant avec un vent de face consommera beaucoup plus, ce qui diminue d'autant le temps de travail dans l'aire opérationnelle.

Toutefois lorsque le planning et la logistique prennent en compte toutes ces contraintes et que les survols peuvent être effectués, le dirigeable est une plate-forme qui présente de nombreux avantages, le silence (relatif) lors de son utilisation dans des conditions météorologiques clémentes réduit considérablement les réactions animales et même le plus souvent, aucune réaction n'est observée de la part de la plupart des animaux si ce n'est des réactions de curiosité, comme des tonneaux de la part de dauphins ou des tortues qui tendent leur cou hors de l'eau « pour donner un coup d'œil ». Cet exemple, comme d'autres proposés par Hain (2000, 2001), souligne aussi la nature complémentaire que peuvent avoir les aérostats en tant que plates-formes de recherche, les actions pouvant être coordonnées de manière simultanée ou séquentielle avec d'autres « outils », tel que les bateaux, avions, balises, satellites, etc...

III- La nouvelle réglementation française stimulera-t-elle le développement du dirigeable scientifique ?

L'administration française est probablement la seule au monde à permettre au citoyen ou à une petite structure un accès facile au dirigeable (par exemple, www.levitation.fr/dirigeabledeloisir.htm, www.motoballon.fr.st/). En effet, le texte de l'arrêté relatif aux aéronefs ultra-légers motorisés (U.L.M.) du 23 septembre 1998, modifiés par l'arrêté du 15 mai 2001 indique dans l'article 2 : *Sont qualifiés U.L.M., les aéronefs monoplaces ou biplaces faiblement motorisés, répondant aux définitions de classes suivantes (...) Classe 5 - (dite aérostat ultra-léger). Un aérostat ultra-léger répond aux conditions techniques suivantes : - la puissance maximale continue est inférieure ou égale à 60 kW pour les monoplaces et à 80 kW pour les biplaces ; - le volume de l'enveloppe d'hélium est inférieur ou égal à 900 m³ ; - le volume de l'enveloppe d'air chaud est inférieur ou égal à 2000 m³.*

Il faut donc retenir qu'il n'y a pas de limitation de la masse maximale en vol, par contre, il y a une limitation de la puissance moteur, du nombre de places (2 au maximum), et bien que le texte soit ambigu sur ce point, le fait qu'ils doivent tous être capables de voler à 65 km/h ou à des vitesses inférieures ne s'appliquerait pas à la

classe V. Donc pour l'aérostat ultra-léger, la réglementation est simplifiée et plutôt "libertaire" (brevet simplifié, pas de certificat de navigabilité à renouveler chaque année, etc..).

Nous n'aborderons pas ici les montgolfières motorisées dont l'utilisation au niveau scientifique est très réduite. Par contre, il peut être utile de s'attarder sur les dirigeables de cette classe, cela d'autant plus, que divers « petits » constructeurs français travaillent sur des projets de ce type et certains des prototypes ont vu le jour en 2003 (<http://perso.wanadoo.fr/blimp/>, www.dirigeables.fr.st/). La classe ULM autorise jusqu'à 900 m³ pour un ballon à gaz. Ce qui permet (en théorie) de soulever une charge de 900 kg en atmosphère standard. Pour deux personnes et un moteur, il peut sembler qu'il y ait de la marge ! Mais il faut tenir compte de divers paramètres qui réduisent la masse à emporter. La charge d'hélium n'est jamais complète (risque d'éclatement) surtout si l'appareil doit monter en altitude et il est indispensable d'emporter du lest. Il est aussi indispensable d'avoir une marge suffisante en ce concerne l'altitude maximale pouvant être atteinte. Une quantité importante de carburant est indispensable (vol aller, vol retour et réserve en cas de changement des conditions météorologiques). Ce qui fait que l'appareil ne pourra transporter qu'une charge de 200-300 kg, donc un pilote, un scientifique et une quantité de matériel de recherche assez réduite et fonction de la masse des deux occupants. Il devient donc évident que les survols de vastes étendues maritimes sont exclus. Cependant, des utilisations scientifiques en zones terrestres ou près des côtes mériteraient d'être évaluées, d'autant plus que son coût d'utilisation resterait nettement inférieur à celui des grosses unités. Afin d'augmenter l'autonomie, des ravitaillements sur zone sont envisageables aussi bien en mer que sur terre. Toutefois, il serait important dans le futur de faire évoluer la réglementation, dans le sens d'une augmentation du volume au minimum à 2000 m³ et d'une autorisation du vol de nuit.

De plus, si le coût de l'heure de vol devait être sensiblement similaire à celle d'un avion de tourisme, il se rajoute une certaine quantité de problèmes annexes (communs aux dirigeables à hélium) :

- le plus important est le coût de la charge d'hélium, à 10 €/m³, la charge d'un 900 m³ reviendrait à 9000 € Même si d'énormes progrès ont été faits au niveau de l'étanchéité des enveloppes, des recharges seront toujours nécessaires et un accrochage involontaire ou un acte de malveillance peuvent créer des trous dans l'enveloppe. Dégonfler l'enveloppe serait donc à éviter, ce qui conduit à ne pas changer de site ou à le faire en volant.
- pilotage assez délicat surtout lors de vols près de la surface,
- temps de gonflage de l'enveloppe (plusieurs heures),
- difficulté d'approvisionnement en gaz,
- équipe au sol pour l'atterrissage (surtout quand le vent s'est levé),
- dilatation de l'enveloppe avec l'altitude (risque d'explosion), donc charge embarquée très faible pour un vol en altitude,
- nécessité d'un hangar ou d'un camion avec un mât si déplacement sur plusieurs sites,
- manœuvre délicate lors de la sortie ou de l'entrée dans le hangar.

Tout ceci incite à penser qu'un dirigeable à hélium ne peut être concevable que dans le cas d'un investissement relativement lourd, rentabilisé par une exploitation quasi-professionnelle.

Profitant de la nouvelle réglementation, divers groupes travaillent en France sur des projets de dirigeables à gaz. Trois prototypes ont volé en 2003, l'*Electroplume* (monoplace électrique de 150 m³) (Figure 4) (www.aeroplume.com/, www.airstar-light.com/), le monoplace *Liftium I* de 150 m³ construit par Didier Costes (didiercostes@wanadoo.fr) (Figure 5) et le biplace de 900 m³ *Voliris 900* (Figure 6) (www.voliris.com/). Parmi les projets dont des maquettes radiocommandés ont été testées en vol, nous pouvons citer les lenticulaires développés par Pierre Balaskovic (www.operation-lta.com/, www.airstar-light.com/fr/produits/sm1/index.php3?id=11), qui a comme projet de construire un dirigeable lenticulaire ULM d'un diamètre de 25 mètres. Actuellement Jean-Marc Geiser fait voler un modèle réduit de ce qui devrait être le *Zeppy 3*. J.-M. Geiser était le concepteur du dirigeable à pédales « *Continent* » d'un volume de 820 m³, gonflé à l'hélium, tapissé de cellules solaires chargeant des batteries qui alimentent l'électronique de bord et d'un moteur électrique d'assistance au pédalage. En mars 1992, les deux pilotes (Nicolas Hulot et Gérard Feldzer) n'ont pas réussi à traverser l'Atlantique, le dirigeable s'est perdu en mer après avoir parcouru 1 500 km entre les îles Canaries et les îles du Cap-Vert. Christian Bride (<http://dirigeables.ouvaton.org/dirigeables.html>) et la société Jump'air (www.jump-air.com/aerostat.htm) ont eux aussi des projets de petits dirigeables. D'autres projets français que nous ignorons sont probablement en cours, sans parler des constructions amateurs. De plus, de nombreux dirigeables construits ou en projet à l'étranger pourraient entrer dans la catégorie des ULM classe V. Par exemple, la série des dirigeables *Hornet* proposés par le groupe Australo-américain « *Advanced Hybrid Airships* » (www.ahausa.com/), le monoplace *Au-11* et le biplace *Au-12* russes qui ont déjà volé (www.rosaerosystems.pbo.ru/english/), le GA42 construit par la société britannique « *Thunder et Colt* » aujourd'hui rachetée par « *Cameron* », ce dirigeable a déjà rempli avec succès des missions scientifiques (<http://perso.wanadoo.fr/dirigeables/ga42.htm>), le biplace *Aeros 50* de la compagnie canadienne du même nom (www.aerosml.com/aeros-50_spec.asp), le monoplace *FS200* allemand (www.evo.aero/english/1_3_2_bemannet.htm), etc... Une mention particulière pour un projet, actuellement en sommeil, de dirigeable biplace nommé « *canopy trek ship* » proposé par l'université de Stanford pour l'étude de la canopée de forêts tropicales (www.lvcm.com/walden/products.html).

Les principaux freins aux développements des dirigeables ULM sont l'investissement important (coût d'achat et d'utilisation), la nécessité d'un hangar et le volume d'enveloppe faible, ce qui en réduit les utilisations professionnelles possibles autres que publicitaires.



Figure 4 : Dirigeable à propulsion électrique « *Electroplume* » piloté par Audouin Dollfus à Royan 2003 (photographie : E. Faure).



Figure 5 : Dirigeable *Liftium I* (photographie fournie par M. Didier Costes).



Figure 6 : Dirigeable *Voliris 900* (photographie fournie par M. Simon Theuveny).

IV- Les dirigeables à hélium sont-ils sûrs et quels en sont les coûts d'utilisation ?

IV-A- Risques potentiels liés à l'utilisation d'aérostats et contraintes météorologiques (Ces engins sont-ils sûrs ?) :

Si l'on analyse la ventilation des causes de disparition des 123 rigides détruits ou retirés du service pour d'autres raisons que des faits de guerre (Tableau II, d'après Balaskovic et Moizard, 1984), on observe que le remplacement de l'hydrogène par l'hélium, les nouveaux procédés de conception et les aides au pilotage, les matériaux actuels ainsi que les cahiers des charges aéronautiques la finesse actuelle des prévisions météorologiques éviteraient la majorité des accidents. Dans la littérature, il existe de nombreux articles mettant en évidence la sûreté d'utilisation des dirigeables. Par exemple, l'ensemble des dirigeables souples militaires américains a effectué plus de 13 800 000 kilomètres, plus de 200 000 atterrissages et décollages, transporté 1 000 000 de personnes, 350 vols annuels moyens et un taux d'utilisation en vol de 87% du temps.

L'altitude de vol des dirigeables (300 à 1000 m/sol) correspond au domaine atmosphérique le plus perturbé où les forces atmosphériques sont extrêmement violentes. A la différence de l'avion qui survole les perturbations météorologiques, le dirigeable doit les éviter en les contournant. Moyennant cette précaution élémentaire pratiquée systématiquement en aviation légère, le dirigeable ne court aucun risque ainsi que le prouve la carrière du *Graf Zepellin* (1928-1937). Rappelons pour mémoire que ce dirigeable parcourut plus de 1 700 000 km en 17 177 heures de vol, en transportant plus de 13 000 passagers et plus de 107 tonnes de courrier et de fret, survola cinq continents, et traversa 120 fois l'Atlantique entre l'Europe et le Brésil, réalisa le premier tour du monde aérien avec passagers en 1929 et cela sans rencontrer de problèmes météorologiques majeurs et sans aucun accident. Un dirigeable peut voler sous la pluie ou lors de mauvais temps. Comme c'est un engin flottant, il peut même résister à une tempête bien que cela soit très inconfortable pour l'équipage. Les dirigeables souples des *Coast Guards* de la marine américaine furent les seuls à rester en vol durant une tempête exceptionnelle qui sévit sur la Nouvelle-Angleterre dans les années 1955-1960 (Balaskovic et Moizard, 1984).

Il est possible, compte tenu d'une motorisation suffisante, d'obtenir des taux d'utilisation correspondant à plus de 95% des conditions météorologiques. Les dirigeables sont même moins sensibles à la neige et à la glace que les autres types d'aéronefs (pour lesquels les conséquences sont souvent dramatiques). En résumé, un dirigeable souple peut au minimum voler dans les mêmes conditions météorologiques qu'un avion ou un hélicoptère. La seule restriction par mauvais temps est qu'ils ne peuvent décoller ou atterrir par des vents supérieurs à 30 nœuds. L'excellente qualité des prévisions météorologiques actuelles permet, d'une part de guider les dirigeables de manière à les maintenir en dehors des zones dangereuses, d'autre part de prévenir suffisamment tôt les dirigeables au sol pour qu'ils puissent fuir à l'approche d'une tempête ou d'une chute de neige trop importante. Il reste cependant le problème de campement. En effet, un dirigeable au sol est soumis à deux dangers : la tempête et la neige. Ce sont les deux fléaux des dirigeables classiques. Ils nécessitent la présence de hangars de très grandes tailles si la stratégie d'évitement s'avère impossible. Notons

qu'en pressurant la carène, il est possible de supporter des couches de neige pouvant atteindre 20 cm.

Que se passe-t-il si des trous apparaissent dans l'enveloppe? Comme pour les ballons d'enfants, le gaz aérostatique est à une très faible pression dans l'enveloppe, juste suffisante pour garder la forme. De ce fait, si un petit trou apparaît, le gaz s'échappe très lentement. Même avec un nombre de trous importants, la flottabilité n'est que partiellement affectée et ceux-ci peuvent être réparés durant les inspections de maintenance. En 1994, le ministère britannique de la défense a fait tirer plusieurs centaines de balles dans l'enveloppe d'un dirigeable durant un test, ce dernier est encore resté en l'air plusieurs heures avant de se dégonfler et d'atterrir (*Shyship*, comm. pers.). Si un trou de grand diamètre se produit, la mission doit être interrompue le dirigeable pouvant le plus souvent, rentrer à la base par ses propres moyens.

De plus, même si tous les moteurs tombent en panne, ils peuvent rester en l'air pendant un temps très long et atterrir sans dommage pour les passagers, comme le prouve l'anecdote suivante : le 15 avril 1990, un *Skyship 600* volant à proximité des émetteurs radio extrêmement puissants de « *Voice of America* » a eu ses deux moteurs tombés en panne à cause de l'interférence électromagnétique (Nayler, 2002). Le vol s'est poursuivi comme en vol libre en ballon à gaz classique pendant une heure, jusqu'à ce que le commandant de bord trouve un terrain accueillant pour un atterrissage parfaitement exécuté. Quelques semaines après cet atterrissage de fortune, le temps de réparer l'enveloppe, l'aérostat a repris ses vols. Des incidents du même type se sont produits sur des aéroplanes à ailes fixes ou à rotors avec des conséquences fatales.

En conclusion, les dirigeables à hélium sont parmi les aéronefs les plus sûrs. Historiquement, les dirigeables souples détiennent, et de loin, le meilleur record de sécurité de tous les types d'engins volants.

Pourcentage	Causes de disparition	Modifications apportées de nos jours
> 50 %	Réforme après utilisation	
18%	Détruits par incendie	Remplacement de l'hydrogène par l'hélium
12%	Accidents en vol, au voisinage du sol ou à l'atterrissage	Les dirigeables modernes, de part leur conception et les aides au pilotage sont moins sensibles à ces problèmes
3%	Rupture en vol	Les structures actuelles ainsi que les cahiers des charges aéronautiques éviteraient ces problèmes
10%	Détruits par les conditions climatiques (tempête, givrage, etc...)	La finesse actuelle des prévisions météorologiques rendrait ce risque voisin de zéro

Tableau II : Causes de disparition des 123 rigides détruits ou retirés du service pour d'autres raisons que des faits de guerre d'après Balaskovic et Moizard (1984).

IV-B- Coûts d'achat et d'utilisation :

Le prix d'un dirigeable reste très élevé, les moins chers du marché semblent être ceux de fabrication russe, un 900 m³ (*AU-12*) est proposé par la société *Rosaerosystems* (<http://rosaerosystems.pbo.ru/english/products.html>) à environ 160 000 € et un 4000 m³ atteindrait 1 000 000 €. Les prix des équivalents anglo-américains sont plus élevés mais là aussi, ils sont à comparer aux plates-formes ayant des possibilités équivalentes.

Nous allons détailler certains des postes les plus budgétivores lors de l'utilisation de ces engins. Comme cela a été déjà souligné, il faut limiter le nombre de charge d'hélium, ce qui passe par un choix très rationnel et optimisé des sites d'utilisation. Il est vrai qu'il est possible de récupérer l'hélium contenu dans l'enveloppe et de le réinjecter après l'avoir dépolluée. Ce procédé est proposé par la société *Linde*

(www.linde-gas.co.uk/), mais le coût reste très élevé et l'appareil a la taille d'un container. Malgré la permanente amélioration de l'étanchéité des enveloppes, les fuites sont continues, par exemple, d'après les données mêmes d'un constructeur (www.americanblimp.com/) les pertes par jour s'élèvent au minimum à 1,5/1000 du volume de l'enveloppe, donc plus du quart du volume de l'enveloppe doit être supplémenté par an. Cet élément ne grève pas le budget des USA où le prix de l'hélium est faible (4 €/m³), il n'en est pas de même en France !

La maintenance de ce type d'aéronef est plus restreinte que celle d'un hélicoptère pour prendre un autre engin capable d'effectuer du vol stationnaire, environ ½ heure de maintenance pour une heure de vol (www.americanblimp.com/). De plus, la majorité des inspections - dont le changement de moteur peut s'effectuer - lorsque le dirigeable est retenu au mât, les hangars (par exemple, ceux de maintenance des avions de ligne) n'étant utilisés que pour les inspections annuelles. Si laisser le dirigeable au mât permet d'économiser un hangar, cela diminue la durée de vie de l'enveloppe et augmente les risques d'incident par vent violent.

Si les dirigeables sont amarrés dans la même base, il suffit pour trois engins de deux mécaniciens et d'un électricien assurant la maintenance instrumentale. Les équipages au sol (hormis le responsable de l'équipe au sol) n'ont pas besoin de qualification ; il est donc aisé de trouver cette main-d'œuvre peu qualifiée (www.americanblimp.com/). Le problème des pilotes ne se pose pas non plus, actuellement, il y a sur le marché des pilotes russes qualifiés travaillant pour 20 €/h.

Un des facteurs déterminant dans le développement de l'utilisation des dirigeables lors de missions scientifiques est bien évidemment le coût d'achat éventuel et d'utilisation de ce type de plates-formes. Il faut le reconnaître, les coûts d'acquisition et/ou d'utilisation des dirigeables reste en effet élevé. Seules des agences regroupant plusieurs partenaires institutionnels ou non pourraient rentabiliser de manière rationnelle l'utilisation de ces appareils. Pour être rentable, tout équipement doit être utilisé à plein temps, seuls des projets pluridisciplinaires (et compatibles) peuvent permettre de réduire les coûts globaux et de partager les connaissances sur le matériel et donc de l'améliorer. Une autre contrainte qui grève le budget est le nombre d'équipages nécessaire au sol. Ce nombre pour un dirigeable à hélium est environ de 15 (comme pour le *Skyship-600*). Ce paramètre doit être adressé aux constructeurs; par ailleurs, des essais sont en cours pour développer des camions nommés « mules » qui permettraient de mécaniser ces opérations et d'en réduire les coûts (Hain, 2000, 2001). La conception de nouveaux moteurs et système de direction devrait aussi permettre de réduire l'équipage.

Le tableau III montre que les dirigeables, comme les autres plates-formes existantes, présentent une variété de taille, de capacité et de coût. L'estimation du coût est très difficile à effectuer, nous nous sommes basés sur une réactualisation pour 2003 des travaux de Hain (2000, 2001) et sur les données fournies par les constructeurs et les prestataires. Toutefois, ce tableau met en évidence que le rapport coût/capacité n'est pas très différent des autres plates-formes. De plus, comme pour les autres plates-formes, les progrès technologiques et les possibilités ne cessant d'être améliorés, cela pourrait, dans certains cas, diminuer les coûts.

Plates-formes	Longueur ou volume	Nombre de scientifiques à bord	Membres d'équipage	Coût/jour en €* en €	Coût/heure de vol en €	Autonomie en mission
Navire						
NOAA	62 m	15	18	29 000		Plusieurs jours

<i>Albatross IV</i>						
<i>Abel-J</i>	35 m	4	6	7 500		Plusieurs jours
Aérodynes						
<i>CG HH-60J</i> hélicoptère		3-4	3		5300	4 heures
NOAA <i>Twin Otter</i>		4-5	2		1400	4 heures
<i>C-337</i>		3	1-2		500	4 heures
DOE <i>Gulfstream G-1</i>		4	1-2		500	4-5 heures
Dirigeable						
<i>Skyship 600</i>	6000 m ³	4-5	2	18 000		10 heures
<i>Lightship A-150</i>	4500 m ³	3-4	1	14 000		8-10 heures
<i>US-LTA 138S</i>	3900 m ³	3-4	1	13 500		8-10 heures
<i>Lightship A-60+</i>	2000 m ³	2	1	12 500		4-6 heures
<i>CDE</i> (prévision)	1200 m ³	1	1	6 000		>5 heures
<i>Voliris</i> (prévision)	900 m ³	1	1	4 000		5 heures
<i>CDE</i> (prévision)	500 m ³	1	1	3 300		1,5-5 heures

Tableau III : Comparaisons des coûts d'utilisation entre différentes plates-formes utilisées au niveau scientifique. NB : les calculs ci-dessus peuvent être sujets à caution et ne sont donnés qu'à titre indicatif pour les dirigeables. *la mission journalière dure environ 5 heures y compris le temps aller-retour pour aller sur zone et revenir. CDE = Compagnie des dirigeables électriques, France.

V- Quelles seraient les caractéristiques d'un dirigeable conçu pour des missions scientifiques ?

De nombreux dirigeables ont été utilisés lors de diverses applications et ainsi ont pu être comparés à d'autres plates-formes prises individuellement ou en association (avion/bateau, etc...). Toutes ces expérimentations ont été effectuées sur des dirigeables non conçus pour ce type de travail (le plus souvent des dirigeables publicitaires). Comme cela a déjà été souligné dans le chapitre D4, l'appareil doit non seulement être économique, performant, silencieux et sûr mais aussi présenter des caractéristiques spécifiques pour accomplir les missions prévues.

Durant ces nombreuses années d'utilisation naturaliste de dirigeable, James Hain (2000, 2001 et références à l'intérieur) considère qu'il serait maintenant approprié de prendre en considération un dirigeable spécialisé dans ce type de mission. Il suggère que dans un premier temps, les agences ou instituts environnementaux pourraient louer les appareils sur de longues périodes avant d'envisager l'achat ou la construction d'un appareil spécifique. Toutefois un autre océanographe américain Brad Weigle a franchi directement ce pas, en construisant le premier dirigeable spécialement conçu pour des missions naturalistes (www.ecoblomp.com/).

Dans le futur, il serait nécessaire pour une meilleure rentabilité en opération, soit de modifier ou d'adapter les dirigeables soit d'en construire des spécifiques pour les utilisations scientifiques. Fort de l'expérience des pionniers dans le domaine (James Hain, Brad Weigle, Bill Plant, Bill Hoppel, etc...), les caractéristiques du dirigeable scientifique du futur sont définies ci dessous.

V-A- Amélioration de la visibilité et du champ de vision pour les observations :

Pour de nombreuses recherches naturalistes, y compris l'observation de mammifères marins, la visibilité par dessous et vers l'avant est primordiale, donc une nacelle à grande surface vitrée permettant une vision panoramique serait un minimum, la vision vers l'avant étant limitée par le tableau de bord et tous les instruments de navigation. Bien qu'il ne s'agisse pas de la meilleure option, des caméras pourraient être ajoutées dans tous les angles morts. Des modifications pourraient aussi être apportées pour rendre le champ de vision libre, par exemple, installer des sièges dans le nez de l'appareil comme cela a été fait pour un avion (*Beech AT-11 modified*) utilisé fréquemment lors de missions de survols « *offshore* » d'animaux marins. Ce poste d'observation permet une vision latérale de 180° et une vision de 70° par dessous. Un poste de ce type pourrait être ajouté à l'avant de la nacelle, toutefois le coût de cette modification nous fait penser que le système le moins coûteux et qui ne nécessiterait pas de modification de la nacelle serait une bulle amovible en plexiglas ou matériel équivalent directement accrochée sous la nacelle (Hain, 2000). Cette bulle serait accessible par une trappe à partir de la nacelle, elle contiendrait un ou deux sièges et le champ de vision serait hémisphérique. D'autre part, de nouveaux matériaux transparents pourraient être testés, en effet, ceux utilisés actuellement vieillissent, assez souvent mal, ce qui gêne l'observation surtout lorsque le soleil est de face rendant la prise de photographies impossible.

V-B- Configuration spécifique de la nacelle :

Pour une utilisation scientifique, de nombreux aménagements doivent être spécifiques, comme des sièges surélevés et rotatifs sur 360°, de nombreux casiers de rangements, divers systèmes de fixations extérieurs pour des antennes et matériel de mesure, des trappes pour pouvoir descendre des instruments de mesure ou de prélèvement au niveau de la canopée ou de la mer, etc... La présence d'une source puissante d'alimentation électrique est aussi indispensable. La construction devrait être effectuée en concertation avec les scientifiques utilisateurs.

V-C- Diminution du bruit :

Lors de vent de face, sur l'aire opérationnelle de survol, un dirigeable dont les moteurs tournent à la puissance maximale, devient bruyant. Lors de ses survols, Hain (2000, 2001) a observé qu'un fort pourcentage (>50% dans quelques cas) d'animaux de toutes espèces réagissent à la présence d'un dirigeable en plongeant ou en changeant de route. C'est encore plus flagrant lorsque les altitudes de survols sont faibles (<100 m).

A ce jour, les moteurs de dirigeable sont relativement bruyants, moins toutefois que ceux des hélicoptères, avions et ULMs. Ce niveau sonore peut être préjudiciable à l'observation de nombreux animaux comme, par exemple, lors d'observations d'espèces menacées. Des efforts doivent être faits, pour diminuer le niveau sonore ainsi que la production de certaines fréquences. Les divers opérateurs spécialisés dans les dirigeables ont toutefois souligné que les silencieux actuels entraînent une perte importante de puissance. Des systèmes permettant de court-circuiter les silencieux lors des phases où la puissance maximale serait indispensable pourraient être envisagés. Un

bon compromis entre les nuisances sonores et les performances du moteur peut être obtenu par l'utilisation d'une motorisation puissante soigneusement insonorisée, entraînant des hélices conçues spécialement pour cette application. Pour des missions très particulières, comme le dénombrement d'oiseaux à basse altitude, l'utilisation de dirigeables électriques pourrait être la meilleure solution. La « *Compagnie des Dirigeables Electriques* » (www.aeroplume.com/, www.airstar-light.com/) souhaite développer des dirigeables ULM totalement électriques donc sans nuisances sonores, l'inconvénient majeur restant aujourd'hui le poids des batteries et leur autonomie. Le premier modèle nommé *Electroplume* semble très prometteur (Figure 4). Dans un futur beaucoup plus lointain, les dirigeables qui auront un volume important seront probablement à énergie mixte (énergie photovoltaïque/pile à combustible). En effet, la surface très importante des dirigeables peut être couverte de cellules photovoltaïques. L'énergie électrique récupérée lors des phases d'ensoleillement sera utilisée pour fournir l'énergie aux moteurs de propulsion et aux moteurs auxiliaires. Le surplus d'énergie sera utilisé pour électrolyser l'eau fournissant ainsi de l'hydrogène et de l'oxygène qui seront stockés. Lors des phases de vols nocturnes ou de jour, mais en absence de soleil, une pile à combustible utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène fournira l'énergie électrique en produisant de l'eau réutilisée lors des phases d'ensoleillement. De plus, l'hydrogène produit pourrait être employé pour remplacer les pertes de gaz porteur et l'eau récupérée servir de lest. M. Pierre Chabert, patron d'Airstar peaufine le projet de traverser l'Atlantique dans un petit dirigeable tout-électrique alimenté par une pile à combustible (www.airstar-light.com/).

V-D- Amélioration des systèmes de propulsion, de manœuvrabilité et diminution des coûts d'exploitation :

Pour que le dirigeable ne soit pas soumis aux caprices du vent ou des courants aériens, il doit obligatoirement se déplacer au moyen d'un moteur efficace et sûr. Pour cela, il lui faut vaincre la résistance de l'air en étant aérodynamique (forme de fuseau ou de soucoupe), tout en restant mobile et indépendant par rapport au vent. Pour qu'un ballon soit vraiment dirigeable, il faut que la vitesse que lui imprime son moteur soit supérieure à celle du vent: plus la différence est grande, plus le dirigeable obéit à son pilote.

Lors des missions naturalistes, il peut être nécessaire de voler près de la surface (mer, canopée, etc...). Il est donc indispensable d'avoir un pilotage très précis, d'autant plus qu'il n'est jamais parfaitement aisé de contrôler la flottabilité sur un dirigeable à hélium. Cela peut passer par l'amélioration des systèmes de propulsion et des commandes de gouvernes et l'ajout d'une assistance électronique au pilotage. Cela permettrait aussi des atterrissages sur des terrains de très faible dimension.

Bien que cela ne soit pas spécifique aux missions naturalistes, il serait indispensable de simplifier les manœuvres d'approche et de les rendre plus autonomes. De nouveaux systèmes de propulsion pourraient permettre de réduire le nombre d'équipiers au sol lors des phases d'atterrissages/décollages et d'effectuer ces manœuvres jusqu'à des vents de 40 km/h. De plus, il est important d'avoir des moteurs puissants car la « dirigeabilité » n'est assurée qu'en fonction de la vitesse du vent. Un dirigeable faisant du 50 km/h par temps calme ne peut sortir du hangar dans des régions tempérées que 250 jours par an en moyenne. Par ailleurs, les moteurs doivent être les plus puissants possible pour imprimer au dirigeable une vitesse propre. Ils doivent être

aussi les plus légers possibles. Ces deux conditions ont longtemps été contradictoires, d'autant plus que l'effort nécessaire pour faire avancer un aérostat est proportionnel, non pas à l'augmentation de puissance du moteur, mais au carré de la vitesse.

V-E- Compilation des instructions techniques concernant les dirigeables :

En ce qui concerne les opérations maritimes, l'*US Navy* avait une grande expérience des traversées océaniques en dirigeable souple, mais ce savoir a disparu, tous les pilotes et mécaniciens étant à la retraite et les diverses informations recueillies sont dispersées, archivées et même perdues pour certaines. Il serait indispensable d'effectuer une compilation de toutes les données recueillies au niveau des opérations de pilotage, que des facteurs météorologiques, des procédures d'urgence ou de sécurité, etc...

VI- Développements futurs de l'aérostation scientifique en France :

Comme l'ont montré nos collègues américains, le développement de l'aérostation scientifique ne peut passer que par la création d'une agence (au sens américain du terme) regroupant plusieurs partenaires institutionnels ou non. La création en cours d'une équipe de recherche technologique (ERT) intitulée « *Aérostation scientifique* » sur le site de l'université de Provence (Marseille) va dans ce sens. Cette équipe regroupe de nombreux experts dans les divers domaines des sciences environnementales (physico-chimie, zoologie, botanique, écologie, etc...). Les projets de mission sur lesquels cette équipe travaille sont multidisciplinaires et compatibles entre eux, ce qui permettra de rentabiliser de manière rationnelle l'utilisation de dirigeables lors de missions terrestres ou océanographiques. Parmi tous ces projets, le plus avancé concerne le suivi de la régénération post-incendies des forêts des massifs des Maures et de l'Estérel (France) qui comprend des séries de relevés à haute définition avec des appareils photographiques et radars (IRs et micro-ondes). Seront mesurés : le LAI (indice foliaire), le taux de couverture, le port foliaire, la taille des feuilles, la hauteur du couvert, les teneurs en chlorophylle et en eau, la température, l'humidité en surface, les valeurs d'évapotranspiration, ce qui peut mesurer le degré dessèchement de la végétation (cartographie des zones inflammable), données capitales en terme de prévention. Les études zoologiques concerneront la capture d'insectes de jour et de nuit à diverses altitudes, le radio-tracking d'espèces rares et protégées et la microcartographie, dans des zones proches des lieux d'étude, des aires de nidification d'oiseaux dans des sites difficiles d'accès (roselières, marais, zones humides). Le travail sera étendu aux mares temporaires avoisinantes avec des mesures spectrales de la concentration en chlorophylle, de la température, de la turbidité, de la superficie et des apports sédimentaires, dynamique des submersions, quantification des migrations entomologiques. Il est également envisagé de détecter les blooms algaires (cyanophycées) toxiques pour l'homme ainsi que les gîtes de ponte d'Anophèles, vecteurs potentiels de maladies parasitaires émergentes (West-Nile, Paludisme) sous l'influence du réchauffement climatique.

En plus de l'établissement de projets permettant la réduction des coûts globaux des missions, 3 autres axes sont développés par l'équipe :

- Evaluation des besoins exacts des chercheurs en matière d'aérostation scientifique.

- Définition d'un cahier de charges concernant le matériel embarqué. Il est nécessaire d'avoir du matériel léger, peu « énergivore », résistant et peu coûteux. Or la majorité du matériel existant est inadapté, celui embarqué sur les satellites est hors de prix et le plus souvent inadapté, le matériel « terrestre » est lourd et également « énergivore ».
- Collaboration avec les industriels pour la validation de l'outil aérostat pour les applications scientifiques, dans un premier temps avec les fabricants d'aérostat et dans un deuxième, avec ceux de matériel scientifique.

Cette équipe constituera aussi un lieu de partage des connaissances sur le matériel embarqué permettant ainsi son amélioration. Cette partie pourra être effectuée en collaboration avec l'Association « *Objectif base dirigeables* » qui a pour but la mise en place d'une base pour dirigeables. La vocation de cette base sera double. Une première vocation est de favoriser le développement de nouveaux projets de ballons dirigeables, notamment des dirigeables ULM classe 5, en mutualisant hangars, installations de gaz et terrains de manœuvre. Une deuxième vocation est de devenir une pépinière d'entreprise ayant des activités liées à l'aérostation. Cette base constituera une opportunité pour l'ERT, entre autres, lors des premières étapes d'essai de matériel scientifique embarqué.

VII- Conclusions :

Pour l'évaluation de tous types de plates-formes, il est nécessaire de répertorier la liste de tous les inconvénients et de tous les avantages et d'effectuer un bilan. Par exemple, à ce jour, l'hélicoptère est souvent utilisé à défaut de mieux, alors qu'il s'agit d'un engin énergivore, bruyant et de faible autonomie. Dans le tableau IV, tous les inconvénients sont répertoriés avec la liste des modifications à apporter dans le futur.

Inconvénients	Solutions à apporter dans le futur
Coût de la charge d'hélium (en France, 10 € le m ³ pour de l'hélium pur à 99 %)	Enveloppe la plus étanche possible Ajout d'un faible pourcentage d'hydrogène ? Récupération et dépollution de l'hélium lors d'un dégonflage
Coût de l'appareil	Création d'agences regroupant plusieurs partenaires Utilisation rationnelle Projets pluridisciplinaires
Pilotage délicat	Aide au pilotage électronique
Temps de gonflage de l'enveloppe (plusieurs heures)	Eviter les dégonflages (transport sur site par ses propres moyens)
Difficulté d'approvisionnement en gaz	Prévoir la logistique
Equipe au sol lors des phases d'atterrissages/décollages	Utilisation de système de propulsion permettant de simplifier les manœuvres et de réduire l'aide au sol
Dilatation de l'enveloppe avec l'altitude (risque d'explosion)	Réserver certains engins pour les vols en altitude ou utiliser des dirigeables radiocommandés
Nécessité d'un hangar	Amarrage à un mat sauf pour les contrôles techniques et construction de hangars gonflables mobiles

Tableau IV : Liste des inconvénients présentés par les dirigeables actuels et principales solutions à apporter dans le futur.

Dans le tableau V, les avantages sont comparés à ceux des autres plates-formes. Les performances actuelles ouvrent des créneaux d'utilisation différents de ceux des moyens existants et les complètent. Aujourd'hui pour de nombreuses utilisations, l'hélicoptère est employé alors que ce n'est pas l'engin le plus approprié. Les dirigeables représentent une alternative sûre, séduisante et économique à l'utilisation

des autres types d'aéronefs. Ce ne sont pas les rivaux des avions ou hélicoptères, mais ils peuvent remplir pleinement des missions particulières pour lesquelles les aérodynes plus conventionnels seraient inopérants. Les dirigeables sont en moyenne quatre fois plus rapide qu'un navire, ne nécessitent pas d'infrastructure terrestre spécifique, sont économes en énergie (une économie d'environ 60 % de carburant par tonne transportée par rapport à un hélicoptère). Durant un week-end en opérations, le *Skyship 600* consomme moins de carburant qu'un *Boeing 767* allant simplement du parking à la piste d'envol!), peu polluant, il constitue donc le complément naturel des véhicules aériens et terrestres existants. En outre, de part sa nature aérostatique, il est le vecteur idéal de tout système de contrôle de zones de grandes étendues. Ils peuvent être utilisés dans des zones posant le problème des transports de surface comme la plaine amazonienne ou les zones polaires où le climat et la nature du sol rendent très coûteux la construction et l'entretien des routes, voies ferrées et aérodromes. Le dirigeable ne nécessite aucune infrastructure lourde du type piste d'atterrissage en dur du fait qu'il ne pèse rien et peut même se poser sur un sol mou. De plus, les avancées technologiques dans le domaine des matériaux, de la motorisation et du pilotage en feront des engins encore plus fiables et manœuvrants. La grande stabilité et l'absence presque totale de vibration entraînent moins de fatigue du matériel et de l'équipage et permettent d'utiliser des appareillages très fragiles.

Eléments comparés	Types de plates-formes			
	dirigeable	avion	hélicoptère	navire
évolution à très faible vitesse	+++	-	+++	+++
vol stationnaire prolongé	+++	-	++	
évolution en vol stationnaire (tourner presque sur place)	+++	-	+++	-
possibilité d'arrêter les moteurs lors de certaines phases	+++	-	-	+++
l'engin n'est pas en contact avec le milieu aqueux (missions en mer)	+++	+++	+++	-
vitesse de croisière	+	+++	++	-
économe en énergie/masse transportée	++	-	--	+++
peu polluant/masse transportée	++	-	--	+++
nuisances sonores relativement faibles	+	-	-	-
très sûr (moteurs en panne, l'engin vole toujours)	+++	-	-	
pas ou très peu de vibration et grande stabilité	+++	-	--	-
économie d'infrastructures	+++	-	+	
autonomie	++	+	-	+++

Tableau V : Avantages comparés des divers types de plates-formes.

A ce jour, l'utilisation des aérostats (principalement des dirigeables) au niveau scientifique a fait ses preuves de manière convaincante comme le témoigne le nombre de résultats publiés. Nous avons répertorié plus d'une centaine de publications traitant de l'utilisation scientifique des dirigeables dont quelques travaux majeurs. L'incorporation récente de nouvelles technologies devrait permettre des avancées significatives dans la recherche de nouvelles utilisations (Hain, 2000, 2001, www.lashwhalesearch.org/home), il est certain qu'un grand nombre de nouvelles

applications pouvant être remplies uniquement par les dirigeables peuvent être découvertes. Les dirigeables, malgré leurs potentiels immenses, sont actuellement sous utilisés (presque uniquement pour des objectifs publicitaires, de surveillance et le transport des cameramen); les missions scientifiques pourraient être un débouché déterminant dans le développement de cette activité. De plus, toutes les technologies encore émergentes offrent d'intéressantes possibilités d'évolution des aérostats. Les plus prometteuses sont sans doute le solaire et les piles à combustible. Cette rétro-innovation pourrait bien être la plate-forme du futur pour les missions naturalistes mais aussi pour de nombreuses autres applications scientifiques ou non.

Si l'on excepte les travaux de physico-chimie, les deux applications les plus importantes des dirigeables faisant l'objet d'un suivi sur les vingt dernières années concernent à ce jour l'étude des cétacés et de la canopée de forêt tropicale ou équatoriale, (deux sujets emblématiques à hautes retombées médiatiques donc augmentant les chances d'obtenir crédits et sponsors). Toutefois, bien que l'utilisation d'aérostat en science ait donné entièrement satisfaction, cette approche relativement récente nécessite encore toute une série d'évaluations ainsi que la mise au point de nouvelles méthodologies. Toutefois, si on prend l'exemple de travaux où d'autres types de plates-formes étaient déjà utilisés comme les survols aériens lors d'étude des mammifères marins, les dirigeables ont fait la preuve de leur efficacité. Ils peuvent être considérés comme des compléments importants des autres types de plates-formes connues, principalement lors de travaux où leurs spécificités les rendent indispensables. En effet, leurs faibles vitesses et la possibilité de s'immobiliser sont les meilleurs atouts de ces engins. Par exemple, il est possible d'observer des cétacés dont seulement une portion de queue sort de la surface, lorsque les apparitions sont fugaces ou que l'animal reste immergé près de la surface et cela en gardant l'angle de vision optimal. Des prélèvements peuvent être effectués soit en mer soit au niveau de la canopée sans qu'il y ait de turbulences néfastes comme celles observées lors d'utilisation d'hélicoptère. De plus, ces survols lents permettent d'augmenter le nombre de données recueillies sur un lieu donné (par exemple pour les cétacés, nombre précis et sans ambiguïté d'individus, estimation précise de leur taille, identification des marques caractéristiques, analyse du comportement, etc...). De nombreuses autres missions pourraient être dévolues aux aérostats (en association dans certains cas avec d'autres plates-formes), par exemple en ce qui concerne l'acquisition de données primordiales à la protection de mammifères marins (répartition dans l'espace et le temps, suivi de l'abondance, influence anthropique, caractérisation fine de l'habitat).

Le coût d'utilisation de ces engins peut toutefois sembler un élément en défaveur de l'addition d'un nouveau type de plate-forme scientifique. Aux USA, le concept d'une agence regroupant plusieurs partenaires institutionnels ou non qui utiliseraient ce type de plates-formes a été discuté dans de nombreux congrès nationaux (NOAA, 1993 ; UNOLS, 1994 ; Hain, 1999). De nos jours, où les crédits de recherche sont de plus en plus réduits, l'ajout d'une nouvelle plate-forme à celles déjà existantes requiert des arguments convaincants, le principal étant que ces engins peuvent accomplir des missions impossibles à effectuer avec les autres appareils. Dans l'immédiat, dans le cadre de missions de recherche bien défini, et en l'absence de dirigeable conçu à cet effet, la location de ces appareils semble rester la solution la plus séduisante. Le coût des dirigeables reste très élevé. Pour être rentable, tout équipement doit être utilisé à plein temps et seuls des projets pluridisciplinaires (et compatibles) peuvent permettre de réduire les coûts globaux et de partager les connaissances sur le matériel et donc de l'améliorer. De plus, lorsque cela est possible, l'utilisation d'aérostats rentrant dans la

classe V ULM permettrait de monter des missions à des coûts inférieurs à celles utilisant les autres types de plates-formes. Le futur nous dira si nous allons assister à une renaissance de l'aérostation scientifique à laquelle la guerre de 14-18 a porté un coup d'arrêt. Jusqu'à 1914 existait une « *Commission Internationale pour l'Aérostation Scientifique* » et « *Commission Internationale Polaire d'Aérostation Scientifique* » qui publiaient divers comptes-rendus de travaux effectués avec des plus légers que l'air (cf par exemple, Lecornu, 1912).

En conclusion, les aérostats ont fait la preuve de leur efficacité en tant qu'outils scientifiques, ils peuvent être considérés comme des compléments importants des autres types de plates-formes connues, principalement lors de travaux où leurs spécificités les rendent indispensables. Par exemple, ils peuvent représenter une alternative efficace, sûre, séduisante et économique à l'utilisation des autres types d'aéronefs. Leurs caractéristiques spécifiques font que leur emploi lors de recherches environnementales semble particulièrement approprié, et la continuité des travaux portant sur des animaux ou des espaces à protéger et sensibles doit être fortement soutenues et développées.

Remerciements : Les ministères français de l'environnement, de la recherche et des transports, l'Université de Provence, la *Guilde des aéronautes d'Arhakis*, les membres de la mission *Radeau des cimes 2001*, en particulier (F. Hallé et D. Clayet-Marrel), *Pronatura International*, l'association *le rêve d'Icare* (Royan). Nous remercions aussi pour les documents photographiques et bibliographiques qu'ils nous ont fourni : le Dr. William J. Plant (*Applied Physics Laboratory*, University of Washington, USA) - le Dr James Hain (*Wood Hole Oceanographic Institution*, USA), la société *US-LTA* (Oregon, USA) et le pilote de dirigeable Pierre Ponomareff.

Note : L'ouvrage suivant : "*Des dirigeables au service de la science – l'Aérostation Scientifique - Proceedings of the 1st International Symposium of Scientific Aerostation – Royan, France, June 2003*" contient de nombreuses publications traitant sur ce sujet. Ed. PUP, Université de Provence, Marseille, France, sous presse 2004.

Références

- Anonyme, 1914. The utility of airships in the treatment of tuberculosis. *J. Franklin Inst.*, 177 (3) : 361.
- Arago F., 1856. *Oeuvres complètes de François Arago*. Tome 9, Instructions, rapports et notices sur les questions à résoudre pendant les voyages scientifiques. Chapitre premier : «Sur la découverte des ballons» et «Sur les voyages aéronautiques exécutés dans l'intérêt de l'avancement des sciences», Publiées d'après son ordre sous la direction de M. J.-A. Barral, Paris, 1856, p. 489-493.
- Balaskovic P. & Moizard F., 1984. *Les ballons du Futur*. Seci ed. Paris.
- Batchvarova E., Cai X.M., Gryning S.E. & Steyn D., 1999. Modelling internal boundary-layer development in a region with a complex coastline *Boundary-layer. Meteorology*, 90 (1) : 1-20.
- Biologie d'une canopée de forêt équatoriale II*, 1992. Halle F. & Pascal O. éd., Publ. Fondation Elf, Paris, 288 pages.

- Biologie d'une canopée de forêt équatoriale III*, 1998. Halle F., éd., Publ. ProNatura International et Opération Canopée, 153 pages
- Biologie d'une canopée de forêt équatoriale IV*, 1999. Halle F., éd., Publ. ProNatura International et Opération Canopée, 168 pages
- Biologie d'une canopée de forêt équatoriale V*, 2003. Halle F., éd., Publ. ProNatura International et Opération Canopée (sous presse).
- Biologie d'une canopée de forêt équatoriale*, 1990. Halle F. & Blanc P. éd., Xylochimie, Publ., Marseille, 231 pages.
- Blanc T.V., Keller W.C. & Plant W.J., 1989a. Oceanography from a blimp. *Sea Technology*, 30, (6) : 23-28.
- Blanc T.V., Plant W.J. & Keller W.C., 1989b. An experiment using a blimp as a platform for conducting oceanographic research. *Proc. Mar. Data Syst.*, 30 : 147-152.
- Blanc, T.V., Plant W.J. & W.C. Keller, 1989c. The Naval Research Laboratory's Air-Sea Interaction Blimp Experiment. *Bull. Am. Met. Soc.*, 70 (4) : 353-365.
- Brandreth E.J.Jr., 2000. Airships: An ideal platform for human or remote sensing in the marine environment. CD-ROM, MTS/IEEE OCEANS 2000 - Where Marine Science and Technology Meet, Providence, RI (USA), 11-14 Sep 2000.
- Cresswell G., 1989. Oceanography from an airship. Unpublished manuscript. Hobart, Australia : CSIRO Marine Lab. 9pp.
- Cull J.P., 1989. Airborne sirotem. *Exploration Geophysics*, 20: 399-402.
- Dans l'air*, 2001. collection BT2, éditions PEMF, Mouans Sartroux.
- Facon P. & Debaecker J.P., 2001. *Ballons, montgolfières et dirigeables*. Ed. Proxima, Paris.
- Faure E., 2000 et 2001. Historique des aérostats, *Le Toupin* n° 48, fév 2001, p7. n° 47 janv 2001 p6, n° 46 déc 2000 p6, n°45 nov 2000 p7 et n°44 oct 2000 p4.
- Faure E., 2002. *Les papillons des cimes*. Film documentaire de 30 min. Faure E., réalisateur, la Guilde des Aéronautes d'Arhakis, producteur, Marseille, France.
- Faure E., 2004. Description des divers types d'aérostats utilisés lors de missions naturalistes. *Proceedings of the 1st International Symposium of Scientific Aerostation* – Royan, France, june 2003. Ed. PUP, Université de Provence, Marseille, France, sous presse.
- Frick G.M. & Hoppel W.A., 2000. Airship measurements of ship's exhaust plumes and their effect on marine boundary layer clouds. *J. Atmosph. Sc.*, 57 (16) : 2625-2648.
- Frick G.W. & Hoppel W.A., 1993. Airship measurements of aerosol size distributions, cloud droplet spectra and trace gas concentrations in the marine boundary layer. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, (11) : 2195-2202.
- Genfa Z., Dasgupta P.K., Frick G.M. & Hoppel W.A., 1999. Airship Measurements of Hydrogen Peroxide in the Marine Atmosphere Along the Western U.S. Coast. *Microchem J.*, 62 : 99-113.
- Global Canopy Handbook: Techniques of Access and Study in the Forest Canopy*, 2002. Mitchell, A.W., Secoy, K.R.J. & Jackson, T. (eds.) Global Canopy Programme, Oxford, pp.177-182.
- Hagen D., 1987. Blimp-based radiometric measurements of the water vapor continuum absorption in the 8-13 μ m region. Paper presentation for atmospheric spectroscopy applications workshop, sponsored by international ozone and radiation commissions, Rutherford-Appleton laboratory, U.K., Sept. 1987.

- Hagen D., 1988. The profile of upwelling 11 μ m radiance through atmospheric boundary layer overlying the ocean. *J. Geophys. Res.* 93 (D5) : 5294-5302.
- Hain J.H.W., 1999. Update on application of airships and aerostats to whale and habitat research. 13th AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference. 28-30 June 1999. Norfolk, VA. Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 6p.
- Hain J.H.W., 2000 Lighter-than-air Platforms (Blimps & Aerostats) for Oceanographic and Atmospheric Research and Monitoring. Proceedings Oceans2000 MTS/IEEE Conference, 11-14 sept 2000, Providence, Rhode Island, USA.
- Hain J.H.W., 2001 LTA Platforms (Blimps & Aerostats) for Oceanographic & Atmospheric Research & Monitoring. 14th AIAA LTA TC Conference 2001, Akron, Convention proceedings (www.airship.demon.co.uk/TCCDROM.html).
- Hallé F., 1990. A raft atop the rain forest. *National Geographic*, 170 (4) : 128-138.
- Hallé F., Cleyet-Marrel D. & Ebersolt G., 2000. *Le Radeau des Cimes. Exploration des canopées forestières*. Ed. J.C. Lattes, Paris.
- Hamley M.H., 1994. US LTA 138S Airship as an airborne research platform. First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11-15 September, 1994; www.gielow.org/NRL_AIRSHIP.doc.
- Heldt H., 1921. Coopération du dirigeable à la pêche maritime. *Comptes rendus des séances de l'académie des sciences*, Paris, 173 : p1132
http://gallica.bnf.fr/Fonds_Tables/000/M0003126.htm
- Hiby A. & Hammond P., 1989. Survey techniques for estimating abundance of cetaceans. The comprehensive assessment of whale stocks: the early years. *Report of the International Whaling Commission*, Special Issue 11 : 47-80
- Hooper W., 1997. Deployment of aerosol instrumentation aboard the US-LTA airship. <http://wvms.nrl.navy.mil/7228/7228page.html>.
- Hoppel W.A., Frick G.M. & Fitzgerald J.W., 1994. Marine boundary Layer Measurements of New Partical Formation and the Effects of Non-Precipitating Clouds on Aerosol Size Distribution. *J. Geophys. Res.*, 99 (7) : 14443-14459.
- Kalthoff N., Corsmeier U., Schmidt K., Kottmeier Ch., Fiedler F., Habram M. & Slemr F., 2002. Emissions of the city of Augsburg determined using the mass balance method. *Atmosph. Environ.*, 36 (suppl. 1) : 19-31.
- Ketchen H.G., Murphy D.L. & Paskausky D.F., 1983. The use of airships as oceanographic platforms. *Eos Trans. Am. Geophys. Union.*, 64 (45) : 728.
- Kraus S.D., Prescott J.H., Knowlton A.R., & Stone G.S., 1986. Migration and calving of right whales (*Eubalaena glacialis*) in the western North Atlantic. In Brownell, Best, and Prescott, Right whales: past and present status. Rept. Internatl. Whaling Comm. Spec. Issue, no. 10, pp.139-144.
- Lecornu J., 1912. *La Navigation Aérienne*. Librairie Vuibert, Paris, 435 p.
- Musgrave R.J., 1989. Assessment of airships as geoscience research/exploration platforms. Report of stage 1 : feasibility study. Internal Document. Department of Geology, The Australian National University : Canberra, Australia. 11pp.
- Nayler A.W.L., 2002. Skyship N602SK engine failure. *Airship*, 135, p10-11.
- NOAA, 1993. NOAA's Aircraft modernization study : Final report of the NOAA study committee. march 1993. Doc/NOAA : Washington, D.C.
- Plant W.J., Keller W.C., Hesany V., Hayes K., Hoppel & K.W., Blanc, T.V., 1998. Measurements of the Marine Boundary Layer from an Airship, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 15, 1433-1458.

- Plant W.J., Weissman D.E., Keller W.C., Hessany V., Hayes K. & Hoppel K.W., 1999. Air/sea momentum transfer and the microwave cross section of the sea. *J. Geophys. Res. (C Oceans)*, 104 (C5) : 11173-11191.
- Scott G.P. & et Gilbert J.R., 1982. Problems and progress in the US BLM-sponsored CETAP surveys. *Report of the International Whaling commission*, 32: 587-600.
- Trokhimovski Y.G., Irisov V.G., Westwater E.R., Fedor L.S. & Leuski VE., 2000. Microwave polarimetric measurements of the sea surface brightness temperature from a blimp during the Coastal Ocean Probing Experiment (COPE). *J. Geophys. Res. (C Oceans)*, 105 (C3) : 6501-6516.
- UNOLS, 1994. Coastal oceanography : future trends and vessel requirements. A status report by the coastal oceanography subcommittee of the UNOLS fleet improvement committee. UNOLS FIC report., 32 pp.
- Watkins W.A. & Moore K.E., 1982. An underwater acoustic survey for sperm whales (*Physeter catodon*) and other cetaceans in the southeast Caribbean. *Cetology*, 46 :1-7.