NUMÉRO 49
OCTOBRE 2021

Association Aéronautique
et Astronautique de France

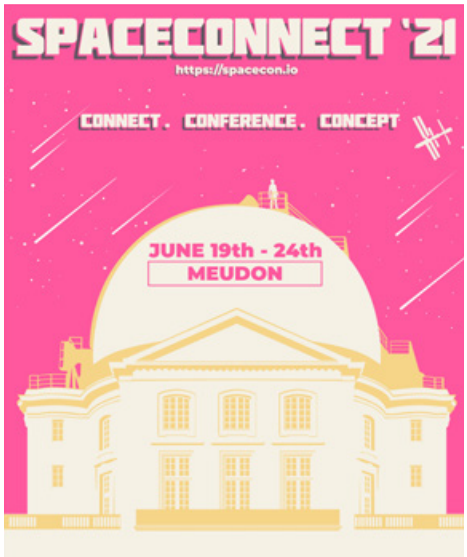
LETTRE 3AF

La revue de la société savante
de l'Aéronautique et de l'Espace

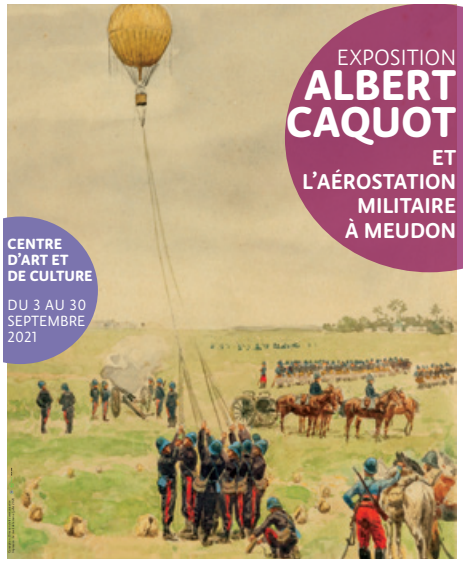
N° SPÉCIAL LE FUTUR DE L'AÉROSTATION ET DES DIRIGEABLES

ACTES DU COLLOQUE DE MEUDON LE 25 JUIN 2021

FESTIVAL STAR'S UP À MEUDON



SPACECONNECT LE 24 JUIN 2021



EXPOSITION CAQUOT SEPT 2021

NUMÉRO 49
OCTOBRE 2021

TABLE DES MATIÈRES

3 **ÉDITORIAL, MOT DU PRÉSIDENT**

7 **DISCOURS INAUGURAUX DU COLLOQUE**
par Bruno Chanetz et Denis Larghero

POINT DE VUE

9 **ALBERT CAQUOT INTIME**
par Jean-Bruno Kerisel

AÉROSTATION : RECHERCHES DE BASE

11 **LES NOUVELLES TECHNOLOGIES STRUCTURALES ET ARCHITECTURALES**
par Yves Gourinat

15 **LES ACTIVITÉS DIRIGEABLE À L'ONERA**
par Pascal Taillandier

AÉROSTATION : COMPOSANTS ESSENTIELS

19 **DES CAPTEURS SOLAIRES ADAPTÉS POUR LES AÉROSTATS**
par Stéphane Guillerez

22 ***REGENERATING FUEL CELL SYSTEMS***
par Pascal Barbier
DES TEXTILES HAUTES

25 **PERFORMANCES POUR AÉROSTATS**
par Edvin Bas et Myriam Gautier

AÉROSTATION : SURVEILLANCE ET MESURES

28 **DES BALLONS CAPTIFS DE SERVICES AÉRIENS POUR LA GESTION DES TERRITOIRES**
par Julie Dautel et Cédric Tomissi

31 **LES BALLONS DU CNES ET LEURS APPLICATIONS**
par Vincent Dubourg

35 **BALLON STRATÉGIQUE A-NSE**
par Athanase Riche

39 **STRATOBUS™, LE DIRIGEABLE STRATOSPHÉRIQUE MULTI-MISSIONS**
par Yannick Combet

45 **L'AÉROSTAT : UNE SOLUTION DE MESURE DE L'ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE**
par Vincent Gobin

46 **DIRIDRONE, LE DRONE PLUS LÉGER QUE L'AIR POUR AUTOMATISER L'INSPECTION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE RTE**
par Damien Paulhiac et Alice Clech

AÉROSTATION : TRANSPORT DE CHARGES

50 **FLYING WHALES, CONSTRUCTEUR ET OPÉRATEUR POUR LE FRET**
par Thibault Proux

53 **LE DIRIGEABLE HYBRIDE POUR LE TRANSPORT DE CHARGES LOURDES ?**
par Alain Bernard

AÉROSTATION : TOURISME

56 **BALLOONEOS RÉINVENTE LE SURVOL DE SITE !**
par Guillaume Montejano

59 **LE FOND PLAT, AVENIR PROMETTEUR DE L'AÉROSTATION**
par Christophe Béesau

63 **LE GRAND BALLON CAPTIF : LE VOL EN BALLON POUR TOUS**
par Matthieu Gobbi

67 **ZEPHALTO : LA CROISIÈRE AUX PORTES DE L'ESPACE**
par Kévin Mariette, Ilan Raphael et Olivier Jeanneau

VIE 3AF

71 **AERALL, 50 ANS D'ACTION AU SERVICE DU DIRIGEABLE**
par Jean-René Fontaine

73 **SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !**
par Pierre Cordesse

FORMATION

78 **FICHE EUROSAE SUR L'AÉROSTATION**

HISTOIRE

79 **L'ENTREPRENANT**
par Pierre Muller et Denis Quênot

84 **EXPOSITION ALBERT CAQUOT ET L'AÉROSTATION MILITAIRE À MEUDON**
par Bruno Chanetz et al.

NOTES DE LECTURE

95 **LE HANGAR À DIRIGEABLES D'ECAUSSEVILLE, UN CENTENAIRE PLEIN D'AVENIR**
par Bruno Chanetz

96 **DE VERDUN À RIO ALBERT CAQUOT ITINÉRAIRES D'UN GÉNIE**
par Bruno Chanetz

99 **LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS**

ÉDITEUR
Association Aéronautique et Astronautique de France
6, rue Galilée, 75116 Paris
Tél. : 01 56 64 12 30
secr.exec@aaaf.asso.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Louis Le Portz

RÉDACTEUR EN CHEF
Bruno Chanetz

COMITÉ DE RÉDACTION
Pierre Bescond
Jean Délery
Jean-Yves Guédou
Bertrand de Montluc
Jean-Pierre Sanfourche
Jean Tensi
Pierre Tréfouret
Bernard Vivier

CONCEPTION GRAPHIQUE
ICI LA LUNE
www.icilalune.com

Droit de reproduction, textes et illustrations réservés pour tous pays.

Les opinions émises dans les articles n'engagent que leurs auteurs et ne sauraient être considérées comme une prise de position officielle de la 3AF

ÉDITORIAL

La Lettre 3AF n°32 présentait quatre scénarios pour *le transport aérien à l'horizon 2050* [1]. C'est uniquement dans la vision d'un ciel « déserté » que figurait un dirigeable. Dans ce scénario, la préservation essentielle de l'environnement imposait de ne plus recourir aux énergies fossiles, les technologies-clés devenant la motorisation électrique et la propulsion neutre en CO_2. Ce scénario était positionné sur un axe nommé *Écologie*. Les auteurs, conscients du changement radical de comportement qu'imposerait une telle exigence, avec la remise en cause profonde de nos modes de vie, avaient indiqué entre parenthèse « demande faible » ! Mais qu'en est-il vraiment de la « faiblesse » de cette demande à l'heure, où le secteur du transport aérien subit une forte remise en question ? Les préoccupations environnementales, déjà prégnantes avant la crise sanitaire, occupent dès lors le devant de la scène, au moins en France et en Europe et dans une moindre mesure aux États-Unis.

Dans ces conditions le scénario « vert » reprend de la couleur. C'est dans ce contexte que le Groupe de travail 3AF (GT) *Aérostation et dirigeables* a commis fin 2020 un rapport présentant un *panorama de l'aérostation* [2], destiné à éclairer les pouvoirs publics et les investisseurs sur le potentiel de ce secteur, où la France, berceau de l'aérostation, a de vrais atouts dans la compétition mondiale qui se joue. Le dirigeable, malade depuis longtemps de ses difficultés d'emploi, revient avec la levée aujourd'hui probable des verrous qui bloquent son marché potentiel. À l'heure où les priorités changent, où le paramètre gain de temps s'efface au profit de la minimisation de l'énergie, le développement de la filière pourrait s'intensifier dans le domaine de la surveillance, du transport de fret et du tourisme.

Dans ce contexte le colloque consacré au *Futur de l'aérostation et des dirigeables*, qui s'est tenu à Meudon le 25 juin dernier, était très attendu. Il s'est déroulé dans l'amphithéâtre du Centre d'Art et de Culture (CAC) devant 250 personnes, nombre maximal permis par les règles sanitaires en vigueur. À l'occasion du 140e anniversaire de la naissance d'Albert Caquot, ce colloque lui rendait hommage. Stéphane Andrieux, membre de l'Académie des technologies et directeur scientifique général de l'ONERA, a évoqué en début de colloque l'œuvre de ce grand ingénieur. Grâce au partenariat d'Alumni-ONERA avec *Coworking channel*, la vidéo de la journée entière est disponible sur *YouTube* [3].

Afin de garder une trace écrite de cet événement, cette Lettre en héberge les actes. Le tour d'horizon est complet puisque tous les intervenants ont écrit un article. Outre les contributions techniques, Jean-Bruno Kerisel son petit-fils, présente Albert Caquot dans son intimité. Jean-René Fontaine, qui fut un temps contrôleur d'État de l'ONERA, donne une synthèse concernant l'aérostation au cours des dernières décennies à travers les actions organisées par l'association AERALL qu'il avait fondée.

Cette Lettre présente la synthèse de l'évènement *spaceconnect*, qui s'est également déroulé au CAC le 24 juin, la veille du colloque. Cette manifestation accueillit les présidents de L'École polytechnique, de l'ONERA et du CNES : Eric Labaye, Bruno Sainjon et Philippe Baptiste.

La rubrique Histoire traite de l'aérostation militaire, dont Meudon est la terre d'élection. En effet, dans la foulée des journées de juin, une exposition *Albert Caquot et l'aérostation militaire* a été présentée au CAC durant tout le mois de septembre. En dévoilant les trésors d'une des plus riches collections privées au monde et en présentant les souvenirs familiaux conservés par la famille d'Albert Caquot, elle préfigure ce que pourrait être une exposition permanente dans le Hangar Y en cours de restauration.

Pour compléter ce parcours historique, je vous invite à consulter le fascicule *Les grands hommes de l'aérostation à Meudon* [4], rassemblant divers articles publiés dans la Lettre 3AF au cours des dernières années. Ce document fut remis aux orateurs du

1. *https://www.3af.fr/global/gene/link.php?doc_id=4222&fg=1*
2. *https://docplayer.fr/212780627-La-societe-savante-de-l-aeronautique-et-de-l-espace.html*
3. *https://www.3af.fr/groupe/haut-conseil-scientifique-147/page/actualites*
4. *https://www.3af.fr/groupe/haut-conseil-scientifique-147/page/media*

colloque ainsi qu'aux personnalités invitées le 3 septembre au vernissage de l'exposition. On y trouve notamment un article sur la vie et l'œuvre d'Albert Caquot.

Enfin vous aurez admiré le magnifique visuel à la une de ce numéro. Il s'agit d'une toile due aux pinceaux de Jame's Prunier et Lucio Perinotto, peintres de l'Air et de l'Espace. Jean-Philippe Regnault, vice-président du festival Star's up, à l'origine de cette initiative m'a fait partager l'aventure de la réalisation de cette œuvre avec d'abord plusieurs projets indépendants de chacun des peintres, puis une fusion des esquisses finales pour aboutir à cette grande et belle peinture inaugurée par Denis Larghero, maire de Meudon, à la clôture du colloque du 25 juin. Restée au CAC durant le temps de l'exposition, elle va désormais rejoindre le hall de l'Hôtel de Ville, où elle sera exposée de manière permanente, accompagnée de la mention de son exécution dans le cadre de notre colloque. ■

Bruno Chanetz
Rédacteur en chef
Président du HCS

LE MOT DU PRÉSIDENT

Chers Amis,

Notre Assemblée Générale Ordinaire annuelle s'est tenue le 22 septembre 2021 une fois de plus à distance, conséquence de la COVID. En effet, lors de la programmation de l'AGO nous étions au début d'une quatrième vague et nous avons jugé plus prudent de reproduire le format de l'année précédente.

Le Bureau de cette assemblée que j'avais l'honneur de présider était composé de Jean François COUTRIS, notre secrétaire général, de Bertrand PETOT, notre Trésorier et de Pierre BESCOND, qui tenait le rôle d'Assesseur, les différents intervenants se tenant à nos côtés, ainsi que notre Président d'Honneur Michel SCHELLER.

Les interventions étaient bien sur consacrées aux bilans moral et financier de l'année 2020 mais elles auront également permis de dresser un premier bilan des actions menées durant l'année 2021 - Pour ceux qui n'ont pu se connecter ou ont connu des difficultés de connexion durant l'Assemblée, il vous sera possible d'en revoir l'intégralité depuis notre site web.

C'est sur le bilan provisoire de 2021 et sur les priorités de notre feuille de route stratégique que je souhaite revenir ici.

Servir nos adhérents est au cœur de toutes nos actions et **les trois outils fondamentaux dont dispose l'Association sont pour cela** :

- Les **Commissions Techniques**, espaces de neutralité ouverts aux échanges entre experts ;
- Les **colloques et publications – et notamment La Lettre 3AF** - qui mettent en valeur la production de nos commissions et assurent notre rayonnement national et international ;
- Les **Groupes Régionaux** qui relaient au quotidien notre action sur le terrain auprès de tous nos publics, en particulier les Jeunes.

Nous en avons fait nos priorités en cette année 2021.

Tout d'abord, le **management de nos Commissions Techniques**, au cœur du processus de création de valeur de 3AF a été repris dans le cadre d'une nouvelle organisation. Je salue ici les efforts de Bertrand PETOT, également Trésorier de l'Association pour son apport important de réflexion et de coordination de ces Commissions.

Les attentes de nos membres personnes morales, en particulier nos membres de droit, la DGA, la DGAC et le CNES, constituent des données d'entrée importante pour alimenter le travail de nos commissions. C'est pourquoi nous avons consacré une attention particulière au **renouvellement des partenariats** avec nos grands mandants.

Une autre démarche clef est la coordination au quotidien de nos actions entre niveau national et Groupes Régionaux. Elle a été repensée et accentuée. Notre Secrétaire Général, Jean- François COUTRIS, veille tout particulièrement à valoriser les réalisations et retours d'expériences de chacun de nos Groupes Régionaux, à mutualiser informations et bonnes pratiques.

Malgré la COVID, nous avons tenu à maintenir nos colloques en les convertissant en conférences en ligne. En lien avec Olivier MARTIN, Président du Groupement d'Ingénierie et de Planification des Colloques, nous avons mis au point avec succès de nouveaux formats de rencontres et colloques, prenant appui sur les technologies numériques. Cela a été notamment le cas des conférences AERO, Space Propulsion et IES.

Nous avons également décidé d'accélérer la **transformation numérique** de 3AF, transformation indispensable à son rayonnement. Notre site web et son back office avaient été entièrement reconstruits en septembre 2020. Un an après, nous lançons une nouvelle rubrique baptisée « La vie des membres » qui est vous est consacrée et que je vous invite fortement à faire vivre. Elle met à l'honneur nos membres les plus méritants et vous permet de mieux vous connaitre et de dialoguer. Notre communication sur les réseaux sociaux est également devenue plus efficace avec la mise en place d'un réseau national de « référents ».

Ces avancées sont autant de sujets de satisfaction et je souhaite renouveler ici mes remerciements à tous nos membres bénévoles, à l'équipe du Bureau de 3AF, et en particulier aux permanents de notre Secrétariat Exécutif que dirige Michel ASSOULINE, notre directeur général.

Cette horrible pandémie nous a privé de ces rares et précieux instants où nous avons le bonheur de nous retrouver. Elle semble reculer à présent et nous appelons tous de nos vœux un retour à une vie « normale ».

Nous espérons ainsi pouvoir organiser au début de l'année 2022 une cérémonie officielle de remise des Prix et des Grades puis, en juin 2022, une Assemblée Générale annuelle « traditionnelle » en présence de nos membres.

Amicalement, ■

Louis Le Portz
président de la 3AF

LE FUTUR DE L'AÉROSTATION ET DES DIRIGEABLES

Colloque

Vendredi 25 juin 2021 au Centre d'arts et de culture de Meudon

En hommage à Albert Caquot pour le 140e anniversaire de sa naissance

ONERA ALUMNI

dans le cadre de STAR's UP, le festival de l'aérospatiale

COLLOQUE "LE FUTUR DE L'AÉROSTATION ET DES DIRIGEABLES" DU 25 JUIN 2021

DISCOURS INAUGURAUX DU COLLOQUE

Bruno Chanetz
président d'Alumni-ONERA; président de l'ACEBD [1]

Monsieur Le Maire, mesdames, messieurs, chers amis,

Si la conquête de l'air débute en juin 1783 dans le Vivarais avec le premier envol d'un aérostat à air chaud par les frères Montgolfier, c'est du Champs-de-Mars qu'en août de la même année le physicien Charles fait décoller un ballon gonflé à l'hydrogène. Puis, en septembre, à Versailles, devant le roi, s'envolent les premiers passagers aériens : un coq, un mouton et un canard. La région parisienne devient désormais le centre de gravité de l'aérostation, véritable passion des Français à la veille de la révolution. À Javel, où de nos jours Mathieu Gobbi opère son ballon Aérophile, se fabrique alors l'acide sulfurique nécessaire aux expériences de ballons à hydrogène.

En 1793 la première République consacre à Meudon la naissance de l'aérostation militaire. Après la défaite de 1870, Charles Renard crée à Chalais-Meudon l'établissement central de l'aérostation militaire. Durant la guerre de 1914-1918, Albert Caquot y construit de remarquables ballons d'observation, plus de 300 par mois à la fin de la guerre.

Aussi le présent colloque est un hommage rendu à Albert Caquot par quatre associations :

- *Alumni-ONERA, l'association des docteurs et doctorants de l'ONERA. Albert Caquot fut le premier président du conseil scientifique de l'ONERA. Il avait fait édifier la grande soufflerie de Chalais-Meudon au début des années 30, avant même que l'ONERA ne s'installe sur le site de Meudon en 1946, il y a 75 ans ;*
- *Encore plus ancienne, puisque fondée en 1801, est la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. Albert Caquot la présida et elle compte parmi ses fondateurs Etienne de Montgolfier. Et elle décerne annuellement un prix Montgolfier ;*
- *Troisième partenaire, l'Association pour un centre européen des ballons et dirigeables, fondée par Audouin Dollfus, en vue de la constitution d'un espace muséal dans le Hangar Y de Meudon. Son président Philippe Tixier est ici à plus d'un titre !*
- *Enfin la 3AF, l'Association aéronautique et astronautique de France qui a confié à Philippe Tixier la mission de constituer et d'animer un groupe de travail sur l'aérostation et les dirigeables.*

Au lendemain de cette crise, à l'heure où les priorités changent, où le paramètre gain de temps se met en retrait au profit de la minimisation de l'énergie et des nuisances, le regain d'intérêt pour les ballons et dirigeables est appelé à se concrétiser. Dans ce contexte, le Groupe de travail 3AF a publié un rapport présentant un panorama sur la question. La France, berceau de l'aérostation, est actuellement en pointe dans le domaine et possède de vrais atouts dans la compétition mondiale qui se joue. C'est tout le sens de cette journée.

Compte tenu du glorieux passé aérostatique de la ville, où mieux qu'à Meudon pouvions-nous tenir ce colloque ?

Aussi je remercie chaleureusement Monsieur Le Maire de Meudon, Denis Larghero, de nous accueillir au Centre d'action culturel de la ville. Quand je l'ai rencontré en septembre dernier pour lui soumettre le projet, il a immédiatement accepté de le soutenir et m'a mis en contact avec les dirigeants du festival Star's up. Et je suis très satisfait que cet évènement se déroule dans le cadre de ce rendez-vous annuel, qui existe grâce au dynamisme de François Desgardin et de Jean-Philippe Regnault et de toute l'équipe. Je les remercie vivement pour l'aide apportée. Enfin je remercie Florin Paun, membre du conseil d'administration d'Alumni-ONERA de mettre son talent d'animateur au service de cet évènement. ■

1. Association pour un centre européen des ballons et dirigeables

DISCOURS INAUGURAUX DU COLLOQUE

Denis Larghero
Maire de Meudon, vice-président du département des Hauts-de-Seine

Cher Bruno, Monsieur le président et secrétaire général, Mesdames, Messieurs,

Ici réunis ou avec nous par la magie de la technique puisque cette introduction et ce colloque sont retransmis partout dans le monde. Et c'est faire honneur à Albert Caquot de pouvoir être mondialisé aujourd'hui, lui qui a travaillé partout dans le monde.

Monsieur le président de l'ACEBD et vous qui représentez ici différentes institutions et associations pour être avec nous pour le 140e anniversaire d'Albert Caquot. Vous l'avez dit Monsieur le Président, nous sommes particulièrement honorés de vous accueillir à Meudon, puisque Meudon est la terre d'élection qui a fait connaitre Albert Caquot.

Je le disais, ce colloque aurait pu avoir lieu dans bien des endroits dans le monde, lui qui a construit jusqu'au Brésil je crois, qui est intervenu partout en France dans les différents métiers qu'il a pu exercer. Ce colloque aurait pu avoir lieu, même à l'Académie des Sciences, puisqu'il en a été le président ou dans d'autres lieux, mais c'est Meudon que vous avez choisie et je vous en remercie et je crois que c'est particulièrement symbolique et bien le moment d'honorer Albert Caquot à Meudon aujourd'hui et cette année. Pourquoi particulièrement ? parce qu'en effet nous avons la chance de pouvoir célébrer à la fois les 140 ans d'Albert Caquot ici, mais aussi d'une certaine manière et ce jour la renaissance d'un lieu qui lui est particulièrement cher à Meudon c'est le Hangar Y, ce hangar Y dont vous êtes aujourd'hui toutes et tous, ici aujourd'hui bien sûr, des amoureux plus que transis puisque vous avez des projets pour ce Hangar. Et c'est vrai que c'est aujourd'hui là même que la presse se fait l'écho d'un projet qui va permettre la rénovation, la restitution du hangar Y et je crois que nous avons vraiment aujourd'hui la chance de célébrer aussi un alignement des planètes particulier qui va donner tout son sens à ce colloque et à l'intérêt qu'il suscite. Parce que l'intérêt qu'il suscite, c'est aussi l'intérêt pour le futur et je vous remercie d'avoir placé ce mot en introduction et comme thématique de ce colloque.

Bien sûr nous devons à Albert Caquot la notoriété du hangar Y de Chalais mais aussi bien sûr celle de la Grande soufflerie dont il est aussi l'auteur. On peut même se demander d'ailleurs à Meudon ce qu'Albert Caquot n'a pas fait ? Mais nous avons cette chance aussi de compter cette Grande soufflerie sur notre territoire et ce que nous sommes en train de faire, ce que nous allons réussir pour le Hangar Y et bien j'espère que nous allons le réussir ensemble pour la Grande soufflerie et c'est vraiment dans cet esprit je crois que nous allons essayer de mobiliser ce week-end à Meudon toutes les forces, toutes les énergies qui sont susceptibles de faire renaître ce patrimoine et donner un avenir à ce qu'Albert Caquot a initié chez nous à Meudon.

Vous avez parlé de futur, cher Bruno, et le futur était présent ici-même hier toute la journée avec l'incubateur des start-ups de Polytechnique. Nous avons eu la chance ici-même d'accueillir hier – excusez du peu – le président de l'ONERA Bruno Sainjon pour introduire la journée. Nous avons eu ensuite le président, le nouveau président du CNES. Nous avons eu le Président de Polytechnique. Et donc je crois que c'est un prolongement naturel que nous soyons ensemble ici aujourd'hui avant demain d'accueillir le grand public au cours de Star's up et c'est un enjeu de territoire pour nous et je vous remercie de pouvoir concilier ces 24,25 et 26 juin l'énergie de demain, la science et la société savante que vous représentez aujourd'hui le regard tourné vers le futur et le grand public, parce que notre espoir c'est aussi d'associer le grand public à ces enjeux, pour nous permettre un jour bien sûr aussi de redonner un avenir à la Grande soufflerie, après avoir réussi ce défi improbable que tout le monde disait impossible de trouver un avenir au hangar Y. ■

POINT DE VUE

ALBERT CAQUOT INTIME

par **Jean-Bruno Kerisel**

***Jean-Bruno Kerisel**, petit-fils d'Albert Caquot*

Permettez-moi, au nom des miens, d'apporter ici quelques éclairages personnels sur la vie d'Albert Caquot, mon grand-père maternel.

Ce qui le caractérise le mieux dans ma mémoire, c'est sa posture, assis devant sa table de travail, tôt le matin et tard dans la nuit, rue Beethoven à Paris, où j'allais le voir enfant, puis chez mes parents où il passa les douze dernières années de sa vie, de 1964 à 1976.

Il dessinait des courbes sur du papier millimétré avec une mine très fine, et les mettait en équation au moyen d'exponentielles complexes. J'ai pensé longtemps que son art était les mathématiques, jusqu'au jour où il m'a fait comprendre qu'elles n'étaient qu'un outil de travail pour l'ingénieur.

Concentré sur son travail, il devenait immédiatement disponible à son entourage, et écoutait avec une grande affabilité.

Pour l'enfant qui l'observait, il était immortel. Roc sur lequel s'est construite sa famille, avec des maximes que j'ai souvent entendues : « Le travail anoblit l'homme », « Penser aux autres avant de penser à soi-même » et encore : « Quoi de plus simple que la simplicité ».

Je lui dois beaucoup dans son exemple de vie et dans l'orientation de ma carrière qu'il a su me suggérer. J'avais trente-huit ans lorsqu'il est décédé. Quelques jours auparavant il était encore au travail.

C'était un homme de l'art, c'est-à-dire un homme qui connaît son métier et qui est capable de réussir parfaitement ce qu'il entreprend d'utile dans son domaine, qu'il soit autodidacte ou diplômé. Cette expression concerne aujourd'hui tous les domaines de l'ingénierie, de l'architecture et de la médecine.

Je songe à Louis Kahn, ce grand architecte américain, qui disait : Pour certains, une œuvre d'art est la merveille des doigts de l'homme. Pour d'autres, la merveille de l'esprit. Pour d'autres encore, la merveille de la technique.

L'art d'Albert Caquot a été la Mécanique au sens fort et sous tous ses aspects, qu'elle soit des fluides ou des solides. En voici quelques exemples dans sa carrière si vaste.

L'hydrodynamique d'abord. Jeune ingénieur des Ponts et Chaussées, nommé à 24 ans à Troyes il assainit la ville et sauve des vies en faisant réaliser plusieurs dizaines de kilomètres de galeries et de canalisations, puis en élaborant une méthode de calcul d'évacuation des eaux présentée à l'académie des sciences en 1941, qui porte son nom. Elle est encore utilisée de nos jours.

Encore une autre preuve de son inventivité en hydrodynamique A quatre-vingts ans il ferme la Rance pour y construire une usine marémotrice. J'ai pu apprécier, jeune homme faisant de la voile au large de Saint-Malo, le courant très violent à mi marée et en vives eaux à l'embouchure. Il conçoit des grandes éprouvettes creuses en béton qu'on fait flotter, qu'on scelle sur le fond rocheux et qu'on remplit de sable, constituant ainsi des points fixes entre les quels on glisse des planches en béton.

Monsieur Stéphane Andrieux vient de vous entretenir de sa carrière dans le domaine de l'aérostation et de l'aviation.

Il me parait important de rappeler ici un trait du caractère de mon grand-père, la ténacité. En effet, il est mal reçu lorsqu'il présente son projet de ballon à Chalais-Meudon : le directeur partage l'opinion de ses officiers, à savoir qu'il est impossible de réaliser une carène uniquement en étoffe et cordages.

Avec cette force courtoise d'obstination qui est la sienne, il demande des dessinateurs pour faire réaliser les dessins d'exécution de la carène. « Je n'ai plus de dessinateurs » répond le colonel Richard. Albert Caquot se rend alors à Paris dans son bureau d'études, rassemble une équipe de cinq dessinateurs de plus de cinquante ans, non mobilisés en raison de leur âge, et porte huit jours plus tard les plans à sa hiérarchie.

Le directeur de l'aviation au ministère de la Guerre, le général Hirschauer, donne l'ordre de faire l'essai. Il se souvient en effet du jeune officier qu'il a eu sous ses ordres, douze ans plus tôt, alors que celui-ci accomplissait son service militaire. La construction d'un prototype est enfin accordée. Albert Caquot revient à Chalais-Meudon faire les essais avec tous les accessoires qu'il a préparés au front.

En comparaison avec le ballon allemand, le drachen, il faut souligner la forme aérodynamique et esthétique de son ballon d'observation avec son empennage constitué de trois lobes.

Des années plus tard, Maurice Roy a souligné à l'Académie des sciences que le ballon d'observation Caquot était un chef-d'œuvre à la fois d'ingéniosité et de simplicité, véritable signature d'un grand mécanicien, au service de son pays.

L'essentiel de sa carrière de constructeur a eu lieu au bureau d'études Pelnard Considère et Caquot puis chez lui en solitaire après la guerre de 40.

Sans vouloir les énumérer toutes, voici quelques-unes de ses réalisations originales en génie civil :

- *La structure interne du Christ rédempteur sur le mont Corcovado à Rio de Janeiro au Brésil, qui a été l'œuvre du sculpteur Paul Landowski en 1931. Il a conçu les plans en béton armé de ce monument de 30 m de hauteur, avec une poutre en treillis de 28 m de longueur pour les bras et les mains qui pèsent chacune huit tonnes.*
- *L'écluse du barrage de Donzère-Mondragon.*
- *La forme Jean-Bart à Sant-Nazaire.*
- *Trois cents ponts et barrages de tous types, dont plusieurs ont été des records du monde.*

Ce sont des ouvrages esthétiques comme le pont de Donzère-Mondragon qui fut le premier pont à haubans du monde ou le pont de la Caille. Là encore, il a été l'homme de son art, tellement intégré dans sa vie qu'il voyait les lignes de force des structures qu'il concevait.

Je me souviens en particulier d'un crochet de levage en charge. Il m'avait indiqué très précisément où aurait lieu la cassure, avant qu'elle ne se produise.

Praticien, il m'a appris à me servir des outils, du marteau, de pointes qu'il fallait émousser pour qu'elles ne fendent pas le bois.

Il se plaisait à répéter qu'un projet devait être étudié non pas à 95% ni à 98% mais à 100%, et citait l'exemple de Gustave Eiffel, son ami, qui avait dessiné et calculé tous les éléments constitutifs de la tour.

Il a enseigné la résistance des matériaux aux Mines, aux Ponts et à Supaéro. À ce sujet je voudrais rappeler le témoignage que j'ai retrouvé du réalisateur, Jean Rouch, qui passa par l'école des Ponts et Chaussées, avant de se consacrer au cinéma. Les grands ingénieurs comme Caquot, qui était professeur de résistance des matériaux nous racontait des histoires fabuleuses selon lesquelles, il découvrait les théories avant de pouvoir les démontrer, parce qu'à cette époque il n'y avait pas de machine à calculer. Il nous a appris que tous ces ouvrages se font par approximations successives et en utilisant des êtres mathématiques qu'on appelle des développements en série de Fourier qui sont les pères de tous les ordinateurs qu'on peut utiliser aujourd'hui.

Il nous disait : c'est comme des vers latins. La littérature va mourir parce qu'on apprendra plus le latin dans les écoles. N'oubliez-pas que les plus beaux vers de Rimbaud sont en latin car le vers latin doit se construire par la fin à cause de la rime et se reconstruire par approximations successives pour retrouver un rythme continu. Les vers d'Arthur Rimbaud en latin, non seulement leur contenu mais leur forme sont si beaux qu'on ne les voit pas.

Il y aurait beaucoup à dire concernant le génie visionnaire d'Albert Caquot.

En 1967, il s'est déclaré hostile au tunnel sous la Manche et a proposé un pont à tablier avec des portées de huit-cent mètres. Pendant les dix dernières années de sa vie, il a conçu un barrage fermant la baie du mont Saint-Michel pour créer une nouvelle usine marémotrice de 18 000 MW, équivalente en puissance à six sites de centrales atomiques. Il s'est même intéressé au sauvetage des temples d'Abou-Simbel pour éviter qu'ils ne soient engloutis dans le lac Nasser et a proposé une solution permettant de les faire flotter…

Mais il gardait toujours son intérêt pour l'air et l'espace. À l'occasion de ce colloque m'est revenu ce qu'il m'a dit souvent dans ses dernières années : Tu sais, je suis persuadé qu'il y a beaucoup d'avenir pour les ballons et les dirigeables.

25 juin 2021 ■

LES NOUVELLES TECHNOLOGIES STRUCTURALES ET ARCHITECTURALES *UNE CHANCE UNIQUE POUR LE DIRIGEABLE CONTEMPORAIN*

par **Yves Gourinat**, professeur, ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse

LE *CONTEXTE SCIENTIFIQUE* DU NEWAEROSPACE

Dans la perspective – essentielle - de la durabilité des structures aérospatiales, le contrôle actif et passif des structures flexibles est un défi majeur pour lequel des progrès décisifs ont été enregistrés récemment par la dynamique active et passive des solides. Ces améliorations sont dues à plusieurs décloisonnements fondateurs, qui ne s'opèrent pas sans résistances. Mais l'enjeu est central, puisqu'il touche rien de moins que le développement d'une véritable aviation durable.

Le premier pont est celui qui relie la mécanique (solide et fluide) aux sciences de l'information en ce qu'elles ont de plus fondamental en termes d'observabilité et de *commandabilité*. En vérité, ce pont est fondé sur la pleine application des quatre principes de la thermodynamique, à la fois dans le domaine physique et dans le domaine de la gestion (mesure et pilotage) des informations. Ces évolutions ont conduit à la pleine intégration du contrôle prédictif généralisé (CPG) dans la conception préliminaire des structures et systèmes embarqués associés. Le second décloisonnement est réglementaire. En effet, dans le défi du passage de la qualification spatiale (cryotechnique par exemple) à la certification aéronautique, il est indispensable de mener *conjointement* l'optimisation de la performance et de la fiabilité du système pris globalement.

Dans ce contexte, compte tenu des avancées scientifiques récemment accomplies dans ces domaines, il devient possible d'envisager la réalisation et la certification d'un aérostat opérationnel certifiable sous certaines conditions.

DES VERROUS TECHNOLOGIQUES ET RÉGLEMENTAIRES EN PASSE D'ÊTRE LEVÉS

Le principal verrou qui a continuellement compromis, jusqu'à présent, la certification des grands dirigeables, est le contrôle dynamique des très grandes structures. En effet, le concept de dirigeable rigide ne peut être que relatif, et l'histoire montre que tous les grands ballons ont été détruits pour des raisons dynamiques (rafales, atterrissage, turbulences). Ici se pose une problématique majeure liée à *l'échelle de la structure*. En effet, en similitude dynamique de Froude – qui régit les modes structuraux et d'interaction fluide-structure – la stabilisation d'une *grande structure* est extrêmement complexe : c'est un défi majeur.

Ceci tient à la fois à des problèmes cinétiques liés aux inerties (y compris en rotations, effets trop longtemps ignorés) et aussi à l'instabilité de bifurcation (de type flambage ou voilement) liée précisément au caractère élancé des grandes structures. À ceci s'ajoutent les interactions fluides internes (acoustiques, ballottement, inerties) et externes (aérodynamique transitoire et permanente, dynamique du vol rigide et souple).

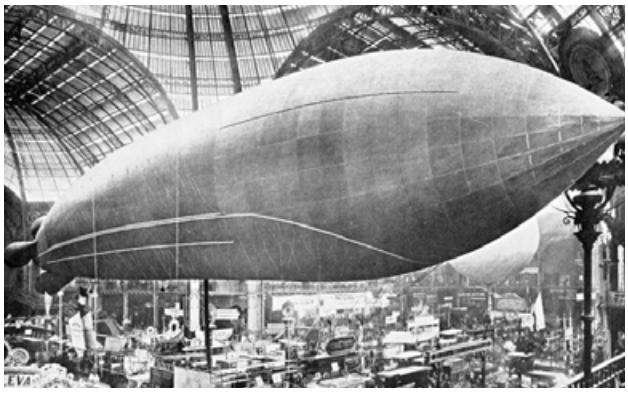
Le contrôle actif déjà appliqué aux hélicoptères convertibles, associé à des matériaux spécifiques à haute entropie et la prédiction temporelle des charges et de leurs répercussions transitoires et cycliques représentent des avancées considérables mais récentes.

L'ensemble de ce processus est rendu possible par l'émergence de modèles numériques et analytiques de haut niveau, intégrant les interactions coque-fluide et les non-linéarités géométriques et mécaniques. Ainsi, les algorithmes développés pour les commandes de vol électriques mises en œuvre dans les avions et les lanceurs permettent maintenant d'envisager de construire et de qualifier un très grand dirigeable.

À ce niveau il convient de balayer un mythe : le danger du dirigeable ne provient pas de l'hydrogène, mais de la dynamique. À une ou deux exceptions près dans toute l'histoire – épique - des dirigeables, tous ont péri dans des tempêtes ou par des erreurs

de contrôle. Bien évidemment, il ne faut pas qu'un réservoir d'hydrogène reçoive une balle incendiaire, mais c'est tout aussi vrai d'un réservoir de kérosène (sans parler de l'essence d'aviation…). Le coût et surtout les réserves mondiales d'hélium (qui constitue d'ailleurs une ressource fossile, car il est tiré de réserves fossiles…) nous commandent de le réserver à des usages stratégiques comme la microélectronique, la chimie ou la biologie.

L'utilisation de centaines de milliers de mètres-cube d'hélium pour l'aérostation relève donc d'un luxe que nous ne pouvons pas nous permettre – du point de vue environnemental. Il faudra voler à l'hydrogène, que nous modélisons parfaitement (presque mieux que l'hélium…) et dont la maîtrise est en réalité très ancienne. En effet, rappelons que Paris a connu, tout au long du XIXe siècle, un réseau parfaitement sûr de gaz d'éclairage (pour l'éclairage public en particulier), lequel gaz est constitué à 50% au minimum d'hydrogène. D'ailleurs, les aérostiers s'approvisionnaient directement sur ce réseau pour gonfler leurs ballons. Et nous voyons ainsi un ballon au gaz d'éclairage trôner au beau milieu du Grand Palais (oui, en intérieur…) au salon de la locomotion aérienne de 1908.



Salon de 1908

DES VERROUS SCIENTIFIQUES EN COURS D'OUVERTURE

En ce qui concerne le contrôle actif, la capacité actuelle d'intégration des modèles thermodynamiques de membrane-poutre en interaction aéroacoustique interne et fluide externe dans les commandes de vol numériques rend possible la stabilisation structurelle active des formes dynamiques. Ce qui est possible dans le domaine vibroacoustique modal – et actuellement très bien maîtrisé pour les fluides newtoniens – est en cours de maîtrise pour les régimes transitoires explicites.

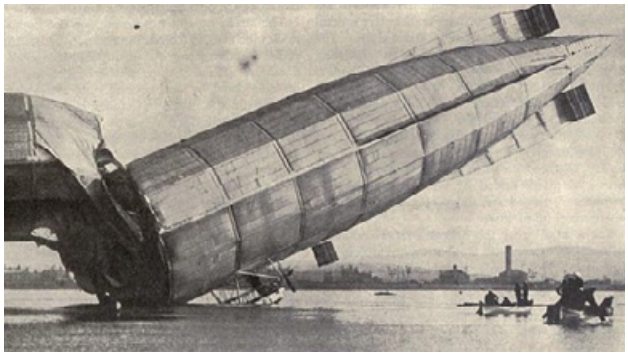
L'enjeu est ici l'intégration de l'automatisation complète de l'asservissement dans les grandes structures fortement non linéaires. Ce processus a été initié par la dynamique des coques dans leurs déformées instables, et l'émergence de modèles complets avec des méta-modes globaux - similaires à ceux utilisés sur les grands miroirs de télescopes pour compenser la turbulence atmosphérique – commence à fournir des algorithmes robustes pour ces structures flexibles.

Précisément, les modèles hybrides avec une représentation lagrangienne des membranes et coques de Reissner (avec des déflexions locales U, V, W dans les axes de courbure principaux de la surface) couplée à une paramétrisation volumique eulérienne du fluide (avec une fluctuation δp de pression) conduisent à une matrice explicite de masse [M] et de statique [K], et à une matrice hybride explicite d'impédance [Z].

Le défi majeur est ici le bloc de couplage rectangulaire dans chaque matrice dynamique. Ces processus sont bien rôdés dans le domaine linéaire et dans la représentation linéaire (pas-à-pas), et en cours dans l'explicitation non-linéaire. Les travaux actuels liés notamment aux réservoirs cryotechniques et aux modèles particulaires internes liés à ces coques (modèles granulaires et par équations intégrales) laissent entrevoir d'excellentes perspectives en la matière. Le développement des modélisations de parachutes de grandes dimensions ont également fortement contribué à ces avancées. Enfin, l'implémentation générale mais récente des théories complètes de coques - en particulier non-développables – est un facteur d'améliorations substantielles de la fiabilité conceptuelle de ce type de structure mince.

Par ailleurs, l'intégration - dans l'épaisseur même des coques structurales - de matériaux polymères dissipatifs non linéaires - précédemment développés pour le contrôle du bruit dans les plaques - et l'observation 3D externe pour l'anticipation des charges, autorisent maintenant la troncature des rafales, des chocs, des résonances en temps réel, à des fins de sécurité, de confort et de performance.

De grands progrès ont été accomplis récemment en matière de conditionnement dynamique des structures à moyenne fréquence - quelques dizaines de Hz - grâce aux matériaux arméolaires, enchevêtrées, aux antirésonances particulaires internes dans les nids d'abeilles, et aussi à l'intégration de couches spécifiques par fabrication additive.



Rupture par cisaillement en vol

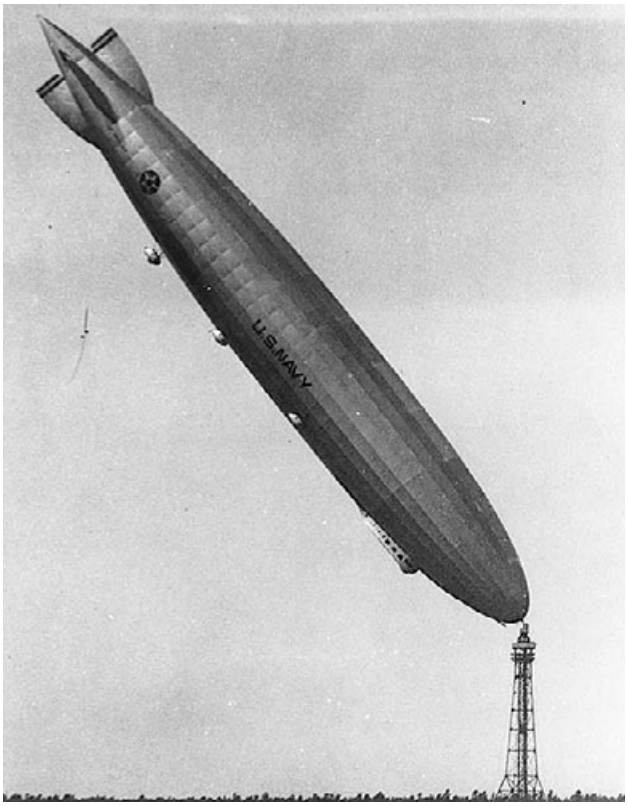
DES TECHNOLOGIES POUR L'OBSERVABILITÉ ET LA COMMANDABILITÉ DES STRUCTURES

Ces structures bien modélisées et conditionnées selon les dernières avancées se prêtent ainsi, malgré leur souplesse et leur instabilité, à la mise en œuvre étendue du contrôle prédictif généralisé. De même que la turbulence atmosphérique est mesurée par un lidar pour anticiper ses effets sur la lumière, et ainsi corriger par avance la forme dynamique du miroir du télescope, de même il est nécessaire d'anticiper la turbulence et la rafale en amont de l'aéronef du futur. Ce sera très utile pour l'avion et l'hélicoptère du futur, pour des raisons de performance, de confort et de sécurité, mais c'est incontournable pour le dirigeable contemporain. Il ne sera pas opérationnel sans cela, compte tenu des souplesses et dynamiques en jeu.

Ces approches ont déjà été mises en œuvre sur des aéronefs en opération, par exemple sur des convertibles, et autorisent un triple décloisonnement indispensable – et même vital – si l'on souhaite développer un dirigeable. Elles trouveront une application naturelle dans l'aile volante à hydrogène, futur aéronef de grande capacité à Mach ~0.3 ou 0.6, ainsi que dans le lanceur lourd du futur, mais aussi pour notre dirigeable.

Le premier décloisonnement est l'intégration des commandes de vol dès le premier coup de crayon et jusqu'à la fin de vie de la structure. Autrement dit, il s'agit de l'architecture intégrée mécanique-automatique des structures innervées.

La deuxième rupture, liée à la première et déjà en cours, est le lien ontologique entre performance et sécurité, c'est à dire qu'il s'agit non-seulement de ne plus opposer les deux, mais bien de considérer que l'une ne va pas sans l'autre. C'est en réalité un même critère de qualité. Enfin le troisième pont est celui du lien vital entre les architectes, utilisateurs et certificateurs, les procédures, définitions, et réglementations avançant de pair.

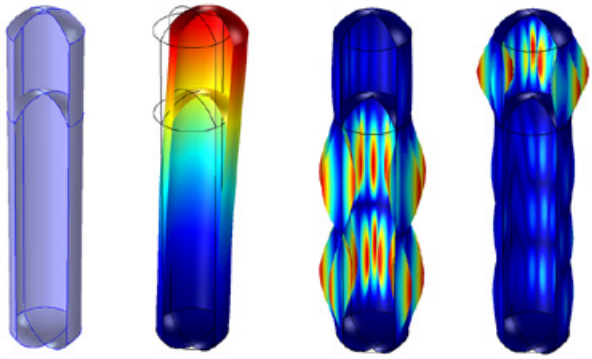


Perte de contrôle au sol

LA NOUVELLE CERTIFICATION

Ces évolutions scientifiques, organisationnelles et de communication entre TRLs sont en cours ; il est désormais possible d'envisager de mettre en œuvre ces processus dans les règles de certification elles-mêmes des grands dirigeables, en accord avec les autorités de navigabilité, les architectes et les opérateurs.

La dynamique structurale clé du dirigeable futur. Crédit Arianespace



Modes structuraux coque réservoir LH2-LOX calculés en interaction fluide-structure. Crédit ISAE-SUPAERO

Cette nouvelle réglementation est probablement la clé pour des dirigeables de grande taille opérationnels pour de larges applications civiles. Elle drainera non-seulement une activité importante mais aussi une évolution notable vers le développement durable, autant développement que durable. Elle dépasse donc le strict domaine de l'aérostat, mais a également des ramifications dans les véhicules aériens et terrestres en général. ■

AÉROSTATION : RECHERCHES DE BASE

LES ACTIVITÉS DIRIGEABLE À L'ONERA

par **Pascal Taillandier**, chef de projets dirigeable, ONERA

Les dirigeables connaissent actuellement un regain d'intérêt certain, comme en témoignent les programmes en cours, en France ou à l'étranger. Cette solution aéronautique très ancienne présente une alternative intéressante d'un point de vue économique, de par sa sobriété en termes de consommation de carburant. Un autre avantage est sa capacité de vol stationnaire (VTOL, station pour l'observation). Les principaux inconvénients de cette solution sont sa vulnérabilité aux conditions aérologiques, sa faible manœuvrabilité et la maîtrise délicate des manœuvres au sol ou à proximité du sol. Les deux principales applications envisagées, duales, sont le transport de fret et la surveillance. L'intégration dans la conception de ces machines des avancées technologiques (en matière de matériaux, contrôle, propulsion hybride ou tout électrique, etc.) laisse entrevoir de nouvelles perspectives.

Pour voir voler un jour ces machines à grande échelle, un défi majeur devra être relevé, celui de la certification, formée par ses trois grands piliers : la navigabilité, la formation des pilotes à ces aéronefs très spécifiques et leur intégration dans l'espace aérien.

EMPLOIS LES PLUS PROMETTEURS POUR LES DIRIGEABLES

La première application concerne le transport de fret point à point, de charges lourdes et/ ou encombrantes. Cette solution peut permettre en outre de désenclaver certaines régions isolées tout en s'affranchissant de construire des infrastructures routières. On pourrait citer par exemple les possibilités de liaison aérienne Sahara entre les points d'extraction pétrolière et la côte méditerranéenne, ou encore la liaison Est (où se trouvent les pôles économiques) – Ouest (où sont localisées les ressources) en Chine, enfin les liaisons entre pôles urbains au Canada. En France le programme LCA60T porté par la société FLYING WHALES permet de contribuer à améliorer l'exploitation forestière en régions montagneuses. Ce concept d'emploi inédit est établi en collaboration avec l'Office National des Forêts.

Une autre application d'intérêt concerne la surveillance ou l'observation troposphérique longue endurance (5 à 10 jours). En effet les capacités de permanence sur zone des dirigeables, potentiellement bien supérieures à tout autre aérodyne

Vue d'artiste du Stratobus™ de Thales Alenia Space

Vue d'artiste du concept FLYING WHALES LCA60T – Nouvelle configuration 2020

et en outre à faible coût énergétique, offrent des perspectives intéressantes. Historiquement cette application a donné naissance à plusieurs développements, notamment de dirigeables souples Good Year pour l'alerte avancée aux États-Unis. Ces appareils étaient opérationnels jusqu'en 1962 dans l'U.S. Navy. Régulièrement des concepts ressortent sur ces applications. Les dernières réalisations notables dans ce domaine sont le dirigeable Blue Devil 2 (États-Unis), programme arrêté en 2012 alors que l'appareil était construit à 95%, et le LEMV de Lockheed Martin (un démonstrateur de 85 m de long construit).

Enfin le dirigeable pourrait être utilisé à grand profit pour des applications haute altitude longue endurance (20 km, un an) dans le domaine de l'observation surveillance ou relais de télécommunications. Plusieurs projets ont été conduits aux États-Unis, un programme est en cours en Chine (Yuanmeng). En France le projet Stratobus™ porté par la société Thales Alenia Space est en cours de développement.

Il est à noter que chacune de ces applications est duale, c'est-à-dire utilisable dans un cadre d'emploi militaire comme civil.

EMPLOIS PROMETTEURS POUR LES BALLONS CAPTIFS

Les ballons captifs sont principalement utilisés à des fins de surveillance longue durée. Plusieurs catégories (classe de volume) existent et la permanence sur zone peut varier de quelques jours à un mois. Pour tenir au vent de manière suffisamment performante, il est nécessaire de recourir à une forme profilée qui s'oriente dans le lit du vent, et de disposer d'une station sol qui accompagne ce mouvement de giration du ballon. Pour ces applications de surveillance, les américains utilisent depuis quatre décennies des ballons captifs : pour la surveillance de frontières, (système TARS, JLENS, etc.) ou de bases avancées (PGSS, etc.). En France plusieurs sociétés fabriquent de tels ballons ; on pourra citer par exemple les sociétés CNIM Airspace et A-NSE.

Spécificités du dirigeable

Le dirigeable appartient à la famille des aérostats, c'est-à-dire qu'il utilise le principe de la poussée d'Archimède pour assurer sa sustentation, contrairement aux aérodynes (avions, hélicoptère, etc.) qui utilisent le principe de portance aérodynamique. Pour ce faire, les dirigeables sont constitués d'une enveloppe d'un volume très conséquent dans lequel est emprisonné un gaz plus léger que l'air. L'hélium, un gaz rare inerte, est très majoritairement utilisé dans les applications actuelles. Ce gaz rare est largement préféré au dihydrogène, plus léger et plus abondant, pour des raisons de sécurité car le dihydrogène est en effet hautement inflammable. Il n'est toutefois pas exclu de considérer le dihydrogène dans le futur, certainement pour la seconde génération de dirigeables, à condition de démontrer la sécurité de la solution.

Voler avec un dirigeable repose donc sur le contrôle de la poussée d'Archimède. Plusieurs paramètres influent sur la variabilité de cette poussée. La poussée d'Archimède est proportionnelle à la masse volumique de l'air. Cette masse volumique varie notamment en fonction de l'altitude et des conditions atmosphériques. Par exemple la masse volumique de l'air en atmosphère ISA standard à 0 m est

1.225 kg/m^3 et seulement 0,088 kg/m^3 à 20 km. Ceci implique que l'on est 14 fois moins portant. Inversement pour une masse totale donnée de véhicule (10 tonnes) (cette masse intègre à la fois la partie structure et la masse de fluide à l'intérieur de la structure) il faudra considérer au minimum un volume d'enveloppe de 114000 m^3, soit un dirigeable d'une longueur d'environ 115 m pour assurer un vol à 20 km d'altitude.

Les dirigeables fonctionnent en général à volume d'enveloppe constant. La différence d'altitude va engendrer une modification des propriétés thermodynamiques des gaz se traduisant par une variation du volume du gaz porteur. Classiquement ceci est réalisé par une régulation basée sur des échanges, remplissage/évacuation avec l'air extérieur.

Il conviendra également de veiller de manière permanente à l'équilibre vertical de la machine, c'est-à-dire au premier ordre d'équilibrer le poids et la portance aérostatique. Les variations de masse de la machine sont donc à étudier avec un grand soin : cas de transfert de charge (application transport), compensation de la consommation de carburant. La constante maitrise de ce paramètre de flottabilité est la clé du pilotage de cette machine.

Il devient par conséquent essentiel de mettre au point un système de gestion des gaz adapté à l'emploi du dirigeable, ce qui n'existe pas ou peu dans le monde aéronautique actuel. Il est dès lors ardu de trouver des équipements qualifiés sur étagère et il faudra alors développer des équipements adaptés (performants du point de vue de la masse).

Les activités de l'ONERA sur les dirigeables

Ces dernières années l'ONERA a conduit de nombreuses études systèmes : analyse fonctionnelle, analyse de concepts, conception générale, études de réglementation (certification, navigabilité, etc.). Ces études sont conduites par le Département DTIS (Traitement de l'Information et Systèmes), avec le concours des autres départements métier de l'Office.

Les équations du mouvement du dirigeable sont spécifiques et similaires au mouvement des sous-marins. Il convient notamment d'introduire les termes de masses et d'inerties ajoutées ainsi que des termes provenant de l'aérodynamique instationnaire. Ces termes, ajoutés à l'introduction de la portance aérostatique, introduisent de forts couplages et complexifient les équations du mouvement.

Concernant les lois de contrôle, de nombreuses avancées ont été faites : l'introduction de la poussée vectorisée permet d'accroitre la manœuvrabilité de manière drastique. Les thématiques d'intérêt actuelles concernent le contrôle en phase de stationnaire et transfert de charge, la tenue à poste à haute altitude, ou encore la descente/montée dans le cas des dirigeables stratosphériques. Les stratégies de contrôle du ballastage sont également étudiées. L'ONERA travaille actuellement activement sur ces sujets, en particulier dans le cadre des programmes LCA60T et Stratobus™.

L'ONERA travaille aussi sur l'aérodynamique des dirigeables. Ces activités sont menées par le département DAAA (Aérodynamique, Aéroélasticité et Aéroacoustique). Il existe plusieurs spécificités : il faut développer un modèle aérodynamique couvrant tout le domaine des angles aérodynamiques (incidence, dérapage), ce qui est relativement peu courant. Les termes d'amortissement dynamique (effets liés à la rotation de l'engin dans l'air) intervenant de manière primordiale dans la stabilité de la machine, il faut donc les prédire de manière fine. Comme évoqué plus haut, les effets de masses et d'inerties ajoutées, à l'instar du domaine naval, doivent être absolument évalués. Cette évaluation est compliquée sur les formes géométriques non conventionnelles, du fait d'un état de l'art ténu. Enfin les dirigeables sont extrêmement sensibles à la turbulence. L'ONERA a des activités autour de ce thème, complétées par des actions de caractérisation aérologique. Ces travaux ont été soutenus par des activités de thèse.

Ces activités reposent sur des évaluations numériques CFD (code ElsA en particulier) et comportent un volet expérimental avec le recours à des campagnes d'essais en soufflerie. L'ONERA utilise pour cela la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille dont la veine d'essais est équipée du montage PQR, qui permet de réaliser d'une part des grandes excursions d'angles aérodynamiques et d'autre part des oscillations forcées afin d'évaluer les effets de la rotation en tangage et en lacet. Les mesures obtenues

Maquette d'une configuration de LCA60T (Flying Whales) en soufflerie L1 à l'ONERA-Lille sur montage « pqr »- Nouvelle Configuration 2020

Maquette d'une configuration de Stratobus en soufflerie L1 à l'ONERA-Lille sur montage « pqr » - Nouvelle Configuration 2019

viennent alimenter le travail d'élaboration du modèle aérodynamique qui est ensuite utilisé dans le modèle de vol. Plusieurs campagnes de mesure ont été menées dans le cadre des programmes LCA60T, Stratobus™ et HORUS.

La prochaine étape consiste en la validation de ces modèles par l'identification des écarts constatés entre les résultats prédits et les mesures issues des essais en vol. L'ONERA a récemment remis à niveau ses outils numériques d'identification et se tient prêt à accompagner les industriels dans cette phase cruciale d'exploitation des essais en vol.

L'ONERA accompagne également les industriels et les services étatiques dans d'autres domaines d'expertise : aspects conditions environnementales (Foudre, ESD, Givre, CEM, etc.), conception aérodynamique des hélices, structures, acoustique, etc. Tous les départements métier de l'Office y sont impliqués.■

AÉROSTATION : COMPOSANTS ESSENTIELS

DES CAPTEURS SOLAIRES ADAPTÉS POUR LES AÉROSTATS

par **Stéphane Guillerez**, Université Grenoble Alpes, CEA, Liten, INES, 73375 Le Bourget du Lac, France

Le développement du photovoltaïque est une réalité incontournable avec une baisse des couts impressionnante (plus de 80% en moyenne sur les dix dernières années) qui rend aujourd'hui l'électricité photovoltaïque compétitive dans de plus en plus d'endroits (pas uniquement limité aux lieux les plus favorables en terme d'ensoleillement par ex). La massification de la production (X7 en dix ans de 2010 à 2020 pour atteindre 140 GW) et l'augmentation continue de la performance des panneaux photovoltaïques (+ 6% de rendement sur la même période pour atteindre 21+% pour les panneaux haut de gamme) ont été les moteurs de la compétitivité. Cette tendance devrait se poursuivre dans les prochaines années avec des perspectives de croissance du marché sans cesse revues à la hausse (hors événement extraordinaire telle que la crise sanitaire de 2020-2021).

Si le marché des centrales au sol et des toitures est et restera ultra dominant pour la production massive d'électricité à très bas cout, les évolutions technologiques récentes permettent d'adresser d'autres applications et notamment dans le domaine de la mobilité. Ces applications restent encore peu nombreuses et n'ont pas encore débouché sur des applications de masse mais le développement des mobilités électriques offre de réelles opportunités. Parmi les réalisations emblématiques, citons cote à cote Solar Impulse qui a une portée symbolique très forte et ne prétend pas à un avenir commercial, et la Toyota Prius avec son pavillon solaire qui est probablement le premier véhicule commercial abouti en terme d'intégration d'énergie photovoltaïque dans la chaîne de traction.

Avec Solar Impulse, on rentre dans le domaine de l'aviation légère, voire très légère. Néanmoins pour ce type d'applications une part importante de l'énergie consommée est dédiée à la sustentation au détriment du déplacement. Cela obère quelque peu les perspectives d'applications pour l'aviation classique. Au contraire, dans le domaine des ballons dirigeables, la quasi-totalité de l'énergie est disponible pour le déplacement, la poussée d'Archimède faisant le reste. Il en résulte une sobriété énergétique inégalée qui motive le très fort regain d'intérêt pour ce type d'aéronefs associés à la propulsion électrique. Dès lors tout ou partie de l'énergie nécessaire pourrait être produite à partir de panneaux solaires. Reste toutefois un obstacle majeur à lever ; la masse. En effet les panneaux solaires développés pour les applications terrestres n'ont pour l'essentiel pas cette contrainte d'usage et leur masse surfacique avoisine 10 à 12 kg/m². Une cure d'amaigrissement s'impose mais celle-ci ne doit pas se faire au détriment de la puissance par unité de surface. Il est donc indispensable de développer de nouveaux panneaux solaires associant puissance surfacique et puissance massique élevées ; ces deux critères peuvent être assemblés en un unique Indice d'Efficacité Frugale, IEF exprimé en W²/kg/m² :

$$\mathbf{IEF} = \frac{\boldsymbol{Puissance}}{\boldsymbol{Surface}} \boldsymbol{x} \frac{\boldsymbol{Puissance}}{\boldsymbol{Masse}}$$

Au-delà de ces critères, le panneau solaire doit être adapté aux missions du dirigeable et sa conception doit tenir compte de paramètres tels que l'altitude et la durée de vol, l'exposition aux aléas météorologiques, la sureté, l'intégration mécanique, la maintenabilité, etc. Par conséquent, il est difficile d'imaginer un modèle de panneau solaire universel à même de s'intégrer sur tous types de dirigeables pour tous types de missions. En d'autres termes, le panneau solaire, et le système énergétique qu'il alimente, doivent être parfaitement conçus, dimensionnés en réponse à un cahier des charges extrêmement précis. Dans tous les cas, l'allégement requiert à minima d'éliminer les matériaux les plus lourds présents dans les panneaux classiques, le verre et l'aluminium qui représentent à eux deux environ 80% du poids. Ce faisant, l'essentiel des propriétés mécaniques et de protection vis-à-vis des agressions atmosphériques sont perdues, et il convient éventuellement de mettre en place des solutions de substitution, notamment quand l'application visée requiert des panneaux rigides. Le niveau de protection vis-à-vis des agressions extérieures devra également être adapté au plus juste en fonction des conditions d'opération et de la durée de vie escomptée.

Dès 2012, le CEA a été sollicité pour développer des panneaux solaires pour des applications aéronautiques et a également développé en parallèle des technologies qui ont été dérivées pour ce type d'appli-

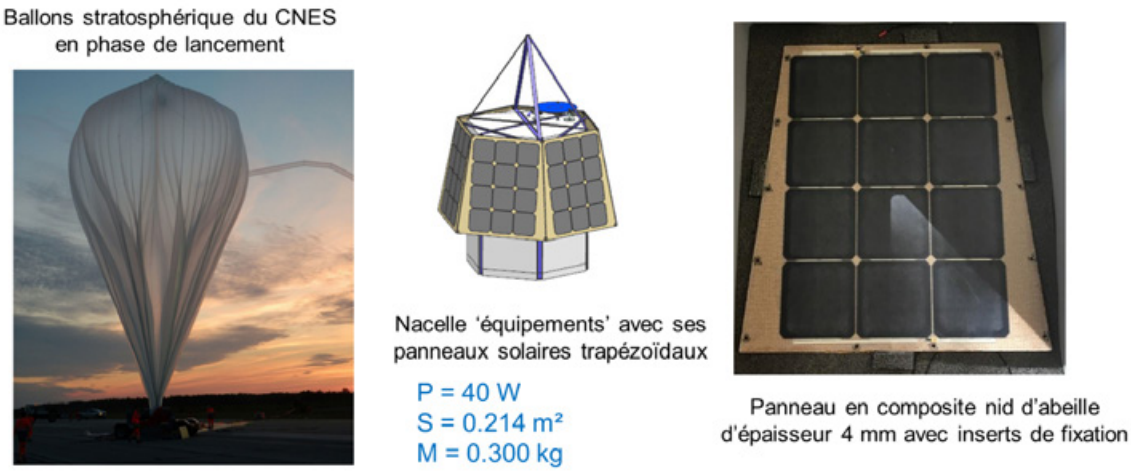


Figure 1. Ballon, nacelle et panneau solaire en composite avec ses principales caractéristiques

cations. Nous présentons trois exemples de panneaux solaires légers basés sur des technologies de cellules en silicium cristallin qui illustrent la diversité des solutions techniques possibles.

PANNEAU SOLAIRE RIGIDE

Le CEA a été sollicité par le CNES pour équiper des ballons sondes de panneaux solaires pour l'alimentation des nacelles 'énergie' et 'équipements' pour des missions d'étude de l'atmosphère de six mois. Le choix de la structure s'est porté sur des panneaux rigides, plus robustes à la manutention que des panneaux flexibles (moins de risque de casse cellule). La Figure 1 montre la configuration de la nacelle 'équipements' avec ses panneaux solaires et une image d'un panneau avec ces 12 cellules délivrant 40W de puissance nominale (mesuré au simulateur solaire selon la norme utilisée pour le PV terrestre). La structure du panneau est directement dérivée de celle du panneau Opérasol qui a été développé en collaboration avec la société 2CA (via le programme DGA Rapid 'OPERASOL') qui le commercialise. La structure du panneau qui repose sur une âme en composite nid d'abeille a été allégée en réduisant l'épaisseur du nid d'abeille de 14 à 4 mm, en travaillant sur le grammage des composites pré-imprégnés. Le montage des panneaux sur la nacelle se fait à l'aide d'inserts intégrés dans le corps des panneaux. La conception et la fabrication des panneaux ont été confié à 2CA qui a réalisé 150 panneaux Opérasol Light pour l'ensemble de la mission.

PANNEAU SOLAIRE FLEXIBLE

Dans le cadre du projet de dirigeable Stratobus développé par Thales Alénia Space, le CEA s'est vu confié le développement de la partie Photovolatic Assembly (PVA). Pour cette application, l'option de conception retenue a été de développer un panneau flexible ultra-léger, à très forte densité de puissance et de grande surface (>4m²). Ces panneaux sont maintenus au-dessus de l'enveloppe du Stratobus par un système mécanique de mise en tension. La

Figure 2. Image de synthèse du Stratobus équipé de panneaux solaires et panneau réalisé au CEA avec ses principales caractéristiques

Figure 3. Prototype de drone solaire Sunbirds pendant sa phase de développement et aile avec ses panneaux solaires et principales caractéristiques des panneaux

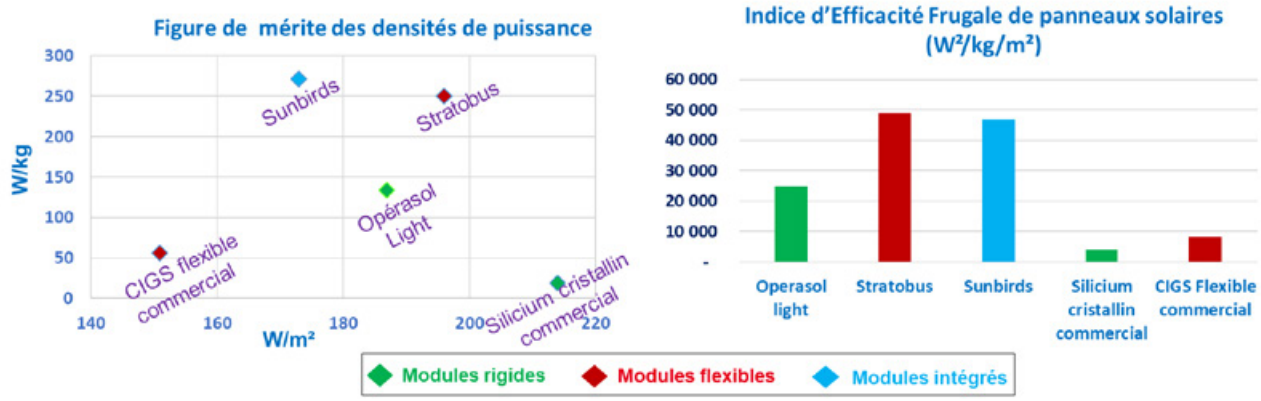


Figure 4 : Caractéristiques de puissance massique, puissance surfacique et Indice d'Efficacité Frugale de panneaux solaires

structure du module et les matériaux choisis doivent donc résister à ces contraintes mécaniques associées à des contraintes thermiques élevées, la température du panneau oscillant entre -100°C à l'ombre et +100°C au soleil. Ces modules n'ont pas encore été testés en conditions réelles mais ont passé avec succès les tests de pré-qualification en laboratoire.

PANNEAU SOLAIRE INTÉGRÉ SUR SUPPORT RIGIDE

Le CEA a développé pour la société Sunbirds un panneau solaire pour équiper ses drones entièrement électriques. Le panneau solaire est directement collé sur l'aile du drone qui lui confère ses propriétés mécaniques. Le panneau avant collage est réduit au minimum pour assurer sa manipulation sans casse des cellules et son isolation électrique. Cette technologie équipe les drones SB4 Phoenix de Sunbirds et permet une autonomie en vol de 8 heures permettant la cartographie de milliers d'hectares sans se poser. Cette technologie pourrait être aisément appliquée sur des dirigeables munis d'une enveloppe rigide en tout ou partie, moyennant un renforcement de la protection contre les agents atmosphériques (eau et oxygène) pour des usages plus intensifs en termes de conditions de vols et de durée d'exploitation.

DISCUSSION -CONCLUSION

Les principales caractéristiques des trois technologies légères développées sont présentées sous forme graphique et comparées à celles de produits commerciaux de références, module rigide au silicium cristallin avec face avant verre et modules flexibles en CIGS.

Les trois technologies de panneaux solaires légers développés possèdent bien des puissances massiques nettement supérieures à celles des panneaux de référence que ce soit les panneaux rigides ou flexibles. Les puissances surfaciques sont intermédiaires entre celles des produits commerciaux CIGS et silicium cristallin, ce qui s'explique par la combinaison de plusieurs paramètres :

- Les cellules silicium cristallin possèdent un rendement de conversion supérieur au CIGS
- Les modules de taille/surface réduite sont pénalisés en raison de la proportion plus importante de leur surface périphérique non active (Sunbirds et Opérasol Light)
- Les matériaux en face avant des panneaux, composite pour Opérasol Light et film polymère transparent pour Stratobus sont respectivement plus absorbant et plus réflectif que le verre des panneaux solaires silicium de référence.

Il en résulte un Indice d'Efficacité Frugale nettement supérieur pour les trois modules légers développés, avec un avantage pour les modules flexibles et intégrés. La tenue mécanique (rigidité) nécessitant l'intégration de matériaux structurels supplémentaires, cela se paye par une diminution de la puissance massique d'environ 100 W/kg.

Ces trois exemples de modules légers illustrent les différentes options technologiques possibles pour l'intégration de panneaux solaires sur les dirigeables et peuvent être adaptés dans une très large mesure aux spécificités de futurs dirigeables et de leurs missions. ■

AÉROSTATION : COMPOSANTS ESSENTIELS

REGENERATING FUEL CELL SYSTEMS, SUBSTITUTS TECHNO DE LA BATTERIE

par **Pascal Barbier**, Air liquide

Le stockage de l'énergie est un des nombreux challenges actuels dans la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique. En effet, les énergies renouvelables ont une problématique commune qui vient de leur intermittence. Cela nécessite donc de stocker l'énergie lorsque il y'a surplus de production pour pouvoir la restituer lors de demandes importantes. La solution la plus efficace est celle du turbinage – pompage que peut offrir certains barrages. Malheureusement cela n'est pas possible partout (notamment quand il n'y a pas de dénivelée suffisante). Les batteries peuvent alors être utilisées, mais leur production nécessite un coût énergétique important.

Cette contrainte du stockage d'énergie est également présente dans de nombreux autres domaines de l'industrie comme le spatial ou l'aéronautique (tout particulièrement les ballons). En effet, dans ces 2 cas, l'énergie électrique est très souvent produite grâce à des panneaux solaires. Il faut donc nécessairement avoir un système de stockage d'énergie pour pouvoir continuer à alimenter les systèmes durant la nuit. La solution des batteries est la plus répandue cependant, la densité énergétique massique étant assez faible (environ 150 Wh/kg). Par conséquent, la capacité de stockage est très limitée, la masse étant un paramètre critique pour les secteurs de l'aérospatiale.

Une alternative possible aux batteries peut être proposée en utilisant l'énergie que peut offrir l'hydrogène. En effet, la densité énergétique de la molécule d'hydrogène est importante (environ 33 kWh/kg) et les piles à combustible actuelles sont en mesure de convertir environ 60% de cette énergie en énergie électrique (en utilisant l'oxygène de l'air ou de l'oxygène pur). Or la réaction chimique réalisée par la pile à combustible entre l'hydrogène et l'oxygène produit de l'eau (1/2 O2 + H2 = H20). En réutilisant cette eau produite à travers un électrolyseur on peut alors créer de nouveau de l'hydrogène et de l'oxygène qui seront utilisés par la pile à combustible. Ces systèmes qui fonctionnent en boucle fermée s'appelle des RFCS (Regenerative Fuel Cell Systems). Dans certains cas, (faible puissance et grande quantité d'énergie à stocker) ils peuvent atteindre des densités énergétiques massiques très importantes (400 Wh/kg et plus). La figure 1 résume le fonctionnement du système RFCS.

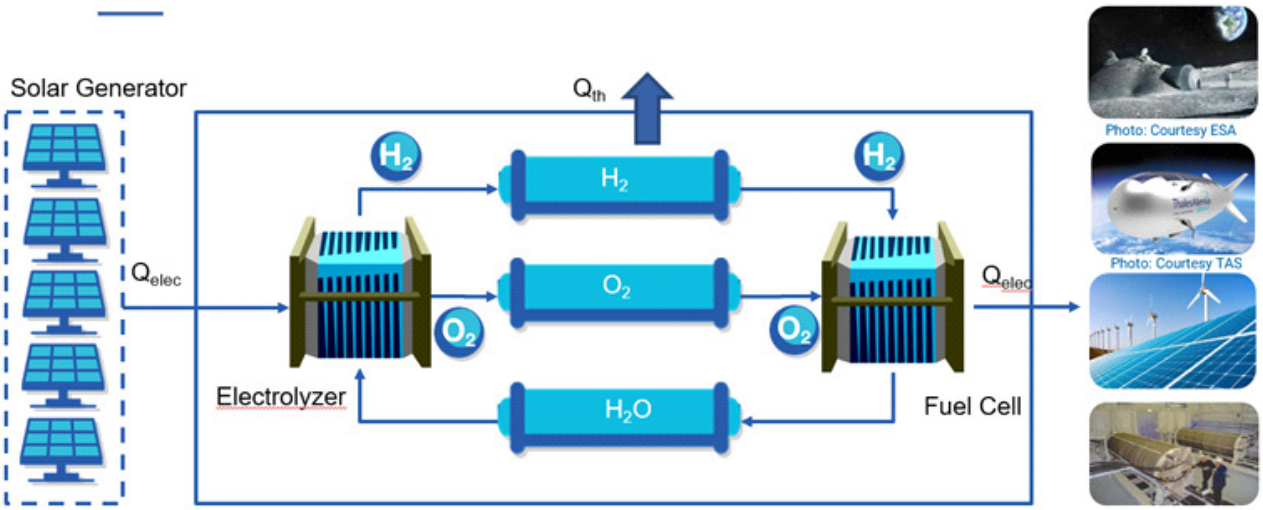


Figure 1. Fonctionnement du système RFCS

Il est à noter que la grande part de la masse de ces systèmes est constituée par le système de stockage des molécules et les molécules elles-mêmes (plus de 50%). L'optimisation de la densité énergétique massique doit donc se concentrer sur les technologies de stockage (haute pression, cryogénique, etc.) et sur l'efficacité de la pile à combustible (pour réduire la quantité d'hydrogène et oxygène nécessaire). Le rendement global d'un tel cycle est d'environ 45%. Cependant, le fonction de la pile à combustible n'étant pas parfait (environ 40% de « perte »), cela génère de la chaleur. Cette énergie thermique, si elle est récupérée et valorisée (notamment pour le spatial) peut alors permettre d'atteindre des rendements de plus de 60%. À première vue, on peut se dire que l'on est loin des cycles batteries (autour de 90%), mais leurs efficacités diminuent très vite dans le temps à l'inverse des RFCS.

Par comparaison avec les batteries, les RFCS peuvent proposer des capacités de stockage au moins 3 fois plus importantes, ce qui divise d'autant la masse embarquée. Un des cas d'application les plus prometteurs est celui du spatial et notamment les opérations lunaires. En effet, sur la lune, il se produit de longues périodes pendant lesquelles le soleil n'est pas présent (nuit lunaire). Selon l'endroit où l'on se trouve ces périodes peuvent être de plusieurs jours. Or pendant ces longues nuits lunaires, la température peut atteindre -120°C, ce qui endommage la plupart des équipements. Il faut donc impérativement pouvoir maintenir ces systèmes à une température plus haute (généralement 20°C), ce qui nécessite d'avoir stocké de l'énergie pour la dissiper en chaleur. Grâce au vide spatial présent sur la lune, la puissance thermique nécessaire pour réchauffer ces équipements est assez faible. En revanche, compte tenu des durées très longues des nuits lunaires, la quantité d'énergie à stocker est importante. On se situe donc dans un cas particulièrement favorable pour les RFCS.

Les dimensionnements des RFCS pour ce cas d'utilisation donnent des densités énergétiques massiques autour de 400 Wh/kg. Ces systèmes permettent donc de diminuer la masse d'un facteur 2, voire 3 environ, par comparaison à un système batterie.

Un autre cas d'application possible est celui des ballons HAPS (High Altitude Platform Stations). En effet, la masse est la contrainte principale de ces systèmes et il faut donc avoir des densités massiques de stockage extrêmement importantes. Or, dans certains cas, le stockage de l'hydrogène des systèmes RFCS peut ne plus être une contrainte car cette molécule peut être utilisée en gaz porteur (au lieu de l'hélium). Dans ces cas particuliers, la masse du réservoir d'hydrogène ainsi que la masse de la molécule d'hydrogène est économisée. D'autre part, à l'inverse du spatial, l'oxygène n'a pas besoin d'être embarquée donc la masse du réservoir de stockage de l'oxygène est économisée. La figure 2 montre un schéma de fonctionnement simplifié qui en résulte.

Ainsi, on peut atteindre des densités énergétiques massiques nettement plus importantes (plus de 800 kWh/kg) avec les RFCS.

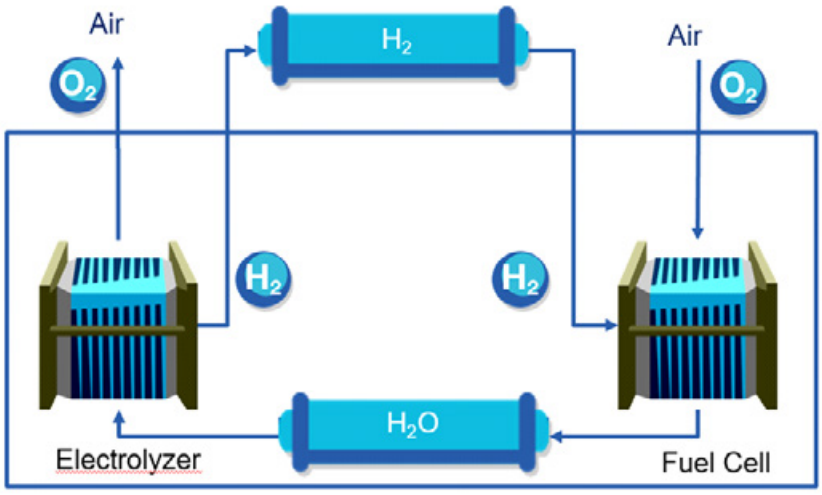


Figure 2. Application du système RFCS au cas d'un ballon HAPS

Compte tenu de ses nombreux avantages on peut se demander pourquoi ces systèmes ne sont pas plus répandus. En regardant l'ensemble des briques technologiques mise en œuvre, on peut noter que les technologies utilisées sont toutes matures (électrolyseurs, pile à combustible, stockage hydrogène, stockage oxygène). En réalité ces systèmes ne trouvent leur place que dans des environnements où la contrainte de masse est forte comme l'aéronautique ou le spatial. Jusqu'à présent ces 2 domaines utilisaient les batteries comme systèmes de stockage ; mais la demande croissante en énergie associée à de nouveaux cas d'utilisation (ambition lunaire ou propulsion hydrogène) impose le passage à de nouvelles technologies comme celle du RFCS.

En conclusion, le stockage d'énergie basée sur l'eau (via les molécules d'hydrogène et d'oxygène) peut constituer une alternative intéressante et performante aux batteries dans des cas d'utilisation bien précis. L'ensemble des technologies mises en œuvre sont matures, mais les systèmes RFCS n'ont pas encore atteint les plus hauts TRL (Technology Readiness Level). Cela devrait être chose faite dans les prochaines années sous l'impulsion des nouveaux besoins des secteurs aéronautique et spatial. ■

DES TEXTILES HAUTES PERFORMANCES POUR AÉROSTATS

par **Edvin Bas** et **Myriam Gautier**, DIATEX

La société DIATEX, concepteur et fabricant de solutions textiles et composites, a été créée en 1986 et se développe aujourd'hui autour de son outil de tissage moderne et performant. Au travers de sa Division textile à usage technique, DIATEX offre des solutions pour les aéronefs souples et rigides : enveloppes protectrices, ballons gonflables ou solutions hybrides.

Les progrès du XXIème siècle seront indissociables de leur impact écologique. Les projets majeurs d'aujourd'hui et de demain seront la clef pour réduire notre impact environnemental et notamment nos émissions de CO_2. Chez DIATEX nous pensons que les dirigeables ont des atouts non négligeables et notamment un impact environnemental moindre en comparaison d'autres technologies, particulièrement lors des phases de vol stationnaire.

Au contraire de leurs concurrents (avions, hélicoptères, drones, etc.) les dirigeables à coque « textile » sont des aéronefs souples constitués de matériaux souples qui souffrent d'une réputation de vulnérabilité face aux conditions météorologiques et aérologiques. Pourtant les complexes textiles, qui possèdent une extrême souplesse, sont en constante évolution et offrent des ratios résistance/poids très satisfaisants pour de nombreuses applications aéronautiques. L'entoilage textile, qui reste aujourd'hui encore une activité de DIATEX, en est le parfait exemple : les tissus thermorétractables, correctement mis en œuvre et protégés, ont une résistance et une durabilité remarquables sur des parties critiques responsables de la portance ou qui subissent d'importants efforts (ailes, empennages, etc.).

Grâce à l'expérience de DIATEX au travers de notre division aéronautique légère, de son savoir-faire en matière de textiles complexés, de son organisation certifiée ISO 9100, des compétences de son équipe R&D et de sa conviction à considérer le dirigeable comme un produit d'avenir, la société développe des complexes pour les aérostiers. Il est indéniable que la certification de ces appareils et de l'ensemble des éléments qui les constitueront sera l'un des défis majeurs des années à venir.

Pour allier les performances de résistance mécanique, d'étanchéité et de durabilité tout en conservant la très précieuse légèreté, les produits DIATEX pour aéronefs sont toujours des complexes « composites » constitués de 2 à 6 couches de matériaux aux propriétés diverses. Chaque strate de ces multicouches est modifiable, y compris les interfaces de liaison pour que les complexes répondent aux différents besoins des aérostiers. Le point commun entre tous les cahiers des charges est bien entendu l'optimisation des ratios résistance/poids et étanchéité/poids pondérés par une notion de durabilité définie en fonction des expositions d'usage de l'appareil.

Les complexes DIATEX sont majoritairement des tri-couches composés d'une âme textile responsable des propriétés mécaniques, d'une enduction, d'un film ou d'une finition sur la face extérieure dans le but d'apporter les propriétés de durabilité à l'enveloppe, ainsi que d'un film intérieur afin de conférer au complexe ses propriétés d'étanchéité aux gaz.

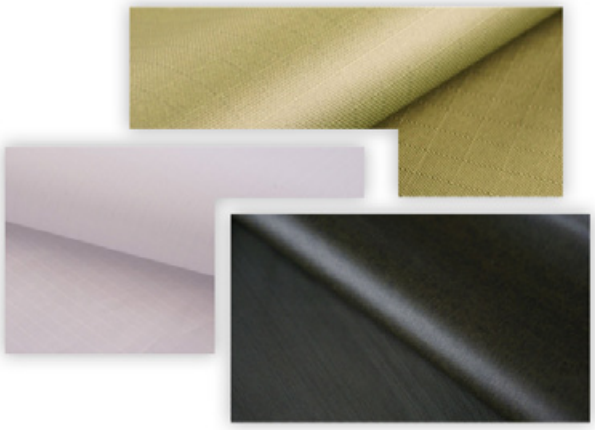
Historiquement, l'âme textile est un tissu composé de fils synthétiques principalement en polyester ou polyamide 66 haute ténacité et préférentiellement avec une armure RipStop qui permet d'améliorer significativement les propriétés de résistance à la déchirure à poids égal. Les métiers à tisser de dernière génération nous permettent de travailler sur l'insertion de fils à haut module afin d'optimiser les propriétés mécaniques du tissu et ainsi limiter la propagation de déchirures.

La société travaille constamment sur l'amélioration des propriétés de ses enductions pour optimiser la durabilité de ses complexes vis-à-vis des contraintes extérieures.

L'enduction reste pour DIATEX le système à privilégier afin de protéger l'âme textile et limiter au maximum l'abattement mécanique généré par les contraintes environnementales pendant toute la durée d'usage du matériau. Les enductions de type polyuréthanes aliphatiques sont optimisées pour notre gamme et offrent divers avantages :

- une résistance intrinsèque élevée aux UVs, à

l'abrasion, à l'hydrolyse,
- une additivité simple pour une personnalisation selon les besoins clients contrairement à des films : ajout d'agents anticrypto, antistatiques, déperlants
- une accroche intime avec l'âme textile,
- un grammage adaptable aux besoins : de 6 g/m² à 100 g/m².



Enductions polyuréthane DIATEX

Le film intérieur est responsable de l'étanchéité aux gaz, il peut être de différentes natures ou épaisseurs selon les besoins client en termes d'étanchéité, de poids ou de techniques d'assemblage. Le plus fréquemment sont utilisés des films de type polyester, polyuréthane ou alcool éthylène vinylique de 10 µm à 100 µm. Les colles utilisées sont conçues pour garantir une bonne adhérence du film et de l'âme textile et résister aux contraintes d'usage telles que les variations thermiques, l'humidité élevées ou les UVs.

Les solutions de type « aluminisation » sur film ou tissu permettent également d'apporter des propriétés de réflexion Infrarouge et d'antistatisme. En effet, la connaissance et la maîtrise du comportement thermique de l'appareil est un point crucial pour les aérostiers pour deux raisons majeures :
- La portance de l'hélium est dépendante de sa température et de trop fortes variations peuvent gêner l'équilibre.
- Les matériaux étanches à l'hélium voient leur perméabilité aux gaz augmenter au fur et à mesure que la température s'élève avec une perte d'hélium plus importante, un remplissage plus fréquent et un coût opérationnel accru.

Les dirigeables sont constitués d'une enceinte étanche exempte de toute aération et l'échauffement par absorption ou transmission de rayonnement infrarouge lors d'une exposition prolongée au soleil est non négligeable. Les tissus aluminisés permettent d'augmenter significativement les propriétés de réflexion infrarouge afin de limiter ces échauffements.

Une simulation a été réalisée à partir d'une boîte d'essai d'1 m² isolée thermiquement avec un isolant épais sur 5 faces et sans aucune aération.

Division Rayon Incident	UV-C	UV-B	UV-A	Visible	Infra-rouge	UV-C	UV-B	UV-A	Visible	Infra-rouge
Réflectance %	< 10	< 10	40 (+/- 25)	55	50	75	75	75	75	80
Transmittance %	< 2	< 2	25 (+/- 15)	45	50	< 1	< 5	< 5	< 5	5
Absorbance %	> 90	> 90	50 (+/- 30)	< 1	< 1	25	25	25	25	15

Réflectance, transmittance, absorbance de tissus DIATEX

Echantillon	Température (°C)	Humidité Relative (%)	T° extérieure
Tissu PES DIATEX Aluminisé M838PSFRECL/ALU	48,1 °C	22,30%	39,6 °C
Tissu PES DIATEX Blanc M838PSFRECL	68,0 °C	10,70%	39,7 °C

Résultats essais thermique (Rapport DIATEX : CRESS2003 Réflexion IR échauffement thermique)

La 6ème face, exposée aux rayons solaires, est constituée de l'échantillon à tester. La température d'origine à l'intérieure de la boite est équivalente à la température extérieure (39,6 +/- 1°C). La boite est positionnée afin que la face à tester forme un angle de 90°C avec le rayon solaire incident. Après 1 heure d'exposition la température à l'intérieur de la boite est relevée. Ci-dessous sont affichés les résultats pour un tissu blanc et le même tissu aluminisé sur une face.

Là où l'échantillon blanc présente une élévation de température de 28°C, elle n'est que de 8,5°C pour l'échantillon aluminisé. Cet essai démontre que le gain de 30% de réflexion infrarouge apporté par l'aluminisation a un impact très important sur l'atténuation de l'échauffement thermique généré par le rayonnement infrarouge dans une enceinte sans aération.

Aujourd'hui DIATEX fournit ses complexes en rouleau pleine laize ou bandes rectilignes découpées en fonction des besoins des aérostiers. La confection des ballons ou panneaux est réalisée directement par les aérostiers ou des confectionneurs habilités par ces derniers. Il n'en reste pas moins que la confection est intimement liée au matériau et représente une étape cruciale de la fabrication de l'appareil. La liaison doit reprendre les efforts du matériau mais également présenter les mêmes propriétés de durabilité extérieure et d'étanchéité aux gaz pour ne pas dégrader la performance globale. La société cherche à adapter les matériaux aux contraintes des confectionneurs et développe des bandes d'apport spécifiques pour ces liaisons à partir de matrices thermofusibles.

Les complexes étanches à l'hélium sont des composites souples constitués de matériaux hétérogènes performants dans leur domaine respectif afin d'offrir un matériau performant dans l'ensemble des domaines exigés par les aérostiers (résistance, étanchéité, durabilité, légèreté). Cependant, un composite traditionnel (fibre/résine) est un matériau considéré comme homogène qui possède un comportement mécanique unique, à l'inverse des complexes qui restent des assemblages de matériaux avec un comportement mécanique et élastique différent selon les strates. Il est donc très difficile de déceler l'ensemble des phénomènes internes qui peuvent avoir lieu lors de la mise sous contrainte mais DIATEX s'efforce de chercher à les comprendre, plus spécifiquement dans la zone élastique du matériau pour permettre aux aérostiers de dimensionner leur appareil et de contrôler la déformabilité des complexes.

DIATEX continue de développer et d'optimiser les complexes de demain et croit fermement que tous ensemble nous arriverons à rendre notre ciel un peu plus « vert ». ■

DES BALLONS CAPTIFS DE SERVICES AÉRIENS POUR LA GESTION DES TERRITOIRES

par **Julie Dautel** et **Cédric Tomissi**, co-fondateurs EONEF

Un des principaux enjeux de notre monde contemporain en transition est de renforcer la résilience des territoires pour faire face aux challenges environnementaux d'aujourd'hui et de demain. Chez EONEF nous participons à la construction de ce monde plus résilient en donnant accès à des services aériens par ballons captifs pour rompre l'isolement et le manque d'informations sur les zones reculées ou mal desservies.

En 20 ans, sous l'effet du réchauffement climatique, le nombre de périodes de sécheresse, d'inondations, de tempêtes, d'incendies et de températures extrêmes a doublé sur notre planète selon le rapport d'octobre 2020 du Bureau des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNSDIR). Sur cette période les catastrophes naturelles ont eu des impacts sur 4,2 milliards de personnes, fait plus d'1 millions de morts et de nombreux ravages sur nos infrastructures selon ce même rapport. À titre d'exemples, l'Organisation météorologique mondiale a évalué le coût économique de l'ouragan Katrina (2005) à 163,6 milliards de dollars et les ouragans Harvey et Maria (2017) respectivement à 96,9 et 69,4 milliards de dollars.

Catastrophes naturelles et dégradations des écosystèmes (règnes animal et végétal) sont intimement liées et impactées par le réchauffement climatique. Sur le globe c'est également une espèce animale ou végétale qui disparait toutes les 17 minutes d'après l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Les espèces s'éteignent à un rythme inquiétant, principalement à cause de facteurs anthropiques comme le réchauffement climatique, la destruction et la fragmentation de leurs habitats ou le braconnage.

Ces phénomènes sont renforcés par le manque cruel d'information et la difficulté d'accès et de réponse coordonnées faute d'un réseau fiable, problématiques communes aux territoires touchés par la crise et aux zones reculées.

Comment soutenir les zones à risque ? Quel pourrait-être le rôle des données aériennes dans leur protection ? Comment se passer des données satellitaires onéreuses dans les zones blanches ?

Les ballons captifs sont justement de formidables outils de gestion du territoire, qui permettent de protéger les écosystèmes et les populations en recueillant et en donnant accès à des informations clefs. Le ballon est une réponse d'une grande efficacité car il offre une persistance de vol quasi continue et permet une diversité de fonctionnalités de télécommunication embarquées, d'observation ou de mesures diverses. La hauteur du ballon augmente la portée des différents capteurs en les affranchissant des contraintes d'obstacles au sol. Positionné à une hauteur stratégique, il offre un vecteur plus performant que des applications au sol et moins onéreuse que celles par satellite. Le ballon permet d'effectuer de longues missions, d'une journée à quelques semaines, là où le drone se limite à quelques heures de vol.

Pour la surveillance aérienne d'un site étendu, à titre de comparaison, les prix d'une prestation en direct sur une journée sont équivalentes entre un drone avec son pilote, une transmission vidéo satellitaire ou un ballon EONEF et son opérateur. Toutefois, sur une semaine d'utilisation, le ballon captif EONEF effectue une économie d'échelle très importante et devient deux fois moins onéreuse que les autres solutions de vidéo aériennes en direct.

La société EONEF développe et commercialise des ballons captifs ergonomiques et très compacts, opérables sur une large plage d'utilisations. Les systèmes EONEF sont composés d'un ballon gonflé à l'hélium, relié par un câble à un treuil arrimé au sol. Ces aérostats captifs embarquent une charge utile (caméra ou antenne) et en augmentent la zone de couverture en prenant de la hauteur tout en inscrivant ce service aérien dans la durée. Ces infrastructures temporaires sont déployables en quelques heures par deux personnes et volent de plusieurs jours à plusieurs semaines tout en ayant une empreinte environnementale réduite.

EONEF s'est positionné en tant que concepteur et vendeur de ballons ergonomiques et compacts, dont l'objectif principal est de simplifier leur utilisation pour en démocratiser l'usage et apporter sur le marché des services aériens la persistance de vol que le drone n'a pas. Chez EONEF, le ballon captif est considéré comme un formidable outil pour consolider la résilience des territoires grâce à sa capacité à participer à la construction d'un monde permettant de vivre de manière satisfaisante malgré des circonstances difficiles, en permettant de connecter, surveiller ou protéger des territoires isolés. Mais aussi, en raison de sa persistance de vol, le ballon permet de rebondir après une perturbation extérieure, en participant à la réponse d'urgence auprès d'équipes d'intervention ou à la prévention de ces perturbations sur des sujets environnementaux. Cela est rendu possible grâce à un fonctionnement tout terrain dans une large plage de conditions géographiques ou météorologiques.

Concrètement les ballons EONEF s'illustrent dans une grande diversité de secteurs d'activités parmi lesquels quelques projets emblématiques confirment le potentiel de ces nouveaux outils :

- Sur des projets de conservation de la faune sauvage, le ballon sert aux scientifiques de terrain et aux écologues pour collecter des données nécessaires pour effectuer du suivi de la faune sauvage et des mesures environnementales, notamment sur des campagnes de réintroduction d'animaux sauvages.
- Sur un volet scientifique plus large, le ballon est aussi un outil de mesure et de suivi environne-

mental persistant. Nos ballons E0-10 et EO-20 sont les supports aériens parfaits pour des campagnes de prélèvements qui s'étendent sur de larges territoires.

- Sur des projets de sécurisation de sites étendus, le ballon équipé d'une caméra devient une vigie mobile à 360°. Il permet ainsi de détecter et suivre en direct l'activité de sites industriels ou de grandes manifestations culturelles et sportives.
- Lors de la gestion de crises et d'urgences le ballon devient une infrastructure de télécommunication légère et rapide à déployer. Équipé d'un relai ou d'un réseau privé (LTE, bulle tactique) le système favorise la coordination des secours et l'envoi d'alertes aux populations post catastrophe.

Pour faire face aux enjeux climatiques actuels et à venir, nous avons besoin de nouveaux outils facilitant la résilience des territoires par l'accès à la donnée afin d'agir sur le triptyque « Collecte, Prévention, Diffusion ». Le ballon captif tel qu'EONEF est un outil multifonction et adaptable qui peut changer la donne sur de nombreux secteurs d'activité. La démocratisation de ces systèmes par leur ergonomie et leur flexibilité en font des atouts indispensables pour la bonne gestion nos territoires !

A propos d'EONEF :

EONEF a pour mission de démocratiser l'usage de ballons captifs ergonomiques et compacts pour gagner en efficacité et offrir de nouvelles possibilités aux agents de terrain. L'entreprise fait partie du mouvement de l'Économie Sociale et Solidaire (ESS) et a reçu l'agrément Entreprise Solidaire d'Utilité Sociale (ESUS) en 2019.

contact@eonef.com
Site internet : https://eonef.com/

Vidéos :

Un parc naturel australien connecté grâce à un ballon EONEF

https://www.youtube.com/watch?v=xLNbn4wffQI

EONEF – Un ballon de suivi de la faune sauvage au dessus du volcan Réunionnais !

https://www.youtube.com/watch?v=D_JJzZCOHRE&t=2s

Article sur EONEF :

Up, up and away: helium balloon assists with wildlife tracking By Dr Andrew Carter, Wildlife Ecologist

https://www.australianwildlife.org/up-up-and-away-helium-balloon-assists-with-wildlife-tracking/

Sources de l'article :

Les catastrophes naturelles ont doublé en 20 ans sous l'effet du réchauffement climatique par la Rédaction numérique de France Inter, publié le 12 octobre 2020

https://www.franceinter.fr/environnement/les-catastrophes-naturelles-ont-double-en-20-ans-sous-l-effet-du-rechauffement-climatique

Les catastrophes climatiques dans le monde en cartes par Françoise Blind-Kempinski et Louise Motte-Moitroux. Cartes et infographies : Dominique Muller, Bruno Battail *« bilan économique lourd de plus de 2 milliards de dollar »*

https://planete.lesechos.fr/enquetes/les-catastrophes-climatiques-dans-le-monde-en-cartes-8070/

L'ouragan Ida pourrait coûter plus cher aux Etats-Unis que Katrina par Le Parisien, publié le 1er Septembre 2021 *« coût économique évalué à 163,6 milliards de dollars, selon l'Organisation Météorologique Mondiale »*

https://www.leparisien.fr/societe/louragan-ida-pourrait-couter-plus-cher-aux-etats-unis-que-katrina-01-09-2021-RTFYGNV3QZFEFAN7AHY3VWR634.php ■

LES BALLONS DU CNES ET LEURS APPLICATIONS

par **Vincent Dubourg**, CNES

CONTEXTE

Cela fait bientôt 60 ans que le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) développe et opère des ballons pour effectuer des mesures scientifiques et des essais technologiques dans la haute atmosphère. À ce jour plus de 4000 vols ont été opérés par les ballonniers du CNES, sous toutes les latitudes.

Capable de rester durablement de 20 à 40 km d'altitude dans la stratosphère, le ballon reste un véhicule unique pour collecter des données in situ sur les vents, les quantités de gaz à effet de serre, d'aérosols, de radiations présentes à ces niveaux de vol, et pour l'observation de l'Univers avec des télescopes de plusieurs centaines de kilos portés au-dessus des couches denses de l'atmosphère (voir Figure 1).

Ainsi, dans le cadre d'un partenariat avec le CNRS et avec différents pays hébergeant des sites de lâchers, des campagnes de vols régulières sont organisées de par le monde, y compris en France depuis le centre d'opérations landais d'Aire sur l'Adour, où plusieurs dizaines de ballons légers sont opérés chaque année. Les lignes qui suivent présentent l'état des lieux de l'activité ballons, et sa feuille de route, montrant qu'elle a toujours sa place parmi les infrastructures qui contribuent aux missions du CNES d'aujourd'hui.

Figure 1. La nacelle scientifique pointée avec le télescope PILOT, à Timmins, Canada. (Crédit CNES, E. Grimaud 2015)

UN PEU D'HISTOIRE

Sous l'impulsion des scientifiques du Service d'aéronomie du CNRS, et en particulier du professeur Jacques Emile Blamont, l'activité ballons a démarré en France au tout début des années 60. C'est en collaboration avec Robert Régipa, l'autre père fondateur de l'activité ballons du CNES, que le Centre de lâchers de ballons d'Aire-sur-l'Adour (CLBA) va voir le jour. Le CLBA fait d'abord partie du Service d'aéronomie, avant son inauguration officielle en septembre 1964. L'infrastructure ballons a été confiée au CNES cette même année ; et alors a commencé la fabrication industrialisée des enveloppes de polyéthylène, dans un premier temps dans l'usine Potez, voisine du CNES à Aire-sur-l'Adour, puis près de Toulouse chez Zodiac au début des années 70. Les ballons sont devenus rapidement de plus en plus grands et performants, et des records de volumes (1 million de m^3) et d'altitude (47 km !) ont été rapidement établis au début des années 80.

Si le CNES et le CNRS maintiennent aujourd'hui et font toujours évoluer cette infrastructure de ballons pour la recherche, c'est qu'il s'agit d'un outil unique pour voler durablement dans la stratosphère et accéder à des mesures in situ entre 15 et 40 km d'altitude, plus haut que les avions, plus longtemps que les fusées sondes, plus près de la cible que les satellites.

LES PRINCIPAUX ACTEURS EN FRANCE ET À L'ÉTRANGER

En France, les principaux partenaires du CNES pour les ballons, sont les laboratoires scientifiques « spatiaux » du CNRS-INSU comme le LMD, le LATMOS, le GSMA, le LPC2E, le LSCE pour les sciences de l'atmosphère, l'IRAP, le LAM, l'IAS pour les sciences de l'Univers, ou l'INSERM pour les expériences de biologie embarquées. D'autres organismes publics participent aussi aux projets ballons, notamment Météofrance pour l'assimilation des données, la modélisation de l'atmosphère, le CEA pour les détecteurs d'instruments d'astronomie, l'ONERA pour la simulation et les tests des environnements stratosphériques, notamment radiatifs, sur

les matériaux ballons.

Pour ce qui est du contexte industriel en France, le CNES est aujourd'hui maître d'œuvre du système complet et des sous-systèmes ballons, et s'appuie sur des partenaires équipementiers et sous-traitants d'horizons et de tailles variés.

Le fabriquant d'enveloppes de ballons stratosphériques du CNES est unique en Europe, il s'agit de la société CNIM AS, qui a repris l'usine créée par Zodiac, près de Toulouse.

Les électroniques de bord sont confiées à des PME, voire TPE, fournisseurs des secteurs spatial, aéronautique, et même, par souci de limitation des coûts, d'équipements électroniques grand public, dont la fabrication en grand nombre ou la destination (secteur médical notamment) garantissent la fiabilité.

Ces 5 dernières années, la stratosphère a inspiré de nouvelles missions du « New Space » : les grands groupes comme Thales Alenia Space avec son projet de dirigeable stratosphérique STRATOBUS, et Airbus avec le drone ZEPHYR et bientôt le Ballon Manœuvrant, visent à prendre une place dans le monde des HAPS (High Altitude Pseudo-Satellites), pour compléter la capacité d'observation des satellites. Ce sont aussi des startups comme ZEPHALTO (tourisme sous ballon), qui s'annoncent comme usagers potentiels des hautes couches atmosphériques. Le CNES met à disposition de ces acteurs français son expertise technique et son expérience, acquises au fil du temps et des campagnes d'opérations.

En Europe, la Suède, via la Swedish Space Corporation (SSC) à Kiruna, opère des vols de gros ballons stratosphériques, qu'elle achète en France ou aux États-Unis. Les autres pays européens, acteurs ou nouveaux entrants du spatial, Allemagne, Italie, Royaume-Uni, mais aussi Belgique, Pays-Bas, Espagne, Pologne, ...développent des instruments ou des charges utiles qu'ils font voler avec le CNES ou la SSC, notamment dans le cadre du contrat européen H2020 Hemera, piloté par le CNES.

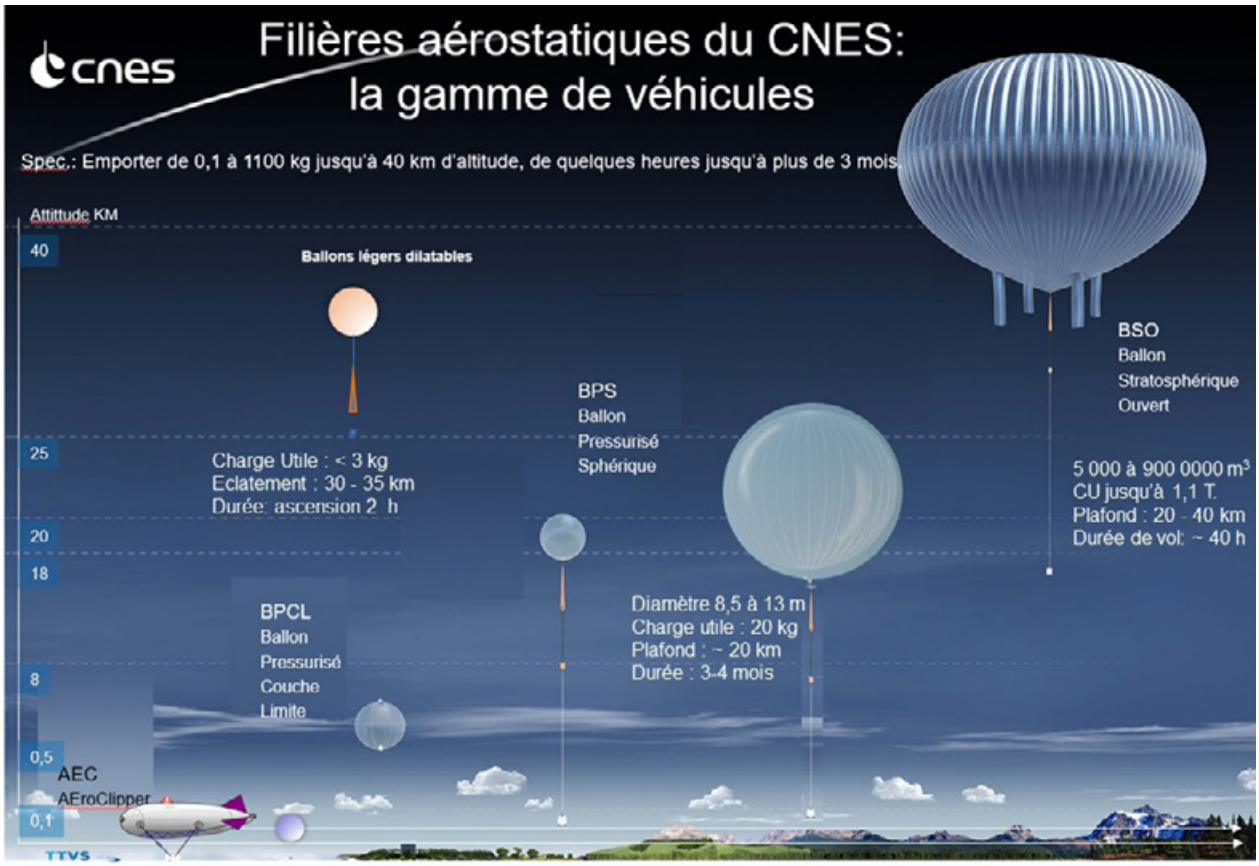


Figure 2. La gamme d'aérostats du CNES

INTÉRÊT ET APPLICATIONS DES BALLONS

Plateformes d'innovation, simples et écologiques, les ballons présentent des avantages indéniables :

- Capables d'évoluer durablement dans la stratosphère, jusqu'à 40 km d'altitude, emportant des expériences pesant jusqu'à plus d'une tonne, les ballons sont des véhicules uniques pour les mesures in situ.
- Ils permettent le développement de projets de bout en bout sur des échéances courtes, typiquement de 1 à 3 ans, compatibles de cycles de formation d'ingénieurs, d'universitaires ou d'alternants.
- Ils fournissent des sujets de coopérations internationales à coût modéré, et permettent la réalisation de démonstrateurs d'instruments pour satellites, ainsi rapidement testés en situation opérationnelle.
- L'ensemble des matériels qui atterrit sous parachute est récupéré après le vol, et peut être réutilisé, après d'éventuelles réparations ou améliorations technologiques.
- Les opérations de préparation et de mise en œuvre sont relativement simples, et permettent de s'accommoder de sites de lâchers divers aux moyens logistiques réduits.
- Les contraintes d'aménagement et de tenue mécanique aux chocs et vibrations sont moins strictes que pour un satellite soumis aux chocs et vibrations du lanceur.

LA GAMME DES BALLONS DU CNES

Pour répondre aux missions demandées par leurs utilisateurs, scientifiques français et étrangers, industriels et institutionnels, les ballons du CNES doivent emporter des charges utiles de quelques centaines de grammes jusqu'à plus d'une tonne, depuis le sol jusqu'à la haute stratosphère, pour des durées allant de quelques heures à plus de 4 mois. Le CNES répond à ces besoins par une gamme optimisée de véhicules (voir figure 2), dont les matériaux d'enveloppe, les dimensions et les différents systèmes bord et sol sont adaptés aux performances requises.

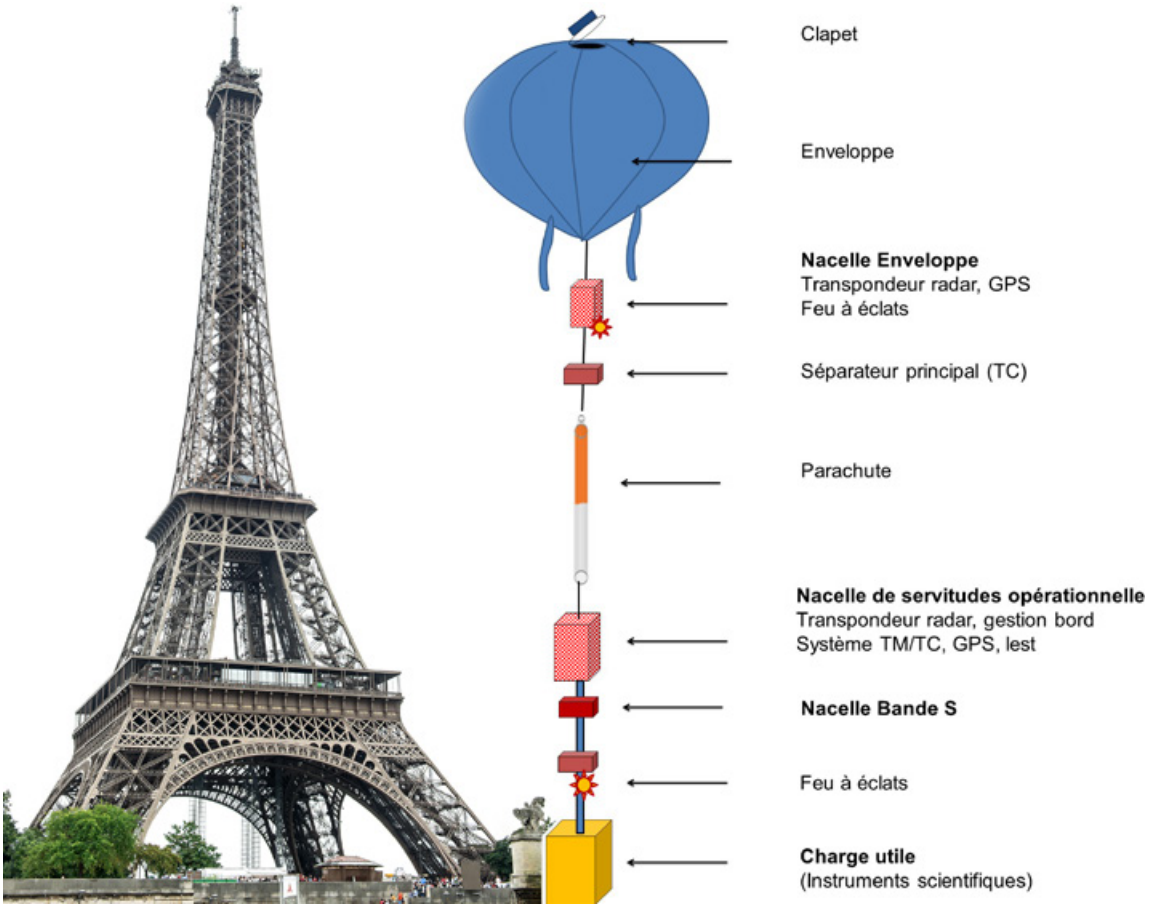


Figure 3. Un système d'aérostat BSO complet atteint les dimensions de la Tour Eiffel (324 m)

L'immense Ballon stratosphérique ouvert (BSO), qui peut atteindre près d'un million de m^3 (8 terrains de rugby en surface), fait de polyéthylène transparent de 15 à 25 µm d'épaisseur, peut porter près de 2 tonnes à son crochet et voler de quelques heures à quelques jours jusqu'à 40 km d'altitude. Il peut réaliser des excursions d'altitude et des descentes pilotées grâce à un clapet qui permet d'évacuer de l'hélium, pour ralentir la montée ou engager la descente, et une réserve de lest de billes d'acier, dont le largage permet de prendre de l'altitude, ou de se stabiliser en descente (voir Figure 3 le synoptique du BSO).

Des campagnes annuelles en Suède, au Canada, en Australie et bientôt au Brésil, mettent en œuvre ces géants des airs pour des expériences d'astronomie comme le télescope PILOT, développé avec l'IRAP, l'IAS et le CEA, ou des vols d'instruments dédiés aux mesures atmosphériques comme SPECIES du LPC2E du CNRS. Partenaire des laboratoires scientifiques, le CNES met à leur disposition des nacelles charges utiles munies de systèmes de pointage 3 axes ultra-performants (mieux que la seconde d'arc) et de toutes les servitudes bord (alimentation, système de gestion bord, transmission de données).

Pour des vols de plus longue durée, jusqu'à plusieurs mois, il faut un ballon fermé, pour garder le gaz porteur (hélium) durant tout le vol, et éviter que le ballon ne se dégonfle dans les cas froids (la nuit). Le CNES a développé et fait évoluer notamment pour le programme STRATEOLE-2 en cours pour l'étude de la stratosphère équatoriale, une filière de ballons pressurisés sphériques (BPS), de 8 à 13 m de diamètre, dont l'enveloppe est un complexe de polyester et polyamide multicouches de 70 µm, résistante aux ultra-violets, et capables de transporter 50 kg entre 18 et 20 km d'altitude pendant plus de 3 mois (voir Figure 4).

Mais la stratosphère est aussi atteignable par de simples ballons sondes en latex, dits ballons légers (au sens de l'OACI, portant moins de 4 kg), qui permettent des sondages atmosphériques jusqu'à 30 à 35 km. Deux à 3 vols mensuels sont réalisés par le CNES à Aire-sur-l'Adour tout au long de l 'année, pour des essais technologiques à coût réduit, mais aussi pour des mesures scientifiques, notamment de gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, H_20) et d'aérosols, pour une surveillance régulière de ces variables climatiques, et la calibration des satellites d'observation comme OCO, IASI, Sentinel 5, etc.

Pour l'étude des phénomènes locaux dans les basses couches (vents de sable, pollution, événements cévenoles), le CNES utilise des ballons pressurisés de couche limite (BPCL), une déclinaison des BPS dans des volumes plus faibles, permettant de voler jusqu'à 1 mois de 500 m à 3 km d'altitude.

Enfin, les aéroclippers, ballons profilés traînant un guiderope instrumenté, « naviguent » au-dessus de l'eau, pour des mesures dans la couche limite océanique. À terme, ils devraient permettre l'instrumentation interne des cyclones, pour des mesures de pression inédites, grâce à un nouveau concept, en développement sous brevet CNES.

Figure 4. Un BPS prêt au lâcher à Mahé, Seychelles, pour le projet STRATEOLE 2 (Crédit CNES, R. Gaboriaud 2019)

LA FEUILLE DE ROUTE

Afin de continuer à servir les objectifs scientifiques et technologiques de son infrastructure ballons, le CNES vise à rester à la pointe de la technologie et des performances, tout en veillant à mutualiser les ressources, et les systèmes, favoriser l'interopérabilité de tous les types de ballons notamment, et faire monter en compétences ses partenaires.

La mise au point de nouveaux matériaux, tissés, plus résistants à la surpression, va autoriser des vols de BPS de plus longue durée, jusqu'à un an, pour des charges utiles plus lourdes, pour des thématiques plus diversifiées.

Enfin, avec l'arrivée du New Space, l'utilisation de la stratosphère pour de nouvelles applications, notamment d'observation et de surveillance, devient stratégique et attire les startups comme les grands groupes et les institutionnels. Le ballon manœuvrant Loon de Google a montré la voie, et des ballons aux performances augmentées sont à l'étude au CNES, pour répondre à ces nouvelles missions, qui seront à n'en pas douter sources de nombreuses applications dans les années à venir. ■

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : SURVEILLANCE ET MESURES

BALLON STRATÉGIQUE A-NSE

par **Athanase Riche**, A-NSE

LES BALLONS CAPTIFS (OU AÉROSTATS)

Les aérostats (« plus légers que l'air »), premières machines volantes conçues par l'homme, étaient tombés en désuétude dans les années 60 dépassés par les aérodynes (« les plus lourds que l'air ») dans la plupart des utilisations professionnelles (à l'exception notable des études météorologiques). Depuis une trentaine d'année, ils connaissent un regain d'intérêt certain, aux Etats-Unis pour l'essentiel, notamment sous une forme captive. Les ballons captifs sont en effet des plateformes aériennes offrant une combinaison unique de capacité d'emport, d'endurance et d'élongation. En particulier le principe intrinsèque qui leur permet de flotter dans l'air (et non pas de voler) en fait des vecteurs aériens extrêmement efficients.

Toutes ces qualités les rendent particulièrement indiqués pour des applications, aussi bien civiles que militaires, nécessitant hauteur de vue et permanence en vol. Cependant, bien que le concept soit relativement simple, maintenir une altitude dans la durée, malgré des contraintes d'environnement changeantes, requière des savoir-faire très élaborés et des technologies pointues qui touchent à la conservation des gaz, à l'aérodynamisme et à l'ingénierie des systèmes.

A-NSE

Aero-Nautic Services and Engineering SAS (A-NSE) est une entreprise française, fondée en 2010, qui s'est construite une expertise empirique de conception, de fabrication et d'intégration d'aérostats.

La connaissance technique n'étant pas disponible en France, la société a dû développer ses propres savoir-faire pour répondre aux nombreuses spécificités des ballons captifs. Au gré de projets à la complexité croissante, A-NSE a acquis ainsi une maîtrise unique de l'ingénierie liée aux aérostats, reconnue par d'éminents acteurs institutionnels et privés, qui en font l'un des leaders du secteur.

A-NSE propose 3 gammes de ballons captifs correspondant à des typologies de missions différentes associées à une endurance et une capacité d'emport (voir Figure 1).

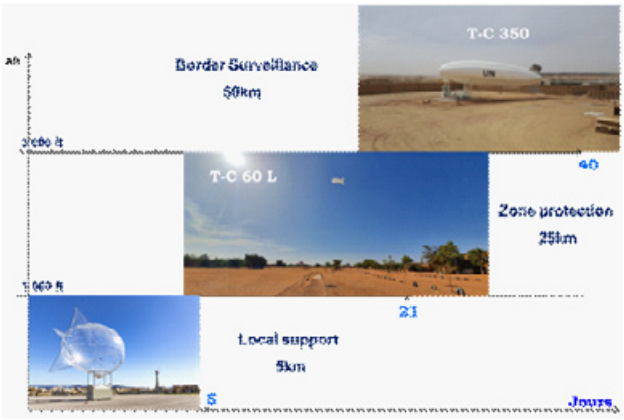


Figure 1. Différents domaines d'utilisation des ballons captifs

LE PROJET D'UN AÉROSTAT STRATÉGIQUE

Forte de son expertise dans l'ensemble des technologies participant à l'élaboration d'un système aérostat, l'entreprise se lance dans l'étape d'après, à savoir les systèmes de la gamme stratégique. C'est-à-dire les systèmes capables de porter des charges

utiles allant jusqu'à une tonne à des altitudes de plus de 5000 m, ce que seuls les américains savent, à l'heure actuelle, construire.

Ce projet ambitieux va nécessiter de relever de nombreux défis qui touchent à la résistance des sous-ensembles, à l'aérodynamique du système et aux techniques de régulation.

CARACTÉRISTIQUES ATMOSPHÉRIQUES

Pression, température. Partant du cadre atmosphérique défini Figure 1, les données de pression et de température atmosphériques moyennes (pour une position géographique en France métropolitaine) sont fournies par l'OACI et résumées Figure 2.

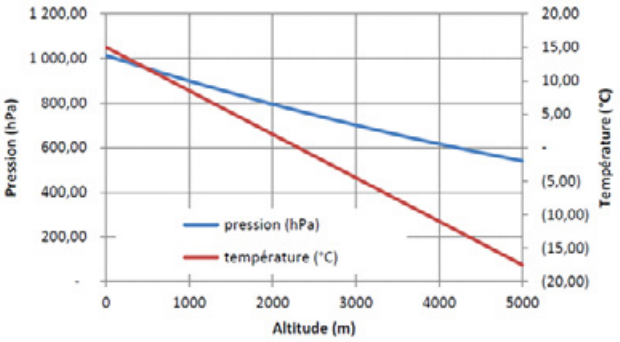


Figure 2. Variation de pression atmosphérique et de température avec l'altitude (données OACI)

À 5000 m au-dessus du niveau de la mer (ASL) la pression atmosphérique moyenne est divisée par deux, et la température moyenne est fortement négative (-30°C/sol). Les caractéristiques physiques du gaz porteur (l'hélium) provoquent un changement de volume en fonction des conditions de température et de pression atmosphérique. Ainsi, avec la prise d'altitude la pression atmosphérique diminue, ce qui conduit à une augmentation du volume d'hélium. En même temps, la température moyenne de l'air diminue, ce qui provoque une contraction de l'hélium. Les deux phénomènes se produisent simultanément.

Dans les conditions du cahier des charges adopté (vol à 5000 m ASL), la variation du volume d'hélium entre le volume au sol et le volume en altitude maximale représente un rapport de 1,8. Afin d'éviter une surpression dans l'enveloppe liée à l'augmentation du volume d'hélium, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs de compensation.

EFFET DU VENT

Des données météorologiques de vent moyen en fonction de l'altitude sont disponibles ; à titre d'exemple pour la région européenne de climat tempéré, la Figure 3 donne les valeurs de vitesse de vent moyenne (15 m/s) et maximale (50 m/s) à 5000 m. On notera que ces valeurs sont croissantes avec l'altitude entre 0 et 10,000 m.

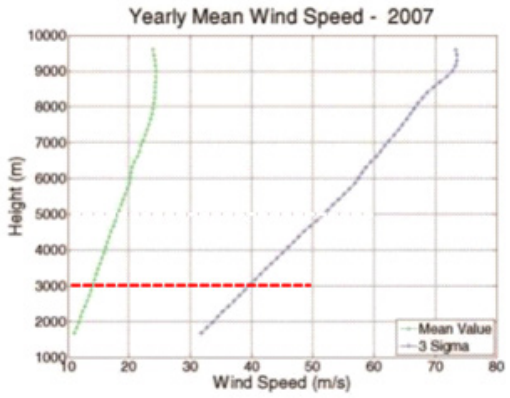


Figure 3. Vitesse du vent fournie par The Natural Environment Research Council (NERC), d'après la station Mesosphere-Stratoshere-Troposhere (MST) située à Capel Dewi (52,42°N, 4,01°W) à côté d'Aberystwyth au Pays de Galles

Il nous semble raisonnable de fixer une limite de vent pour une exploitation opérationnelle de l'ordre de 50 m/s pour dimensionner le système.

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE BALLON CAPTIF

Définition du système et de ses inconnues. Le système mécanique (Ballon captif) est schématisé Figure 4. L'aérostat est composé d'une enveloppe souple sous pression, équipée d'empennages (surfaces portantes stabilisatrices) et d'une charge utile. L'aérostat est relié au sol par des suspentes et un câble.

La longueur de déroulement du câble est contrôlée par une station sol équipée d'un système de treuil motorisé. Si l'on considère les suspentes comme quasi-rigides et l'enveloppe sous pression comme

indéformable, les forces statiques en présence sont les suivantes :

- la portance statique (ou flottabilité),
- l'effort aérodynamique,
- le poids,
- la tension sur le câble en haut de ce dernier.

Les deux premières forces peuvent être estimées. La troisième doit être évaluée pour obtenir la quatrième et ainsi décrire complètement le système. Ainsi posé, le système possède autant d'inconnues que d'équations et peut être résolu.

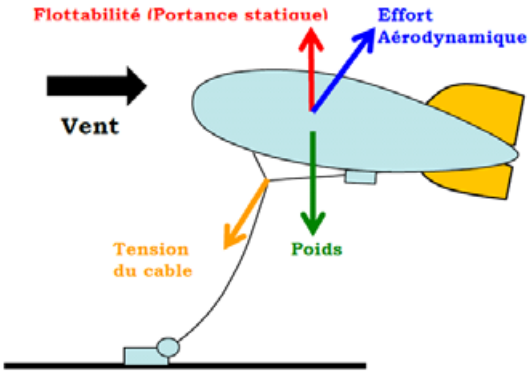


Figure 4. Schématisation des efforts appliqués à un ballon captif

Problème de l'enveloppe. La variation de volume de l'hélium est compensée par une sous-enveloppe gonflée à l'air (un ballonnet), dont la régulation de pression permet de maintenir la forme et la rigidité globale de l'enveloppe. La proposition initiale du projet consistait en une ascension sous enveloppe partiellement gonflée, puis une gestion des variations de conditions atmosphériques par contrôle d'altitude (voir Figure 5).

Cette solution paraît, après analyse détaillée, complexe et difficile à mettre en œuvre. En particulier, l'ascension et la descente d'une enveloppe partiellement gonflée pose de nombreux problèmes de stabilité de vol en présence de vent, qui sont étroitement dépendants de la rigidité globale de l'enveloppe. Le déploiement d'un système partiellement gonflé n'est donc possible que dans des conditions météorologiques particulièrement favorables, ce qui réduit significativement les possibilités opérationnelles du système.

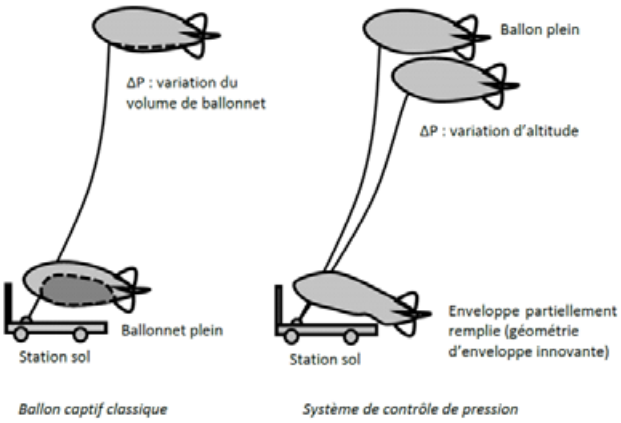


Figure 5. Proposition initiale (non retenue) de gestion de variation de volume

C'est pourquoi une solution innovante et spécifique de gestion de la variation de volume pour un ballon de haute altitude est développée.

Problèmes liés à l'ombilical. Le maintien d'un ballon captif au moyen d'un ombilical multifonction doit répondre à plusieurs contraintes :

- L'ombilical doit tenir les spécifications mécaniques imposées par le domaine de vol (essentiellement la vitesse de vent maximale) défini.
- L'ombilical doit assurer la continuité des autres fonctions pour un effort de traction dans le câble raisonnable, afin de conserver sa fonctionnalité malgré de courtes excursions hors du domaine de vol prévu.

L'ombilical doit faire face à de multiples problèmes qui ont traits à des contraintes mécaniques.

- La première d'entre elles est l'allongement qui peut être distinct pour les différents composants du câble. En particulier, une fibre optique est un élément fragile dont la rupture est potentiellement critique.
- Dans le même ordre d'idée, un câble doit être protégé en courbure afin d'éviter une possible rupture de la fibre optique ou du câble cuivre. Pour ce faire, un dispositif de limitation du rayon de courbure doit être développé et intégré à la station sol, au niveau du renvoi de l'ombilical vers le haut.
- Enfin se pose le problème de la torsion du câble, qui doit d'être limitée et contrôlée. À cette fin, une interface tournante doit être imaginée, afin de faire le lien entre le câble et le reste du ballon.

Dans un autre registre, l'élaboration de l'ombilical doit prendre en compte les contraintes aérodynamiques. Ainsi, le diamètre du câble peut avoir une influence significative sur la performance de tenue au vent de l'appareil. La simulation complète du système d'aérostat donne accès à la trajectoire du câble en fonction de paramètres tels que vitesse du vent, masse de charge utile, diamètre du câble, etc.

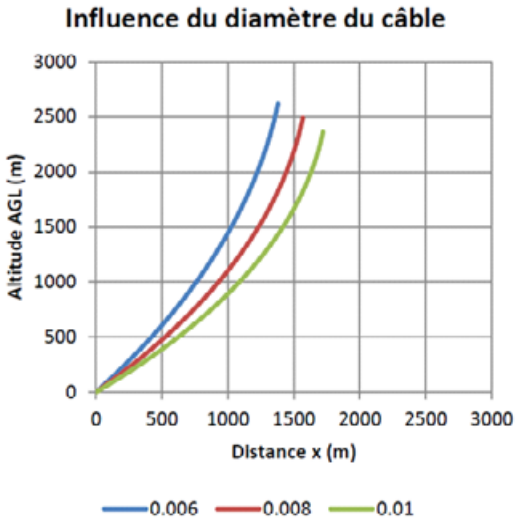


Figure 6. Résultat de modélisation, influence du diamètre de câble pour un câble de 3000 m

La figure 6 montre l'influence d'un diamètre de câble croissant entre 6 mm et 10 mm, pour une portance statique (en incluant le poids total de câble) de 224 kg et une vitesse de vent de 80 kts (144 km/h) pour un ballon à 3000 m. Pour une telle vitesse de vent, l'aérostat ne perd pas beaucoup d'altitude (l'altitude moyenne est de 2600 m pour 3000 m de longueur de câble) car la portance dynamique est élevée. Par extrapolation, on peut considérer qu'il en sera de même à 5000 m. Toutefois l'influence du diamètre du câble est manifeste, car un câble plus épais modifie considérablement la position moyenne de l'aérostat.

La Figure 7 montre l'influence d'une masse linéique de câble croissante. Contrairement au cas précédent, il est notable que ce paramètre joue moins sur la trajectoire du câble et la capacité du système à se maintenir en position sans que le ballon ne perde trop d'altitude.

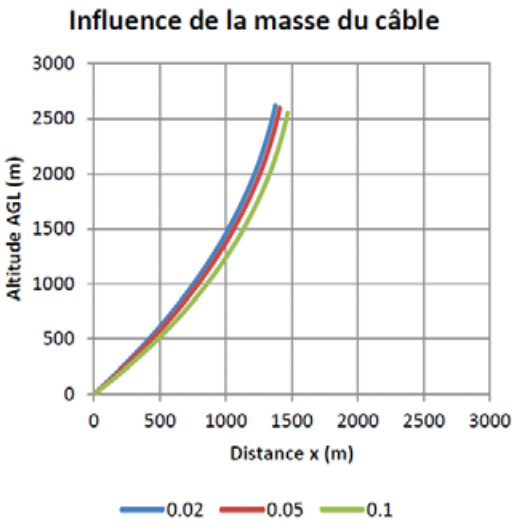


Figure 7. Résultat de modélisation, influence de la masse du câble

Figure 8. T-C 350 stratégique

CONCLUSION

Ce projet va confronter A-NSE à de nombreux défis techniques mais pas seulement. Elle devra également affronté la frilosité des grands donneurs d'ordre pour lesquels les aérostats, de petites et grandes dimensions, ne représentent pas encore une alternative crédible. À ce titre, la France semble en être un exemple patent puisqu'elle n'a encore initié aucun programme de ballons captifs quand bien même elle compte plusieurs acteurs nationaux non négligeables, dont A-NSE, en la matière.

Les perspectives viendront peut-être de l'étranger. À ce titre les Allemands semblent avoir franchi le pas avec un beau projet intermédiaire pour lequel A-NSE est mobilisé sous la maîtrise d'ouvrage de

Salon du Bourget 2015

A-NSE

Rheinmetall (aérostat de la gamme opérative : 1000 m, 1200 m³).

L'Union européenne représente également une belle opportunité avec son Fonds européen de la défense. A-NSE n'abordera pas les défis techniques qui s'annoncent seule. Elle a d'ores et déjà identifié des partenaires européens de haut niveaux dans les technologies des ombilicaux et des matériaux pour y répondre.

L'avenir nous dira donc si un ballon européen est en mesure d'aller défier les champions américains en haute altitude. ■

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : SURVEILLANCE ET MESURES

STRATOBUS™, LE DIRIGEABLE STRATOSPHÉRIQUE MULTI-MISSIONS

par **Yannick Combet**, Thales Alania Space

Stratobus est un concept de plateforme stratosphérique autonome à mi-chemin entre le satellite, le dirigeable et le drone. Thales Alenia Space (TAS) en est le maître d'œuvre industriel.

ORIGINE DU PROJET STRATOBUS™

Le projet Stratobus™ est né en octobre 2009 lors d'une Convention de la Communauté Européenne HAPCOS [1] : Stratoflight, organisée par le Pôle de compétitivité Pégase (aujourd'hui le Pôle SAFE [2]). C'est lors de cette convention que le Pôle Pégase a proposé de monter une étude de faisabilité technique et de réaliser l'étude d'un modèle économique avec Thales Alenia Space et ses partenaires de l'époque, en bénéficiant du soutien financier de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Ces deux études de faisabilité, déroulées en parallèle de 2010 à 2013, ont conclu à la fois à la faisabilité d'un concept de dirigeable stratosphérique positionné à une altitude de 20 km pour réaliser des missions de type géostationnaire et à l'existence d'un modèle économique profitable principalement basé sur des missions de surveillance.

Début 2013, Thales Alenia Space présente un projet d'étude plus abouti, projet nommé Stratobus™. C'est en mars 2014, lors de l'évènement InnovDays du Groupe Thales, que le projet Stratobus™ est dévoilé. Stratobus™ s'envole !

En juillet 2015, Stratobus™ est confirmé comme un programme à fort potentiel de la Nouvelle France Industrielle par les ministères de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, et de l'Écologie. Il est inscrit au plan de la filière dirigeable. En octobre 2015, le projet Stratobus™ fait alors l'objet d'une proposition au Programme d'investissement d'avenir (PIA), guichet du PSPC [3]. Le 28 janvier 2016, Thales Alenia Space et ses partenaires sont notifiés par le

1. HAPCOS : High Altitude Platforms for Communications and Other Services.
2. Pôle Pégase devenu pôle SAFE : Security Aerospace Actors for the Future of Earth.
3. PSPC : Projet Structurant Pour la Compétitivité.

Commissariat général aux Investissements (CGI) d'une aide financière pour la phase R&D [4] du projet Stratobus™.

Le 26 avril 2016, TAS et ses partenaires, la société CNIM (Construction Industrielle de la Méditerranée), Solutions F, Airstar Aerospace (devenu depuis CNIM Airspace) et Tronico-Alcen signent un accord de consortium et annoncent le démarrage officiel du projet Stratobus™ devant la presse. Ils signent également les contrats de conventionnement du projet Stratobus™ par Bpifrance [5].

Ce projet porté par Thales Alenia Space depuis Cannes, fédère plusieurs entreprises et compétences régionales et s'appuie sur des études de marché solides laissant présager de fortes retombées économiques sur la région. Début 2017, la région PACA soutient le projet Stratobus™ par une aide financière du fond FEDER en région, en complément des engagements financiers nationaux.

CARACTÉRISTIQUES DE STRATOBUS™

Stratobus™ est un ballon dirigeable de 140 m de long pour 32 m de diamètre et un volume de 85 000 m^3, positionné à une altitude entre 18 à 20 km en couche basse de la stratosphère, là où les vents sont modérés et la densité de l'air encore suffisante pour le porter.

La plateforme Stratobus™ est constituée d'une enveloppe souple maintenue en forme par de l'hélium en surpression par rapport à l'air extérieur. Son poids total est de l'ordre de 9 000 kg, hors gaz porteur, incluant une charge utile de plus de 250 kg. Ces caractéristiques font qu'elle peut rejoindre des altitudes autour de 20 km et ainsi de profiter d'un horizon de visibilité à 500 km.

La plateforme et son énergie solaire embarquée lui permettent de contrer des vents de l'ordre de 25 m/s et ainsi de rester stationnaire au-dessus d'un point ou d'une zone d'intérêt avec une disponibilité élevée.

COMMENT STRATOBUS™ FONCTIONNE-T-IL ?

Le ballon monte par ses propres moyens à son altitude définitive, sans avoir besoin de lanceur.

Afin de maintenir sa position à une altitude entre 18 et 20 km et résister à des vents allant jusqu'à 25 m/s (soit 90 km/h), Stratobus™ est doté de quatre moteurs électriques. Pour que ces moteurs

Figure 1. La plateforme multi-applications Stratobus™ (crédit Emmanuel Briot)

4. R&D : Recherche et Développement.

5. Banque publique d'investissement, un organisme français de financement et de développement des entreprises.

Figure 2. Potentiel des missions accessibles avec Stratobus™

fonctionnent 24h/24, l'énergie solaire est convertie par des cellules photovoltaïques placées sur le toit de l'enveloppe ; cette énergie est stockée le jour, puis restituée à la demande la nuit. Ainsi, Stratobus™ est une plateforme entièrement autonome en énergie.

Stratobus™ est capable d'assurer une observation permanente pendant une année entière en partie grâce à une enveloppe spécialement développée pour une utilisation dans la stratosphère. Celle-ci est composée de plusieurs films, pour garantir l'étanchéité en évitant les fuites de gaz, avec au milieu une trame en fibres qui permet d'assurer une résistance mécanique à la surpression. L'enveloppe opaque a un coefficient d'absorption de l'éclairement solaire très faible afin de minimiser l'échauffement du gaz porteur et par conséquent éviter que l'enveloppe ne se déchire par l'augmentation de la pression interne.

Stratobus™ peut assurer des missions de 10 ans, avec une maintenance annuelle au sol de quelques jours.

QUELLES SONT LES MISSIONS DE STRATOBUS™?

Stationné à la limite de la stratosphère, à environ 20 km d'altitude, soit juste au-dessus du trafic aérien, mais bien plus près de la terre qu'un satellite, Stratobus™ est en mesure d'assurer une couverture régionale à une très haute résolution. Capable de transporter de 250 à 450 kg de charge utile, l'appareil peut effectuer de nombreuses missions, de la surveillance de précision d'une zone donnée ou du contrôle de notre environnement, à des opérations de télécommunication et de navigation. Il est destiné à de nombreuses applications telles que la surveillance des frontières, des exploitations pétrolières et de la piraterie maritime, l'identification de navires, la mesure de la qualité de l'air, le renforcement du réseau GSM au cours d'événements de grande ampleur ou l'amélioration du système GPS sur les zones de trafic intense. Dans le cadre de missions de télécommunications commerciales, Stratobus™ s'insère de façon complémentaire dans l'écosystème global des télécommunications en offrant des solutions de connectivité fixe et mobile complémentaires de celles fournies par les réseaux terrestres ou satellitaires.

De nombreux clients manifestent leur intérêt pour ces applications en raison des performances inégalées de Stratobus™, mais également par son faible coût opérationnel et son empreinte écologique minime.

Le ballon dirigeable Stratobus™ intègre de nombreuses innovations technologiques. À commencer par son générateur solaire de 1 000 m² et ses batteries à haute densité d'énergie, permettant de disposer à bord d'une grande quantité d'énergie tout en minimisant la masse et la surface de l'enveloppe, de jour comme de nuit. Les batteries sont rechargées le jour par le générateur solaire et auront accumulé suffisamment d'énergie dans la journée, pour alimenter en énergie le Stratobus™ pendant la nuit. Cette puissance disponible à bord lui permet d'être stationnaire de façon permanente suivant sa localisation, performance qu'il est aujourd'hui le seul à pouvoir offrir dans les plateformes à haute altitude. Il est de plus repositionnable, autonome, offre une très bonne résistance au vent grâce à un moteur alimenté en énergie par les cellules photovoltaïques, via la pile à combustible réversible. Afin de capter un maximum de flux solaire, le ballon est capable de tourner autour de son axe principal lui permettant de positionner son générateur solaire face au soleil à toute heure de la journée et en toute saison.

PHASES DE DÉVELOPPEMENT

Une phase de co-ingénierie structurante pour le projet a démarré en mai 2016 sur le site de Cannes avec Thales Alenia Space et ses partenaires. La « revue des spécifications système », revue qui consolide les spécifications, s'est déroulée en décembre 2016 et la « revue de définition préliminaire [6] », revue qui consolide la définition préliminaire du système, a eu lieu en septembre 2017, démontrant une bonne maturité technique du projet auprès des partenaires et des clients.

Le développement a été scindé en deux phases. Une phase 1 consacrée à l'étude préliminaire de la plateforme et à des démonstrations technologiques ; une phase 2 portant sur le développement de la solution système, incluant la plateforme, son segment sol et les missions.

Lors de la phase 1, les analyses et le design préliminaire ont été corrélés avec de nombreux maquettages. Ainsi plus de 3 000 démonstrations ont été réalisées et ce du composant de base et jusqu'au démonstrateur échelle réduite. Toutes les technologies ont été testées et pour beaucoup en environnement représentatif. La phase 1 a été conclue en 2020 et le consortium a conclu à la faisabilité du concept Stratobus™ avec les technologies maîtrisées. La phase 2 a été initiée en 2019 avec, dans un premier temps, une phase d'étude des missions et des concepts opérationnels.

Figure 3. Une solution disruptive à mi-chemin entre le satellite et le drone

6. Ces deux revues sont les premières étapes obligées de tout développement de systèmes chez Thales et dans l'industrie en général.

Une étape de démonstration opérationnelle est prévue de 2023 à 2025 sur la base de modèles à échelle réduite appelés MVP pour *Minimum Viable Product*. Un minimum de 3 machines de 60 m de long doivent permettre de démontrer les capacités opérationnelles de différentes charge utiles et ce pour différents pays européens. Les essais se dérouleront de 2025 à 2026 sur plusieurs sites. Une fois la démonstration dans la stratosphère acquise sur ces modèles MVP, le premier modèle de vol à l'échelle 1 intégrant les contraintes liées à la certification sera produit pour un premier vol autour de 2030. Ce calendrier prévisionnel dépend des financements qui ne sont pas complètement réunis à ce jour.

QUELQUES ÉTAPES DU DÉVELOPPEMENT

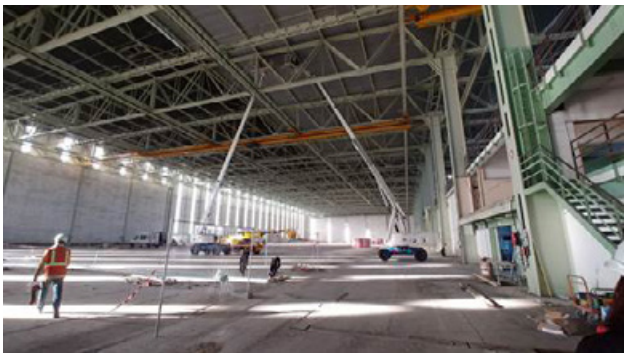


Figure 4. Bâtiment Mercure à Istres permettant d'accueillir le démonstrateur de 40 m de long

Figure 5. Outillage d'essai de la maquette gondole de 27 m de long

Figure 6. Essais en soufflerie au centre ONERA de Lille

BASE DE LANCEMENT, PRODUCTION ET DE MAINTENANCE DU STRATOBUS™

Les véhicules Stratobus™ sont assemblés et testés dans les hangars, puis équipés de leur charge utile et mis en vol. Ils reviennent sur site pour des opérations de maintenance programmées pour douze mois de vol ; puis repartent pour leur mission. Leur durée de vie est de dix ans à condition d'une grande visite à mi-vie. La production des véhicules Stratobus™ nécessite des moyens d'assemblage et d'intégration de grandes dimensions spécifiques (installation des moteurs, intégration de la nacelle, installation des panneaux solaires, mise en gaz, etc.). Les opérations au sol réalisées à l'extérieur des hangars, comme la manutention des dirigeables, leur mise en vol, ainsi que leur capture et l'atterrissage nécessitent des moyens spécifiques comme le système de capture et la station d'amarrage.

Le site industriel sur lequel l'ensemble des activités de production, de maintenance, d'exploitation et de commande et contrôle sont réalisées se nomme le « Stratoport ».

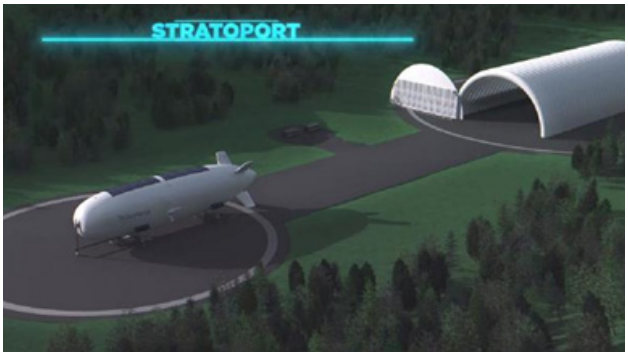


Figure 7. Vue d'artiste d'un Stratoport

Les dimensions intérieures typiques d'un hangar s'élèvent à 180 m pour la longueur sur 60 m de large avec une hauteur sous plafond de 42 m pour une surface extérieure de l'ordre de 200 m de long pour 80 m de large et une hauteur de bâtiment supérieur à 50 m. À comparer à la taille du hangar à dirigeables d'Ecausseville, dont les dimensions intérieures utiles sont de 150 m de long, 24 m de large (entre les piédroits) et 30 m de haut.

Différentes solutions peuvent être déployées avec des hangars rigides et même des hangars gonflables. Ce type de solution présente l'intérêt d'être à la fois rapide à mettre en œuvre, repliable et déplaçable en conteneurs maritimes standard. Quant aux solutions modernes de hangars traditionnels, leur robustesse n'est plus à démontrer.

Les contraintes liées à la disponibilité des hangars pour les opérations de maintenance limitent la flotte de machine à une dizaine par hangar. Ainsi, des hubs régionaux sont nécessaires afin d'opérer les Stratobus™ et pour un hub de deux hangars, une vingtaine de dirigeables peuvent être intégrés puis opérés et enfin maintenus.

LES PARTENAIRES DE STRATOBUS™

Cinq partenaires français assurent le développement de Stratobus™. La société CNIM (Construction navale industrielle de la Méditerranée) réalise la structure équipée et la nacelle charge utile, Solutions-F la propulsion électrique, CNIM Airspace, l'enveloppe équipée, Tronico-Alcen le conditionnement de l'énergie à bord. Thales Alenia Space, chef de file du projet a en charge le système, l'avionique, les générateurs solaires, la batterie et la certification de l'aéronef. Cette liste de partenaires est complétée par de forts supports comme le CEA et son partenaire industriel 2CA pour le développement et l'industrialisation des modules photovoltaïques, l'ONERA pour les performances aérodynamiques et le CNES pour son expertise dans le domaine des ballons ainsi que différents laboratoires du CNRS pour progresser sur la connaissance de l'environnement stratosphérique.

CNIM

Le groupe CNIM est un équipementier et ensemblier industriel français qui existe depuis 160 ans. Avec l'ensemble de ses filiales et des sociétés liées, il est présent dans 15 pays et regroupe 2 800 collaborateurs, ce qui lui confère une dimension internationale. Le groupe CNIM est au service des États, des collectivités locales, des grandes entreprises privées et publiques. Dans la réalisation du Stratobus™, le groupe CNIM est responsable des structures et de la nacelle en composite.

Solutions F

Solution F dispose d'un savoir-faire reconnu dans le domaine de l'automobile « avancée » pour les marchés de série et de compétition. Ce domaine et celui de l'aéronautique présentent de nombreuses similitudes comme l'expertise des matériaux, l'optimisation de la masse, les contraintes aérodynamiques et l'efficience des systèmes de propulsion. Solution F a acquis une expérience des systèmes de propulsion. Spécialiste des groupes moto propulseurs hybrides automobiles et aéronautiques, Stratobus™ est l'opportunité pour Solution F de s'impliquer dans les systèmes de propulsion électriques d'avenir et ce dans la continuité des études R&D réalisées depuis plus de 5 ans.

CNIM Airspace

CNIM Airspace déploie son savoir-faire dans les marchés du civil et de la défense. Depuis 1996, l'expertise de CNIM Airspace s'est renforcée à travers la conception et la production d'aéronefs.

Tronico-Alcen

Tronico-Alcen est spécialisée dans la conception et l'intégration de systèmes électroniques pour les équipements à forte valeur ajoutée, tout au long de leur cycle de vie. En complément de son cœur de métier d'EMS (Electronic Manufacturing Services), Tronico-Alcen se positionne en tant qu'ODM (Original Design Manufacturer) dans le développement de systèmes complexes à dominance électronique. Tronico-Alcen réalise le conditionnement de l'énergie à bord du Stratobus™.

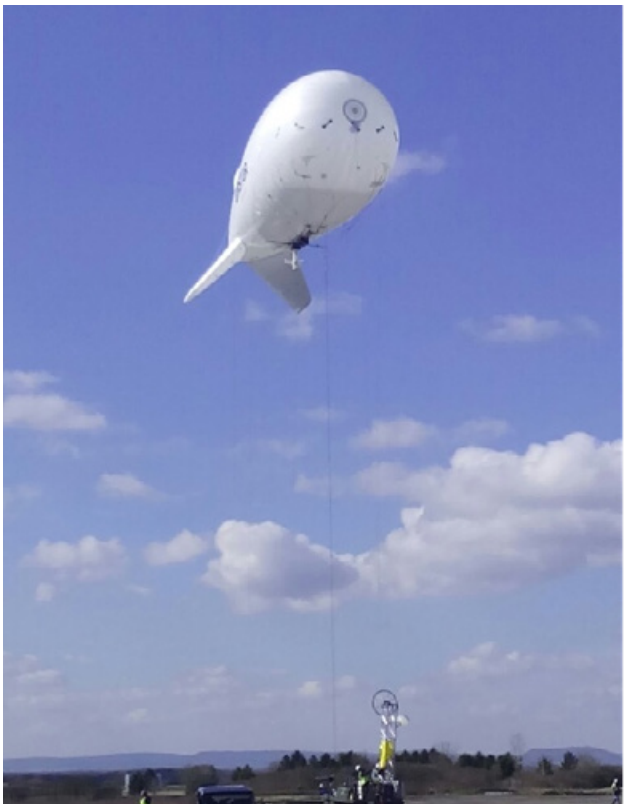
CEA-LITEN et 2CA

Les modules photovoltaïques sont développés en collaboration avec le CEA-Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) sur son campus Ines (Institut national de l'énergie solaire). Thales Alenia Space bénéficie ainsi de l'expertise incontestée en R&D, tant sur la partie développement des technologies que sur la préparation de l'industrialisation des modules. Le transfert des moyens industriels est prévu à travers une joint-venture avec 2CA, une PME auvergnate qui produit déjà des modules photovoltaïques pour des applications terrestres. ■

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : SURVEILLANCE ET MESURES

L'AÉROSTAT : UNE SOLUTION DE MESURE DE L'ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

par **Vincent Gobin**, ONERA, membre d'Alumni-ONERA



Dans le cadre du projet CERBERE (Capacité expérimentale ROEM pour ballons et aérostats légers) financé par la Direction générale de l'armement (DGA), un consortium formé d'Ineo Défense et de l'ONERA a développé un démonstrateur de mesure de l'environnement électromagnétique depuis un aérostat (ballon Eagle Owl de la société CNIM Air Space).

Une expérimentation conduite en 2019 en Bretagne a permis de tester cette solution et d'en mesurer les performances. La mesure des sources électromagnétiques sur le terrain n'est pas un besoin nouveau car elle offre des informations cruciales dans un contexte de croissance des émissions électromagnétiques, dans un spectre de plus en plus vaste. Localiser la direction d'une source et caractériser le signal apporte des informations majeures. Avec les systèmes au sol, la portée des mesures est courte en raison des obstacles (végétation, environnement urbain, horizon proche). Avec des systèmes aéroportés (drones, avions), on se dégage du sol mais les durées de mesure sont courtes. Les carac-

téristiques du ballon captif offrent une alternative précieuse car la hauteur de vol augmente significativement la distance de l'horizon et la portée des mesures. De plus un aérostat peut assurer une très longue permanence de vol avec de courtes opérations périodiques de regonflage pour pallier aux pertes lentes de gaz.

Parce que le repérage de la direction d'arrivée d'une émission est d'autant plus précise que les antennes de mesure sont écartées, une originalité de la solution technique a consisté à placer une partie des antennes de mesures sur l'enveloppe du ballon en les écartant suffisamment pour obtenir des performances sensiblement supérieures aux mesures au sol.

Avec le soutien du centre d'expertise et d'essais DGA Maîtrise de l'information et de DGA Ingénierie des projets, Ineo Défense et l'ONERA ont pu faire la démonstration des avantages d'une telle solution aéroportée. Le site d'essais, en bord de côte, offrait la possibilité de tests dans un environnement à la fois terrestre et naval et l'équipe a pu disposer ses propres sources d'émission en plus des sources présentes sur la zone pour qualifier les mesures.

Les résultats de l'étude CERBERE seront pris en compte pour orienter les futurs programmes de renseignement et de guerre électronique conduits par la DGA au profit des armées selon « https://www.defense.gouv.fr/dga/actualite/video-la-dga-fait-voler-un-aerostat-dans-le-ciel-breton » ■

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : SURVEILLANCE ET MESURES

DIRIDRONE, LE DRONE PLUS LÉGER QUE L'AIR POUR AUTOMATISER L'INSPECTION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE RTE

par **Damien Paulhiac**, ingénieur performance de vol et **Alice Clech**, responsable marketing au sein de CNIM Air Space

CNIM Air Space, industriel français concevant et fabriquant des systèmes d'aérostats, et RTE (le Réseau de transport d'électricité), gestionnaire du réseau électrique haute tension en France, collaborent depuis quatre ans sur un projet visant à développer un drone plus léger que l'air dédié à l'inspection des lignes électriques haute-tension appelé Diridrone. Il a réalisé avec succès ses premières missions d'inspection en conditions réelles, au-dessus des lignes électriques, en octobre 2020. En juillet 2021, Diridrone a effectué son 69ème vol d'essai au-dessus des lignes haute-tension de Corrèze. Retour sur les principaux enjeux du projet Diridrone.

L'INTÉRÊT DU DRONE « PLUS LÉGER QUE L'AIR »

Diridrone est un drone « plus léger que l'air », qui peut également être qualifié de « dirigeable drone ». Il associe les atouts du dirigeable à ceux des drones dits « plus lourds que l'air », qu'ils soient multi-rotor ou à voilure fixe. En effet, le drone dirigeable se présente comme un concept complémentaire aux drones plus classiques, avec comme principale valeur ajoutée sa persistance en l'air, qui tire parti de la poussée d'Archimède pour créer de la portance sans besoin énergétique. Développé par CNIM Air Space, en partenariat avec RTE pour l'inspection de ses lignes électriques, Diridrone est capable de réaliser à la fois des vols stationnaires (domaine privilégié des multi-rotors, mais avec une relativement faible autonomie), et de grande élongation (très propice aux drones à voilure fixe, mais avec une contrainte de vitesse minimale de vol). Son intérêt réside dans sa capacité à adopter une vitesse faible sur une longue durée, ce qui le rend particulièrement adapté aux mesures d'inspection. Dans cette gamme de vitesse, Diridrone présente des autonomies tout à fait significatives comme illustrées sur la figure 1.

Enfin, le dernier atout du drone dirigeable est sa taille, près de 15 mètres de long, qui le rend facilement visible des autres usagers de l'espace aérien.

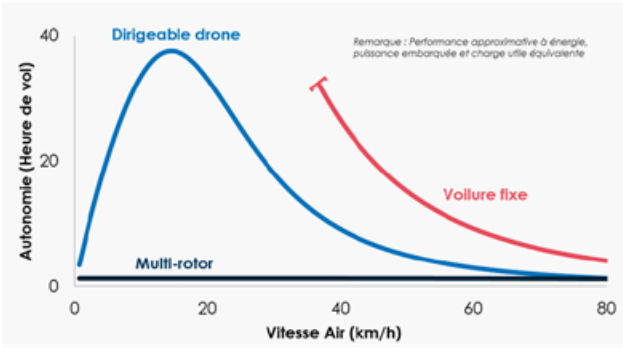


Figure 1. Comparaison de l'autonomie en vol vs vitesse (air)

LES ENJEUX DE DIRIDRONE

RTE assure une mission de service public. Son objectif est de garantir qu'à chaque instant, tous les français bénéficient d'un accès à l'électricité grâce à des infrastructures électriques fiables et solides. Aujourd'hui, RTE dispose d'une flotte d'hélicoptères, permettant la surveillance annuelle de ses 105 000 km de lignes électriques et également d'intervenir rapidement lors d'incidents sur le réseau. Diridrone est une innovation complémentaire aux moyens aéronautiques existants à RTE. Son objectif est d'automatiser la surveillance des lignes électriques. Pour cela, RTE a équipé Diridrone avec des capteurs capables de recueillir l'état des composants des lignes électriques et de modéliser leur environnement. Pour faciliter ces opérations d'inspection, Diridrone a été conçu comme un drone automatique, capable de se rendre seul d'un point A à un point B, grâce à son autopilote développé sur-mesure.

UN PROCESSUS D'INNOVATION REMARQUABLE

Développer un prototype de drone dirigeable automatique, fiable et respectant entièrement les besoins de la mission de RTE a nécessité un processus par itération qui permet en particulier d'équilibrer innovation forte et risque fort, mais aussi de préciser le besoin et le mode opératoire, dans le but d'être en capacité de fournir un produit série techniquement et économiquement pertinent pour la mission.

En phase de faisabilité, après une synthèse exhaustive de l'état de l'art, le concept d'opération du dirigeable a été travaillé autour du besoin de RTE, afin de faire apparaitre toutes les exigences techniques et non techniques du produit.

En phase de développement, la conception préliminaire du prototype est réalisée en parallèle d'une étude réglementaire, permettant d'arriver en PDR (Preliminary Design Review) avec une architecture fiable et sure, validant les principaux choix techniques et le concept d'opération du système. Dans cette phase, les travaux ont été réalisés en étroite collaboration avec la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), afin que ce drone plus léger que l'air puisse s'intégrer dans l'espace aérien en respectant les réglementations en vigueur.

La conception détaillée a pour objectif de pousser cette conception préliminaire à un niveau de détail permettant la fabrication. Au cours de cette phase, il a été nécessaire de faire des compromis pragmatiques pour mener à bien le projet, c'est-à-dire d'accepter pour le prototype certaines limitations opérationnelles par rapport à l'objectif fixé.

Après fabrication et intégration, les essais en vol, réalisés en 3 phases de complexité progressive, ont permis de qualifier les performances réelles de Diridrone, de sa charge utile et de travailler divers scénarios d'opération.

Enfin, une synthèse des performances démontrées a permis de faire apparaitre clairement les atouts et limites du prototype. Ces retours d'expérience serviront à l'industrialisation du produit.

DIRIDRONE : LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS TECHNIQUES

Diridrone est un dirigeable souple mesurant 15 mètres de long et présentant un volume de fuselage de 150 m³. Le fuselage de Diridrone intègre un ballonnet d'air, qui permet de réguler en pression l'enveloppe du dirigeable drone et de maintenir sa forme.

La propulsion de Diridrone est assurée par deux moteurs électriques latéraux de 4000 watts chacun, lui permettant d'atteindre une vitesse de plus de 50 km/h (sa vitesse de croisière, pour les besoins de RTE, est plutôt de 18 à 20 km/h). Les moteurs sont orientables dans un plan vertical. En bout de fuselage, se trouvent un propulseur de lacet et un empennage en croix avec gouvernes mobiles à commandes électriques. L'ensemble de ces actionneurs donnent

à Diridrone la possibilité de se diriger vers le haut, vers le bas, de tourner à une faible vitesse, de réaliser des décollages verticaux et des vols stationnaires.

Du fait de la densité énergétique requise, l'énergie embarquée est fournie par un générateur hybride constitué d'un moteur thermique couplé à un alternateur, connecté à un système de gestion de l'énergie. Une petite batterie assure la stabilité électrique du système et une autonomie résiduelle sans générateur. Le prototype est capable de parcourir une distance supérieure à 200 km en moyenne. Dans un développement futur, ce système d'énergie pourra suivre les progrès réalisés dans le domaine de la génération d'énergie électrique : pile à combustible, batterie haute densité, énergie solaire, etc.

Le pilotage de Diridrone peut être assuré de deux manières. Il existe tout d'abord un mode de pilotage simplifié, qui offre à un pilote de drone la capacité de facilement opérer le dirigeable. Mais Diridrone intègre surtout un autopilote, qui communique à travers le réseau 3G vers une station sol, qui peut être située à une très grande distance. Cette station sol a pour rôle de transmettre le plan de vol, défini via plusieurs points de passage, et elle permet de reprendre à distance le pilotage si nécessaire.

Enfin, en terme de charge utile, Diridrone emporte pour la mission de RTE près de 10 kg de capteurs. La masse embarquée peut être augmentée avec un compromis sur la masse de carburant et donc l'autonomie.

LE DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DYNAMIQUE INTERNE

Les essais en vol du prototype ont permis de démontrer les performances réelles de la machine, afin de vérifier les hypothèses de dimensionnement prises au début du projet, et de valider les différents modèles de performance de vol.

A partir des modèles de vol simplifiés et d'essais en vol unitaires (accélération, décélération, virage stabilisé, etc.), il est possible d'identifier les paramètres réels de Diridrone : inertie, trainée, efficacité des gouvernes, rendement de la propulsion, etc. En validant ou en corrigeant ainsi les hypothèses de dimensionnement initiales, il est possible d'extrapoler les performances de la machine dans des conditions encore non rencontrées et d'extrapoler également les performances d'une version améliorée en se basant sur un retour d'expérience réel.

Figure 2. Modèle dynamique de résolution de la dynamique de vol. La courbe orange représente les données d'essais en vol, la courbe noire le résultat de la simulation

Diridrone (crédit CNIM Air Space)

Les essais en vol ont également permis de faire une première validation sur un cas réel d'un modèle numérique de résolution de la dynamique de vol d'un aérostat, développé en interne. Ce modèle résout numériquement les équations non-linéaires de la dynamique d'un dirigeable (et d'un ballon captif), en faisant appel en particulier à un modèle d'aérodynamique instationnaire simplifié et à un modèle de gouvernes et de propulsion orientables. Les caractéristiques ajustées de Diridrone (masse, inertie, coefficients aérodynamique), les commandes des actionneurs issues des essais en vol (position de la manette des gaz, des gouvernes, orientations des moteurs, etc.) ainsi que les conditions atmosphériques (vent) sont introduites comme données d'entrée dans le modèle dynamique. La figure 2 montre un exemple de résultat réalisé sur un vol de 40 minutes. La dynamique générale de Diridrone est bien récupérée par le modèle de simulation, avec seulement quelques écarts. À ce stade de maturité, le modèle dynamique peut ainsi servir à évaluer différentes solutions d'amélioration d'actionneurs ou des commandes d'autopilote, avant de les implémenter en réel.

DIRIDRONE : VERS D'AUTRES APPLICATIONS

Les performances du Diridrone enregistrées lors des vols d'essai avec RTE sont très prometteuses. Elles ouvrent la porte à d'autres applications, qui, comme l'inspection des lignes électriques, ont besoin d'un vecteur aérien persistant et autonome. Parmi ces nouvelles applications pour Diridrone, nous pouvons par exemple citer d'autres missions d'inspection linéaire sur de longues distances, telles que l'inspection d'oléoducs, de voies ferrées, ou encore de voies navigables. Diridrone peut être également envisagé pour la surveillance de grands espaces sensibles, tels que les parcs naturels et parcs nationaux, ou encore des sites industriels étendus.

Pour plus d'information et pour nous contacter : cnim-air-space.com ■

FLYING WHALES, CONSTRUCTEUR ET OPÉRATEUR FRANÇAIS DE DIRIGEABLES POUR LE FRET

par **Thibault Proux**, Flying Whales

GENÈSE

En cette période très particulière, l'industrie aéronautique connaît une véritable mutation. La honte de prendre l'avion (« Flygskam »), associée à l'épidémie de virus Sars-Cov-2, ont mis le monde et l'industrie de l'aviation à genoux. En cette période difficile de profonde remise en question de l'utilisation des plus lourds que l'air comme moyen de transport, l'aérostation et plus particulièrement l'industrie du dirigeable doivent se placer comme l'une des alternatives les plus prometteuses. Limiter l'impact environnemental des déplacements des hommes et des marchandises, découvrir une nouvelle manière de se déplacer en profitant du voyage, réinventer la logistique de transport des marchandises à travers le monde, voilà des problématiques auxquelles le dirigeable peut répondre.

C'est le pari pris dès 2012 par la société FLYING WHALES.

Vue d'artiste du LCA60T lors d'un débardage de bois. ©FLYING WHALES

C'est en effet à cette époque que naît l'opportunité de répondre à une problématique économique et écologique par le développement d'un dirigeable cargo. Economique car la France importe massivement diverses essences de bois, alors qu'elle dispose de l'une des plus grandes forêts d'Europe ; écologique car cette ambiguïté vient du problème d'accès à cette ressource, lourde d'impacts sur l'environnement. Le secteur forestier français repose sur la coupe et l'extraction d'essences dont les accès sont partiellement en place en forêt mais sont aussi régulièrement détériorés par les passages de grumiers. Les impacts économiques et environnementaux de création et d'entretien de ces accès ne permettent tout simplement pas d'équilibrer l'équation économique et environnementale de l'exploitation forestière française.

Ainsi est née la solution « LCA60T ».

UN DIRIGEABLE POUR LE TRANSPORT DE CHARGES LOURDES

Le LCA60T, ou *Large Capacity Airship 60 tons*, en français « dirigeable de transport de charges jusqu'à 60 tonnes » est un dirigeable ayant pour vocation le transport à faible impact environnemental depuis et vers des lieux isolés, de charges volumineuses et/ou lourdes. D'une capacité de chargement de 60 tonnes en soute ou sous élingues pour les éléments les plus volumineux, le LCA60T dispose de dimensions imposantes, 200 m de long pour un diamètre de 50 m, le plaçant comme le plus grand aéronef du monde.

L'avantage principal de cet aéronef réside dans sa capacité à décoller et atterrir verticalement, mais aussi et surtout sa capacité à charger et décharger en vol stationnaire, sans nécessiter de lourdes infrastructures de transport au sol. Pour ce faire, le LCA60T dispose d'un système unique au monde de transfert de charge par ballastage développé en partenariat avec deux sociétés françaises spécialisées dans les systèmes de levage lourds et de ballastage. Ces systèmes permettent de charger et décharger de lourdes et volumineuses charges en vol stationnaire, à l'image d'un hélicoptère, à la différence que la charge utile est treuillée verticalement et sécurisée à l'intérieure d'une soute de plus de 96 m de long, 7 m de large et 5 m de haut. Dans le même temps, le système de ballastage compense cette variation de masse instantanée par l'ajout ou le retrait d'une masse équivalente de ballast. L'objectif de ces deux systèmes est de pouvoir assurer à tous moments l'équilibre et le centrage du dirigeable

lors des chargements et déchargements des charges utiles. Ainsi, cette capacité permet au LCA60T de s'affranchir de la nécessité de se poser au sol pour charger ou décharger. En ce sens, il est comparable aux hélicoptères, à la différence près que la capacité en charge utile est bien plus importante (60 tonnes contre 5 tonnes en moyenne, et jusqu'à 20 tonnes pour les hélicoptères les plus imposants et gourmands en kérosène et en euros).

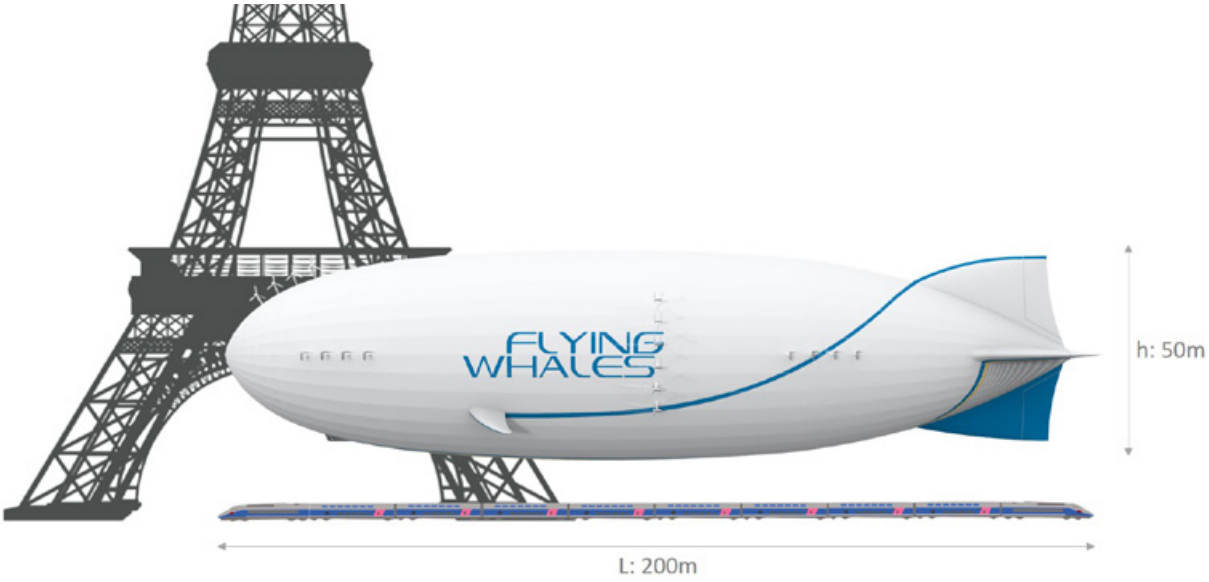
LE LCA60T, UN DIRIGEABLE À GRANDE TECHNICITÉ

Les performances de ce dirigeable représentent, à l'image de l'aventure FLYING WHALES, un véritable défi. Le plafond opérationnel est fixé à 3 000 m (10 000 ft AMSL), la vitesse à 100 km/h (54 knots) et la distance franchissable à 1 000 km (540 NM). Pour assurer de telles performances, le LCA60T est équipé d'un système propulsif unique en son genre. L'une des faiblesses des dirigeables a toujours en effet résidé dans leur faible manœuvrabilité, et le LCA60T, par son concept d'opération nécessitant le chargement et déchargement en vol stationnaire, doit assurer la tenue d'une position précise durant de longues minutes en vol stationnaire. Ainsi, le système propulsif, dit « hybride-électrique distribué », combine une génération thermique centralisée, dont l'énergie thermique est transformée en énergie électrique et distribuée sur de nombreux points de propulsion utilisant des moteurs électriques.

La combinaison de la génération thermique, largement éprouvée en aéronautique, avec la propulsion électrique est en effet innovante de par les dimensions et puissances ambitionnées. La génération thermique est ainsi assurée par plusieurs turbines quasiment identiques à celles que l'on retrouve sur les hélicoptères lourds. Cette génération d'énergie thermique est ensuite transformée en énergie électrique qui est distribuée sur 7 pods propulseurs comprenant chacun plusieurs moteurs électriques. Ces pods sont positionnés afin d'assurer une grande contrôlabilité sur tous les axes du dirigeable et dans toutes les phases de vol.

Ainsi, 4 pods comprenant chacun 4 moteurs électriques sont disposés dans le plan horizontal du dirigeable afin d'assurer une manœuvrabilité sur l'axe vertical (ainsi qu'en roulis et tangage). Ces 4 pods sont principalement utilisés pour la tenue du vol stationnaire, particulièrement lors des chargements et déchargements qui peuvent engendrer une variation temporaire de l'équilibre et du centrage du dirigeable induite par le temps nécessaire à la compensation de la perte d'équilibre par ballastage/déballastage.

Deux pods comprenant chacun 6 moteurs électriques sont positionnés dans le plan vertical transversal du dirigeable afin d'apporter la puissance axiale nécessaire au déplacement du dirigeable. Enfin, un pod constitué de 4 moteurs électriques



Vue d'artiste du LCA60T à l'échelle d'un TGV et de la Tour Eiffel ©FLYING WHALES

est positionné dans le plan vertical médian afin d'apporter une contrôlabilité en lacet.

Le LCA60T se différencie aussi des anciens grands dirigeables allemands, britanniques et américains du siècle dernier par sa structure en matériaux composite de carbone. Chaque dirigeable est en effet constitué de plusieurs dizaines de kilomètres de tubes pultrudés en carbon-composite assemblés en poutre, elles-mêmes assemblées par l'intermédiaire de pièces de jonctions afin de créer un véritable squelette de 200 m de long (soit la longueur d'un TGV) et 50 m de diamètre (soit la hauteur du premier étage de la Tour Eiffel). Une toile en un matériau spécialement développé pour ce dirigeable recouvre cette structure. Cette enveloppe assure une protection de la structure, des équipements et systèmes contre l'environnement extérieur (rayons UV, humidité, pluie, etc.). À l'intérieur de cette structure, le gaz porteur, l'hélium, est confiné dans une quinzaine de cellules indépendantes. Le LCA60T étant un dirigeable rigide à l'équilibre, il ne dispose pas d'un dispositif de ballonnets d'air comme les dirigeables souples. Les variations de pressions / températures extérieures ayant une grande influence sur l'hélium, les cellules de gaz sont à pression atmosphérique et « respirantes », c'est-à-dire qu'un volume est alloué au sein de la carène du dirigeable pour que l'hélium contenu dans les cellules puisse varier en volume selon les différentes phases de vol et les évolutions atmosphériques.

Essais en soufflerie de la maquette LCAT
©FLYING WHALES

Enfin, l'un des enjeux de ce dirigeable réside dans sa manœuvrabilité durant toutes les phases de vol et particulièrement dans les phases proche-sol (décollage, atterrissage, chargement, déchargement). Le LCA60T est pour cela équipé de divers systèmes de contrôle de vol, dont 4 monumentaux empennages, efficaces dans les phases de vol dynamique (en croisière) et d'un système propulsif distribué comme détaillé précédemment. Afin d'apporter le contrôle nécessaire au pilote, une grande attention est portée à l'interface homme-machine. Ainsi, le cockpit comprend 2 environnements distincts, l'un dédié au pilotage, l'autre au contrôle de la soute et des équipements de levage. Pour ces deux environnements, les interfaces entre les personnels de vol (pilote et officier de levage) et l'aéronef sont capitales afin d'apporter un contrôle complet de l'aéronef en toutes situations, tout en assurant une charge de travail cohérente avec les capacités humaines. Ainsi, l'organisation des affichages, des actionneurs de contrôle et des communications (air-air, air-sol) est totalement repensée et adaptée aux particularités du LCA60T.

Initié en 2012, le programme LCA60T aborde désormais sa phase de dimensionnement technique détaillé. FLYING WHALES ambitionne ainsi la mise en production du premier aéronef en 2023, pour un premier vol en 2024, une certification en 2025 et une entrée en service en 2026.

Aujourd'hui, FLYING WHALES compte dans ses rangs plus d'une centaine d'employés et plus d'une cinquantaine de partenaires techniques et financiers, travaillant d'arrache-pied pour concrétiser ce projet d'envergure internationale. ■

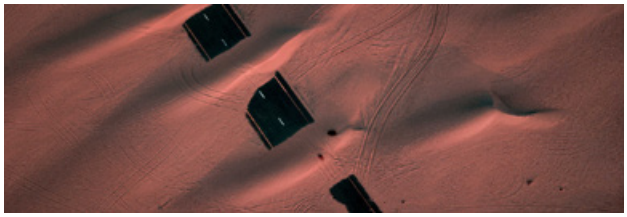
LE DIRIGEABLE HYBRIDE, UNE SOLUTION POUR LE TRANSPORT DE CHARGES LOURDES ?

par **Alain Bernard**, directeur scientifique de Voliris & concepteur de la navette NATAC

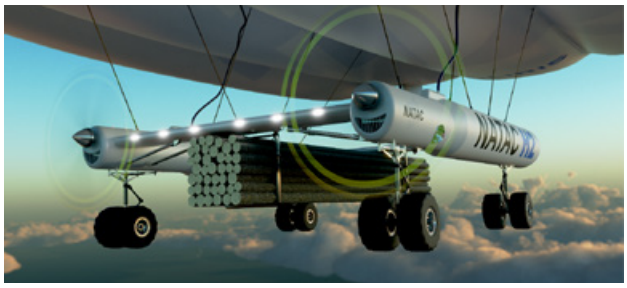
Quel avenir doit-on/peut-on envisager pour l'aéronautique ? Quelles solutions de transport imaginer pour répondre aux besoins du XXIème siècle ? Les mouvements sociétaux et la pression mise sur la décarbonation de nos transports remettent en question les moyens de transports fonctionnant avec des carburants issus de l'industrie pétrolière. Airbus l'a compris en faisant plancher ses équipes de R&D sur l'avion zéro carbone. L'horizon cependant en est assez lointain, malgré les déclarations volontaristes qui l'annoncent pour 2035. Si le transport aérien de passagers et de charges précieuses dans des aéronefs n'utilisant plus de carburants issus du pétrole semble éloigné, il n'en est pas de même pour le fret pondéreux pour lequel des solutions existent avec des dirigeables comme la navette aérienne automatique NATAC (ou Navette Aérienne de Transport Automatique de Containers) de Voliris.

On ne résoudra pas tous les problèmes avec un seul aéronef, mais, si l'on segmente le transport par catégories, on peut dès à présent expérimenter des solutions qui permettent de transporter des charges en répondant, à la fois aux impératifs de décarbonation de nos transports et aux impasses présentées par le manque d'infrastructures dans des zones géographiques difficiles d'accès. C'est cette page que nous avons décidé d'explorer avec la NATAC, une ambition raisonnable pour une étape qui pourrait avoir de l'importance, à terme, comme banc d'essai pour l'aviation à l'hydrogène.

Quels sont nos postulats de départ ? Ils sont de plusieurs ordres. Le premier c'est qu'il est plus acceptable d'expérimenter un mode de transport radicalement différent sur des petites distances, pour des charges pondéreuses et peu chères. Souvenez-vous, au dix-huitième siècle, les premiers occupants d'un vol en aérostat étaient un coq, un canard et un mouton !



Le second c'est qu'il va nous falloir développer l'habitat dans des zones peu reliées ou peu desservies. Près de 40% des terres émergées sont considérées comme inhospitalières. Or, en tant que terriens, nous sommes confrontés à une pression démographique qui va nécessiter d'héberger, à l'horizon 2050, près de dix milliards d'individus sur notre planète. Ces terres vont être soumises à l'érosion voire à la submersion des bandes côtières du fait du dérèglement climatique, lesquelles bandes côtières abritent actuellement les plus grandes densités de population. La Chine a bien compris l'enjeu qu'il y avait à repeupler l'intérieur des terres avec les grands travaux de créations de métropoles urbaines comme Chong Qing ou la désormais célèbre Wuhan. Mais tous les pays n'ont pas les moyens de la Chine en termes de construction d'infrastructures.



La partie la plus compliquée de la logistique du fret, c'est celle des derniers kilomètres. La NATAC permet de relier à bas prix des sites situés à quelques centaines de kilomètres. Elle offre aujourd'hui une

LE DIRIGEABLE HYBRIDE, UNE SOLUTION POUR LE TRANSPORT DE CHARGES LOURDES ?

solution complémentaire aux infrastructures de transport existantes, inédite et inégalée en termes de souplesse, de simplicité, d'économie, et de facilité d'application. Les coûts d'acquisition et de fonctionnement abordables du fait de ses spécifications en font une option facilement et rapidement déployable.

En effet, lors de la conception, l'équipe a voulu une facilité d'utilisation inédite dans le transport aérien et dirigée vers l'utilisateur.

Pour tenir compte des environnements dans lesquels elle sera amenée à opérer, la NATAC nécessite peu de puissance, aucune infrastructure au sol et pas d'équipage qualifié. La machine est automatique et peut être comparée à un téléphérique sans fil. Assemblée, paramétrée et testée par le représentant local du constructeur, elle est conçue pour être opérée par deux personnes dont l'une a au moins la compétence d'un chauffeur routier. Il doit savoir arrimer la charge, faire les pleins et les vérifications de 1er niveau. Un système central de météo lui indique si le vol est possible.

Elle est destinée à voler dans un couloir aérien qui lui serait réservé, entre 1000 m et 3000 m de hauteur, soit à des altitudes supérieures à celles des avions légers ou des hélicoptères, et inférieures à celles des avions de ligne. La navette NATAC se transporte facilement jusqu'à son point d'utilisation. Elle est livrée en un kit de 10 containers, apportés sur le site de décollage comme les autres containers qu'elle aura à transporter. L'un des containers contient d'ailleurs l'hélium qui servira à gonfler son enveloppe.

Du côté des caractéristiques techniques, l'équipe a opté pour un dirigeable hybride dont la portance aérodynamique varie de 15 à 65% [1] pour se passer de ballastage et favoriser la charge à l'emport. La navette NATAC n'a besoin que de 25 000 m^3 d'hélium ou d'hydrogène logés dans une aile-enveloppe pour transporter ses 30 tonnes de charge utile. Deux moteurs entrainent de grandes hélices qui permettent de voler autour de 130 km/h. La finesse de la machine est de 5,5. Sa prise au vent est diminuée par un système à géométrie variable qui évite de transporter des tonnes d'air comme dans les dirigeables à ballonnets. Elle permet de faire des allers-retours sur 500 km pour livrer des containers ISO de 40 pieds et 30 tonnes.

La machine ne nécessite aucune infrastructure au sol. Elle présente une charge au sol d'environ 1 kg/cm^2, ce qui signifie qu'elle peut se poser à tout endroit où l'homme peut marcher, sous réserve qu'il y ait assez d'espace, ce qui est généralement le cas dans un désert. Elle stationne arrimée par le nez à un mât. Elle décolle en quelques centaines de mètres d'une piste non préparée.

Comme les logisticiens savent maintenant transporter des containers dans le monde entier pour des prix très faibles, il sera possible d'installer des ponts aériens NATAC pour desservir n'importe quel site situé à moins de 500 km de l'endroit où un camion peut livrer un container.

1. Un dirigeable classique (near equilibrium) est généralement autour de 3% d'hybridation.

Dans un premier temps, la sustentation sera assurée par de l'hélium. Celui-ci pourra être avantageusement remplacé par l'hydrogène quand une motorisation adaptée sera disponible. L'enveloppe contribuera à la portance et sera aussi un élément du circuit d'utilisation de l'hydrogène liquide en lui permettant de s'évaporer sans se mélanger à l'air. La NATAC H2 pourra alors permettre d'avancer sur la courbe d'expérience de l'exploitation courante d'aéronefs utilisant l'hydrogène liquide.

Dans une époque changeante où le bien-être des jeunes générations nous intime de changer notre vision du transport, le transport de charges lourdes par dirigeable est le plus à même de remplir les objectifs d'économie, de souplesse et de frugalité. Par ailleurs, la souplesse même d'une navette comme NATAC va permettre de développer, sans frais d'infrastructure, des lieux aujourd'hui peu densément habités en permettant de pallier l'absence ou le mauvais état des routes. Rassembler les innovations douces et les partager sont le but de l'initiative « Rendre Le Désert Habitable » [2] que nous avons lancée depuis quelques mois. De la même façon que les grands travaux d'infrastructures ont contribué à modeler les paysages et les territoires de notre terre depuis le XIXe siècle, les nouveaux modes de mobilité pourraient accompagner une meilleure façon d'habiter la terre que nous lèguerons à nos enfants et nos petits-enfants.

https://voliris.com

Voliris, développe le NATAC, la première navette automatique de transport de container par dirigeable allégé. Elle est une filiale de New York Finance Innovation (NYFI), une holding industrielle familiale active dans les domaines du transport écologique, de la transition énergétique et du développement durable. Alliant Art et Innovation, NYFI promeut une approche originale de l'entreprenariat que résume son motto « Business as an Art ». Elle expose de jeunes artistes et des technologies innovantes dans sa galerie du 64 bis, avenue de New York face à la Tour Eiffel. ■

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : TOURISME

BALLOONEOS RÉINVENTE LE SURVOL DE SITE !

par **Guillaume Montejano**, BallOOneos

BallOOneos est une offre innovante de découverte d'un site par son survol selon un circuit prédéterminé. Le concept, inédit et unique au monde, repose sur une solution technique qui révolutionne l'utilisation de ballons aérostatiques en rendant leur mise en œuvre spectaculaire, simple et économe.

BallOOneos est un produit touristique ludique, événementiel, combinant respect de l'environnement, souplesse technique, sécurité et accessibilité. Il offrira au public qui embarquera dans un BallOOneos une expérience inoubliable, renforçant l'attractivité des sites équipés.

LES ATOUTS DE BALLOONEOS

Rêve et sensations fortes

Lorsque la plupart d'entre nous préparent une visite sur internet, le plus souvent nous allons repérer le lieu sur un site de cartographie puis zoomer pour voir à quoi ça ressemble, vu du ciel. Tout le monde fait ça. Parce que tout le monde voudrait avoir des ailes pour découvrir depuis le ciel, à basse altitude, sans bruit, un château, un parc, un bel endroit d'une ville ou un paysage inaccessible.

Le projet BallOOneos proposera au grand public de vivre cette expérience inoubliable, d'en faire une réalité. C'est la promesse d'émotions fortes, en sensations, en émerveillement, le tout en toute sécurité.

Valorisation de sites et diversification de l'offre touristique

Pour les exploitants de sites touristiques, c'est l'opportunité de mieux exploiter le potentiel de leur produit, de le révéler, de le valoriser ou encore d'enrichir leur offre pour franchir un nouveau seuil d'attractivité.

- La valorisation de la visite : ludique, expérience inoubliable, redécouverte sous des angles inaccessibles auparavant, etc.
- Une solution vertueuse pour l'environnement : silencieuse, sobriété énergétique (un simple moteur électrique), infrastructure temporaire, légère et sans impact sur le site.
- Sécurité totale pour le public et accessibilité aux personnes à mobilité réduite (PMR), enfants et personnes âgées
- Des coûts d'exploitation faibles.
- Grande souplesse permettant son adaptation à (presque) toutes les problématiques.

UNE SOLUTION TECHNIQUE VRAIMENT INNOVANTE

Le projet de démonstrateur est porté par trois partenaires : la société toulousaine Star Engineering, Mécamont Hydro (Lannemezan) et la société d'économie mixte ariégeoise Sava.Sem

BallOOneos a été lauréat de l'édition 2018 des appels à projets Readynov, lancés par la Région Occitanie pour encourager l'innovation et a bénéficié dans ce cadre d'un soutien de 471,277 euros. La solution BallOOneos a été dévoilée pour la première fois le 10 décembre 2019 au Campus de l'innovation touristique organisé par la Région Occitanie au Palais des congrès du Cap d'Agde.

BallOOneos est le résultat d'une interdisciplinarité inédite et gagnante entre trois partenaires :

- Star Engineering, qui depuis plus de 10 ans est un acteur incontournable de la certification relative à la fiabilité et à la sécurité des engins mobiles. Star Engineering a conçu le produit BallOOneos en rapprochant des technologies habituellement très

distinctes : l'aéronautique et le transport par câble; *http://star-engineering.fr/ballooneos/*

- Mecamont Hydro, spécialiste des remontées mécaniques a mis son savoir-faire reconnu au service d'un défi technologique : la pince inversée !
- La Sava.Sem, société d'économie mixte exploitant la quasi-totalité des remontées mécaniques d'Ariège. Elle accueillera le premier démonstrateur sur la station de ski « Ax-3-Domaines ». La Sava. Sem apporte au projet l'expertise de l'accueil et de la gestion du public.

Repenser le ballon aérostatique

La solution BallOOneos est née de la volonté de trouver des solutions de transport aérien sobres en énergie. C'est dans ce cadre que s'est imposé un nouveau regard sur le potentiel du ballon aérostatique.

Aujourd'hui, on sait le rendre totalement sûr. Restent quatre inconvénients lorsqu'on veut transporter du public : on embarque peu de gens pour une longue durée ; il faut un pilote expérimenté ; le ballon prend une trajectoire assez aléatoire (sauf s'il est totalement captif) ; enfin il faut aller chercher le ballon et ses passagers ! C'est pourquoi il est peu utilisé par les acteurs touristiques.

La rupture technologique qu'apporte la solution BallOOneos, c'est d'avoir imaginé la rencontre entre l'univers de l'aéronautique et du transport par câble : des ballons individuels ou calibrés pour soulever deux à quatre personnes se déplaceront sur un circuit en boucle, de quelques centaines de mètres, raccordés à un câble. C'est le principe de la remontée mécanique ; mais au lieu de pendre en dessous du câble, sur un télésiège ou une télécabine, le public évoluera… au-dessus du câble, plus de 30 mètres au-dessus de votre site !

C'est là aussi une première, l'usager aura la possibilité de piloter lui-même son ballon, en partie, c'est à dire de faire varier son altitude de vol entre le câble et la limite des 50 mètres au-dessus du sol. C'est le concept breveté du ballon BallOOneos.

Vers une version « BallOOneos / hydrogène vert »

Dans la version de base, les ballons utilisent de l'hélium, gaz sans danger qui reste captif du ballon pendant toute la durée de l'exploitation du circuit.

Dans les configurations les plus professionnelles, BallOOneos proposera l'utilisation de l'hydrogène, un peu plus complexe à mettre en œuvre mais renouvelable, potentiellement « vert » jusque dans sa production.

Innovation technique, simplicité, respect de l'environnement

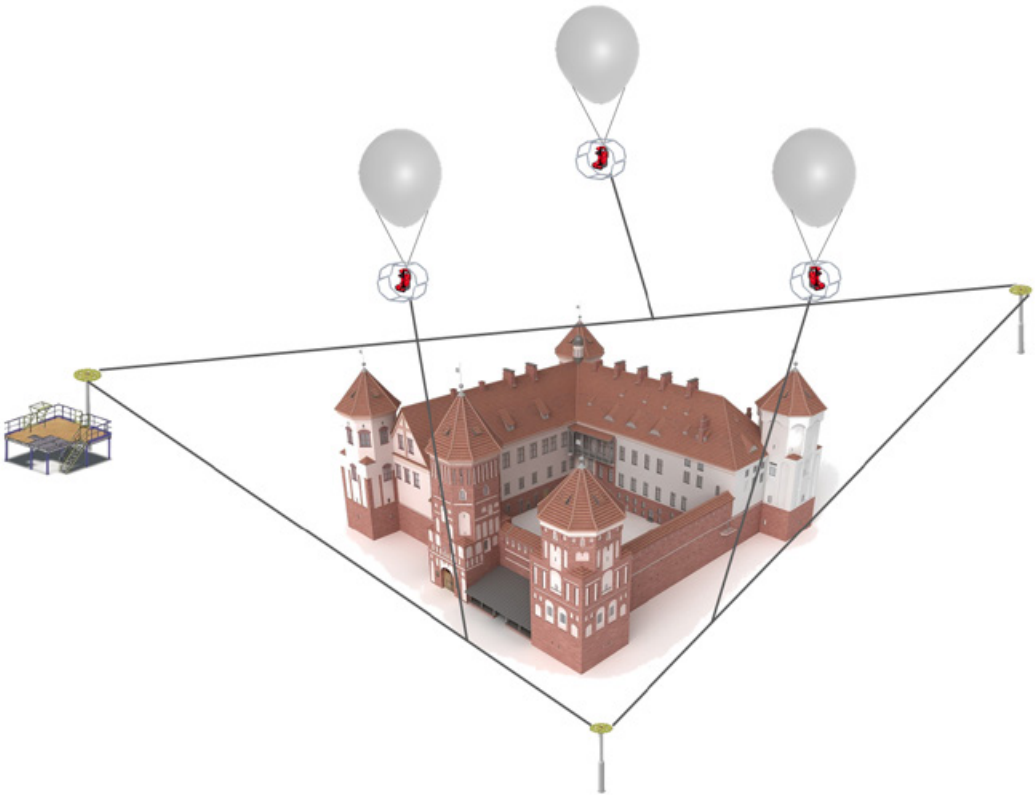
Un des principaux défis techniques de la solution BallOOneos consistait à résoudre un problème inédi : comment gérer un ballon qui tire un câble vers le haut alors que le transport par câble a toujours géré des objets - et des passagers - qui étaient suspendus au câble ?

Réponse : la pince inversée ! La pince d'une télécabine sait passer une série de pylônes tout en étant soumise à une traction vers le bas, celle exercée par le poids de la cabine. Avec BallOOneos, il s'agit de passer les pylônes avec une traction vers le haut, provoquée par le ballon aérostatique. Il n'existait pas de dispositif technique répondant à cette nouvelle contrainte. C'est donc une pièce qu'il a fallu inventer tester, mettre au point. C'est une prouesse technique réalisée par Mecamont Hydro, à partir des spécifications de Star Engineering. Elle est bien entendu brevetée.

Second sujet : comment installer des circuits temporaires, là où les téléphériques et autres remontées mécaniques implantent habituellement de lourds pylônes pour plusieurs décennies ?

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : TOURISME

BALLOONEOS RÉINVENTE LE SURVOL DE SITE !



Réponse : des pylônes légers, d'à peine trois mètres ! Juste assez haut pour être hors de portée du public, inutile de monter plus haut puisqu'on n'a rien à suspendre ! Pas de travaux lourds d'implantation au sol car la problématique de forces est très différente entre retenir des objets volants et suspendre des objets lourds.

Pour simplifier, on « pose » le pylône, on le leste plutôt que de l'enfoncer dans le sol. Donc un dispositif léger, discret, réversible, respectueux du site.

2022 : premier vol en BallOOneos dans le ciel !

Partenaire du démonstrateur BallOOneos, la Sava. Sem accueillera sur le site de sa station pyrénéenne réputée « Ax-3-Domaines » le premier démonstrateur si les conditions climatiques le permettent.

Ax-3-Domaines, station qui affiche une longue tradition d'innovation, deviendra la première station de montagne et au-delà le premier site touristique à proposer l'expérience BallOOneos !

Ce premier vol aura lieu en 2022 à Ax-Bonascre, sur le plateau du Saquet (invitation de la presse sur inscription) si les conditions climatiques le permettent, ou sur un autre site d'Occitanie selon les humeurs de la montagne si caractérielle !

Dès que le démonstrateur aura permis la validation et l'agrément du dispositif, Star Engineering pourra proposer aux clients de BallOOneos de prendre en charge l'exploitation du dispositif, notamment dans des configurations événementielles, de courte durée.

C'est un nouveau développement qui ouvre aux partenaires des nouveaux marchés, une nouvelle activité potentiellement créatrice d'emplois.

La commercialisation de BallOOneos a démarré et sera accélérée à la suite de cette démonstration en 2022.

BallOOneos a enregistré en 2021 une première lettre d'intention de commande venant du Syndicat Mixte du Combalou suite à une première étude de faisabilité effectuée par Star Engineeering pour l'implantation sur site Roquefort d'un système BallOOneos. *https://www.millavois.com/2020/02/27/roquefort-demain-et-si-des-ballons-permettaient-de-monter-sur-le-combalou/*

D'autres responsables de sites touristiques souhaitent réserver les premiers dispositifs qui seront produits à partir de 2022. ■

LE FOND PLAT, AVENIR PROMETTEUR DE L'AÉROSTATION

par **Christophe Béesau**, président Inworks, conseiller Dirisolar

UN ÉCOSYSTÈME EN MUTATION

Depuis une vingtaine d'années, les projets d'aérostats innovants se sont multipliés et leur possible retour dans les airs a fait les gros titres de la presse. Cette effervescence autour d'une idée ancienne – rappelons que le premier vol d'un dirigeable, alors mû par un moteur à vapeur [1], date de 1852 – est principalement liée aux objectifs de réduction des émissions de CO_2 issues de la consommation de kérosène.

Car le transport aérien "classique" est devenu l'un des accusés du réchauffement climatique. D'un mal à un mot, il n'y a qu'un pas et les Suédois ont ainsi forgé le néologisme *flygskam*, "la honte de voler", pour désigner la culpabilité que devrait éprouver chaque voyageur montant dans un avion.

Dans ce contexte, les propriétés des aérostats apparaissent salutaires, et ont entraîné l'écosystème de l'aéronautique dans un élan de mutation. La portance aérostatique offre en effet l'avantage de ne pas utiliser d'énergie pour se maintenir en l'air, mais seulement pour se déplacer [2]. Il en résulte donc une grande efficacité énergétique du vol, déclenchant ainsi un regain d'intérêt pour les dirigeables, ces oubliés du début du XXe siècle que la Seconde Guerre mondiale d'abord, puis les flottes commerciales d'avions de ligne des années 1950, avaient rapidement relégués au rang de "dinosaures de l'air".

1950 – 2000 : LES ANNÉES FAST IS BEAUTIFUL

Dès lors, le marché de l'aviation commerciale n'a cessé de croître avec une incroyable régularité. Le nombre de passagers annuel est multiplié par 8 entre 1950 et 1970, franchit la barre des 500 millions en 1973 et atteint 1 milliard en 1986 [3].

L'aérien progresse à une rapidité fulgurante, offrant toujours plus de confort et de vitesse. Le Concorde (qui ne cessera ses vols qu'en 2003) est le point d'orgue de ces années où le leitmotiv fast is beautiful fait figure de modernité, et où le lancement du TGV, battant record après record, permet même au transport terrestre d'y faire écho.

Le dirigeable classique et ses images en noir et blanc illustrant les livres d'histoire apparaît alors définitivement démodé. C'est oublier que l'hydrogène a été remplacé par l'hélium, gaz porteur parfaitement sûr, et qu'en dépit de ses inconvénients d'encombrement et de relative lenteur, le dirigeable présente la capacité inégalée de rester en vol beaucoup plus longtemps qu'un avion, et qui plus est pour un coût beaucoup plus faible. Les militaires ne se priveront d'ailleurs pas d'exploiter ces caractéristiques, surtout aux États-Unis où la marine utilisera de tels engins d'abord pour détecter les sous-marins allemands guettant et torpillant les Liberty Ships au début de leur traversée vers l'Europe [4], puis jusqu'au début des années 60 avec par exemple des missions de radar volant.

Mais, qu'il soit rigide ou souple (le fameux "Blimp", connu pour son usage avant tout publicitaire), le dirigeable à profil classique reste pénalisé par son instabilité à l'approche du sol. Plus encore que sa lenteur ou son encombrement, cette instabilité porte préjudice à l'appareil car elle complexifie l'atterrissage et rend l'engin particulièrement sensible aux turbulences au sol, même légères. Ainsi, un tel appareil ne peut se poser sans risque que si le vent est inférieur à 20-25 km/h, une limite faible qui restreint d'autant plus l'usage de l'appareil. Cette instabilité rend également le dirigeable classique incapable de se poser seul, une équipe au sol étant indispensable pour stabiliser l'engin et l'arrimer à un mât.

1. Équipé d'un moteur à vapeur de 3 chevaux, le dirigeable du Français Henri Giffard effectue son vol inaugural le 24 septembre 1852.

2. Certains engins sont cependant à flottabilité partielle, et dans ce cas une partie de l'énergie embarquée doit aussi être utilisée pour compléter la portance aérostatique.

3. Et 3 milliards en 2011. Source : ICAO.

4. 250 dirigeables Goodyear ont ainsi joué un rôle décisif pendant la Seconde Guerre mondiale.

Dès lors, le concept même de dirigeable est-il irrémédiablement condamné, en dépit de ses avantages indéniables, au premier rang desquels une utilisation parcimonieuse de l'énergie ?

C'est la question qu'explore Dirisolar dès 2010, en faisant le pari d'utiliser les lois de l'aérodynamique *pour maîtriser* l'effet combiné du vent et de la proximité du sol sur la stabilité de l'engin. Et cela, en s'appuyant sur un phénomène aérodynamique bien connu mais jamais exploité de façon contrôlée sur un dirigeable, l'effet Venturi.

L'EFFET VENTURI AU SECOURS DU DIRIGEABLE ?

L'effet Venturi, c'est ce phénomène aérodynamique qui permet aux voitures de Formule 1 de rester littéralement "collées" sur la piste en dépit des très hautes vitesses atteintes. C'est encore l'effet Venturi qui est utilisé tous les jours par les ouvriers du bâtiment pour projeter la peinture à l'aide de leurs pistolets pneumatiques. Et chacun de nous se trouve être un peu le *Monsieur Jourdain de l'effet Venturi*, lorsque, sans même que nous sachions comment, le bec de la pompe à essence arrête miraculeusement le remplissage de carburant avant tout débordement du réservoir.

Rappelons que du point de vue de la mécanique des fluides, l'effet Venturi correspond au phénomène par lequel, *dans le cas d'un écoulement horizontal, la réduction de la section d'écoulement entraîne l'augmentation de la vitesse du fluide et la diminution de sa pression.*

La démonstration est assez simple et s'appuie d'abord sur le principe de conservation du débit, *avant et après* la réduction de la section. Cette conservation du débit exprime que le rapport des sections est en rapport inverse des vitesses, ce qui s'écrit :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

où S_1 et V_1 sont respectivement la section et la vitesse d'écoulement avant réduction de section, et S_2 et v_2 les paramètres correspondants, *après la réduction de section.*

Or, d'après le théorème de Bernoulli, la quantité $\frac{1}{2}V^2 + \frac{p}{\rho} + gz$ se conserve le long d'une ligne de courant du fluide, p étant la pression, ρ la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur et z l'altitude du point considéré. Pour un écoulement horizontal, z est constant et l'expression de conservation de la quantité de *Bernoulli* s'écrit plus simplement :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho {V_1}^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho {V_2}^2$$

On en déduit l'expression de la différence de pression avant et après réduction de section, en fonction de la vitesse du fluide :

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho {V_2}^2 (\frac{{V_1}^2}{{V_2}^2} - 1)$$

C'est-à-dire, en remplaçant le rapport des vitesses par le rapport inverse des sections :

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho {V_2}^2 (\frac{{S_2}^2}{{S_1}^2} - 1)$$

Enfin, comme la réduction de la section implique que $S_2 < S_1$, il en découle que la différence de pression $p_2 - p_1$ est négative : on constate donc bien une dépression au niveau de la section réduite S2.

Comment tirer parti d'un tel phénomène sur un dirigeable en approche du sol ? Les appareils actuels ne sont-ils pas déjà soumis à un tel effet ?

DES PROBLÈMES DE COUPLE

Nous ne parlerons pas ici de relations humaines mais bien de physique et d'aérodynamique ! Et pour commencer, il nous faut revenir sur le profil des dirigeables classiques. Historiquement, les dirigeables présentent une *section transversale circulaire* afin d'optimiser leur traînée aérodynamique pour un volume donné de gaz porteur. Leur enveloppe, allongée de façon caractéristique dans le sens de la marche, permet de faciliter la progression en vol et leur confère cette silhouette typique que tout le monde connaît. Comme pour tout aéronef motorisé, la manœuvre d'approche du sol est effectuée en propulsant l'appareil contre le vent. En ajustant sa propre vitesse avec celle du vent, le dirigeable réduit sa vitesse horizontale par rapport au sol et commence alors sa descente.

- Dans le cas du *dirigeable à profil classique* évoqué ci-dessus, une dépression entre le sol et l'enveloppe

apparaît par effet Venturi et génère une force aérodynamique (appelée rabattance) dirigée vers le sol. Mais au fur et à mesure que l'appareil s'approche du sol apparaît en contrepartie un phénomène de compression de l'air sur l'avant de l'enveloppe, compression qui exerce alors une force opposée, dirigée vers le haut, et s'opposant à la rabattance.

- Cette force vers le haut s'exerçant d'abord sur la partie frontale de l'enveloppe, elle crée *en permanence* un couple cabreur qui modifie l'incidence et donc l'équilibre de l'appareil. Ce changement d'incidence augmente la portance de l'enveloppe face au vent, et donc tend à éloigner le dirigeable du sol, tout en réduisant aussi l'effet Venturi.

C'est donc la combinaison de ces deux phénomènes qui rend *intrinsèquement* instable l'approche au sol d'un dirigeable à profil classique. Il en découle une inévitable complexité de la manœuvre d'atterrissage et la nécessité de disposer au sol d'une équipe capable d'attraper les élingues et d'arrimer l'appareil.

Dès 2010, Dirisolar a étudié très méthodiquement ces inconvénients issus de la forme classique du dirigeable, et ceci en considérant d'abord l'objet volant aérostatique le plus simple qui existe, le ballon sphérique (voir Figure 1). Le ballon est ainsi placé dans un courant d'air horizontal près du sol. Les logiciels de CFD disponibles analysent alors très finement l'écoulement de l'air autour de ce ballon, et notamment quand il est près du sol.

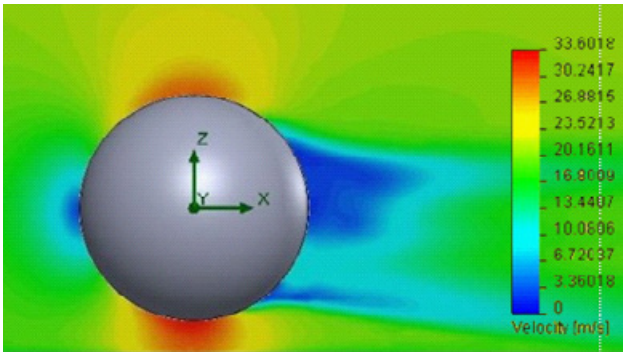


Figure 1. Section longitudinale circulaire d'un ballon sphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air

Ce sont alors les mêmes phénomènes que ceux décrits aux 1) et 2) précédents qui s'appliquent à cette sphère, c'est-à-dire un effet Venturi conjugué à une force dirigée vers le haut et s'exerçant sur sa partie frontale (c'est à dire sur la partie à gauche du graphique).

Considérons maintenant un objet à section longitudinale hémisphérique ou quasi hémisphérique (voir Figure 2), le fond de l'appareil étant constitué de la partie quasi plane de ce profil.

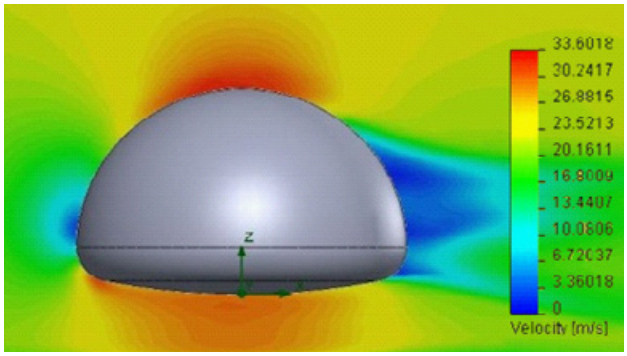


Figure 2. Section longitudinale quasi-hémisphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air

- Comme dans le cas précédent, à l'approche du sol apparaît par effet Venturi une dépression générant une force de rabattance, tirant l'appareil vers le sol.
- Mais en raison de la forme aplatie du fond, cette force croît beaucoup plus rapidement, et ceci jusqu'à atteindre 3 fois *la force de rabattance du profil standard* pour la même altitude au sol.
- Parallèlement, la forme particulière de l'avant réduit considérablement l'importance du couple cabreur, ce qui permet de contrôler l'incidence.

À l'approche au sol, on obtient donc la conjugaison d'un effet Venturi considérablement renforcé et d'un couple cabreur limité, la combinaison de ces deux effets permettant le contrôle de la manœuvre d'atterrissage.

Transposé sur la forme allongée du dirigeable, ce profil permet donc d'obtenir, à l'approche au sol, un effet du vent inverse de celui que l'on a sur un dirigeable à profil conventionnel : le vent fait descendre l'appareil doucement vers le sol, avec une incidence qui reste maîtrisée. Les effets du profil à fond plat ont été expérimentés dès 2011 sur un

dirigeable de taille réduite, le DS 0.6. Cette « proof of concept » a permis de valider d'abord physiquement les bénéfices du fond plat, avant de les explorer et d'en améliorer encore les effets à l'aide de simulations multiphysiques.

Ce principe du profil "à fond plat" est breveté en Europe et aux États-Unis par Dirisolar, et exploité sur son tout premier appareil, le DS-1500.

LE DS-1500 : DES CARACTÉRISTIQUES HORS NORMES

Des milliers de simulations multiphysiques ont permis de quantifier précisément les forces et le couple s'appliquant à un appareil à fond plat lors de l'approche au sol. De façon complémentaire, une simulation dynamique d'atterrissage incluant la prise en compte en temps réel des commandes de vol a également permis de démontrer la capacité du pilote à poser l'appareil entièrement seul, du jamais vu dans toute l'histoire des dirigeables.

Ces simulations ont aussi permis d'optimiser le profil de l'appareil pour tirer au mieux parti des propriétés du fond plat (voir Figure 3). Ainsi, des empennages spécifiques accentuent la manœuvrabilité de l'engin et améliorent encore la maîtrise en douceur de l'angle d'incidence et de l'altitude. Ainsi optimisé, l'appareil devient particulièrement simple à piloter : 4 commandes de vol seulement, alors qu'il en faut 10 pour un dirigeable conventionnel.

Le DS-1500 de Dirisolar est donc un appareil hors du commun. De par ses caractéristiques aérodynamiques, il est capable de repousser les limites d'utilisation des dirigeables classiques et de se poser, sans assistance au sol, avec des vents jusqu'à 50 km/h. Propulsé par des hélices spécifiques à bas bruit entraînées par des moteurs électriques brushless, l'appareil est ultra-silencieux, inaudible à 100 mètres. Des panneaux photovoltaïques placés sur les empennages arrière permettent la recharge des batteries embarquées et assurent un vol à l'énergie solaire, sans consommation d'énergie fossile et sans aucune émission de CO_2 ni de polluant. Enfin, les passagers bénéficient d'un confort de vol exceptionnel, placés dans un cockpit frontal leur offrant une large visibilité panoramique à plus de 180°.

Le projet a été présenté à la DGAC et à l'EASA. Au stade actuel de sa conception (TRL 6), aucun point n'a mis en cause sa faisabilité et le processus de certification de type est prêt à être engagé auprès de l'EASA. Dirisolar a d'ailleurs rejoint le groupe de travail des projets de dirigeables qui a pour objectif d'établir une spécification type de certification des dirigeables, non encore établie à ce jour.

L'AVENIR EST À LA MULTIPLICITÉ DES SOLUTIONS VOLANTES

Certaines Cassandre prévoient la fin pure et simple du transport aérien de tourisme, pour des raisons environnementales évidentes. D'autres annoncent

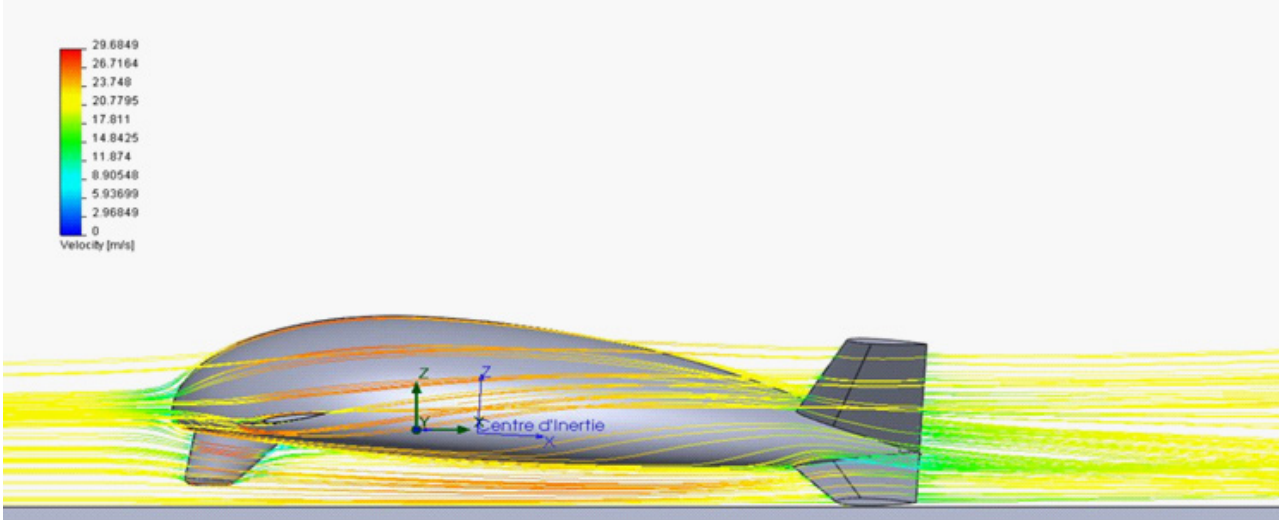


Figure 3. Calculs d'optimisation du profil de l'appareil, tirant parti du fond plat

que le coût de ce type de déplacement deviendra tellement exorbitant que l'on ne pourra s'offrir un tel voyage qu'une seule fois dans sa vie, ou bien prévoient que nous sommes à l'aube d'une désaffection massive des touristes pour l'aérien. Les ingénieurs aéronautiques, de leur côté, travaillent sans relâche au complexe développement de l'aviation commerciale à l'hydrogène, promise à l'horizon 2040.

L'avenir est plutôt à la multiplicité des solutions volantes, permettant une étroite adéquation entre l'inextinguible désir des humains de voler, l'exigence d'une rapide réduction des nuisances pour la planète et un coût de vol restant raisonnable, c'est-à-dire accessible à une famille. Car n'en déplaise aux Cassandre précitées, la demande pour l'expérience d'un aérien "propre" est encore et toujours confirmée par toutes les études de marché. Ainsi en 2020, 79% des touristes interrogés se déclaraient désireux d'une balade aérienne familiale sur le principe d'un dirigeable à énergie solaire, et 62% étaient prêts à débourser au moins 70€ par passager [5] pour y accéder.

Un appareil comme le DS-1500 a l'ambition de répondre à ce marché d'un tourisme aérien facile et économique à travers une offre de vols décarbonés permettant de découvrir (ou redécouvrir) les plus beaux sites touristiques de la planète. Sans nuisance sonore ni pollution, sans infrastructure défigurant les paysages, un DS-1500 transporte plus de 20 000 passagers par an pour un ticket à 70€ la demi-heure de vol (c'est-à-dire trois fois moins élevé qu'un vol de tourisme en hélicoptère ou en montgolfière). Et décollage et atterrissage s'effectuent depuis le même terrain, contrairement à un vol en montgolfière, offrant ainsi le confort d'improviser un vol de tourisme à la dernière minute.

Ainsi, le DS-1500 propose-t-il à tous la magie du tourisme aérien… mais libéré de tout sentiment de *flygskam* ! ■

5. Études de marché ESSEC, 2013, 2016 et 2020.

LES USAGES DE L'AÉROSTATION : TOURISME

LE GRAND BALLON CAPTIF : LE VOL EN BALLON POUR TOUS ET UN OUTIL AU SERVICE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

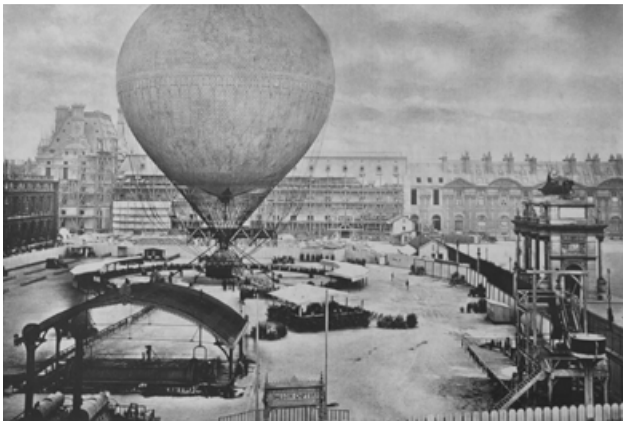
par **Matthieu Gobbi**, Aérophile

Le ballon Generali est devenu l'une des attractions emblématiques du paysage parisien. Installé depuis plus de 20 ans dans le XVe arrondissement au Parc André Citroën, il est l'un des ballons phare de la flotte Aerophile. Après plus de 10 ans de recherche en partenariat avec la Ville de Paris, le CNRS et AirParif, sur ce ballon, Aerophile propose désormais un système optionnel « qualité de l'air ». Le Grand Ballon Captif-Qualité de l'Air reste une formidable attraction touristique, mais est en plus un outil de sensibilisation à la qualité de l'air et un véritable laboratoire volant. Ce système innovant a d'ores et déjà montré son efficacité : après le Grand Ballon Captif de Paris, ce sont ceux de Cracovie et de l'Indiana qui l'ont adopté, et d'autres vont suivre !

AÉROPHILE OU LA RÉINVENTION DES BALLONS CAPTIFS

Créée par Jérôme Giacomoni et moi-même en 1993, Aerophile a renoué avec la grande tradition française des ballons captifs. Ces ballons, gonflés à l'hydrogène et actionnés par des treuils à vapeur, sont le fruit du génie d'un ingénieur et aérostier français du XIXe siècle, Henri Giffard. Après une période faste où ce type de ballons est présent dans toutes les grandes manifestations, dont les expositions universelles, ils disparaissent complètement avec la première guerre mondiale et l'essor des dirigeables et de l'aviation. La technologie et les savoir-faire qui accompagnaient cette formidable invention ont alors disparu en

même temps que les hommes et les femmes qui les détenaient.



Le ballon d'Henri Giffard en 1878 à Paris, dans la cour des Tuileries

Aerophile, c'est d'abord l'histoire d'une renaissance et une aventure dans la lignée des grandes inventions françaises. De l'invention à la réinvention, le ballon captif revit près d'un siècle après sa disparition. Plans, matériaux, procédés de fabrications modernes : il a fallu tout reconcevoir de zéro et s'adapter aux réglementations, à la fois strictes et complexes, de l'aéronautique européenne. Elles garantissent le respect des impératifs de sécurité pour tout aéronef. Sont passées au peigne fin chacune des étapes de conception, de fabrication, d'exploitation et de maintenance qui permettent de passer de quelques plans à un véritable ballon gonflé avec 6200 m^3 d'hélium à 300m de haut, pour le plus grand plaisir des 30 passagers à son bord. De Rio à Berlin, en passant par les temples d'Angkor au Cambodge, depuis la création d'Aerophile en 1993, ce sont plus de cent ballons captifs qui ont été installés à travers le monde et qui émerveillent chaque année plus d'un million de passagers.

ENTRE RECHERCHE ET ENGAGEMENT : LE BALLON AU SERVICE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Anciens élèves de l'École Polytechnique et ingénieurs de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, nous sommes toujours un peu titillés par les phénomènes scientifiques. Animés d'une éternelle passion pour les ballons, le ciel et les défis qui les entourent, nous avons commencé très tôt à nous intéresser à la qualité de l'air et aux problématiques environnementales et sanitaires majeures qui l'accompagnent. Dans un monde confronté à la pollution de l'air, neuvième cause de mortalité dans le monde, les modes de transport et l'aéronautique en particulier sont régulièrement pointés du doigt. Offrir au public les joies d'un vol, c'est toujours formidable. Quand c'est à bord d'un engin silencieux, non polluant, universellement apprécié, et au-dessus de sites grandioses, c'est encore plus magique ! Notre Grand Ballon Captif est le seul aéronef électrique homologué pour le Grand Public qui ne produit aucune émission polluante ni ne fait aucun bruit. S'élevant jusqu'à 300 mètres de haut, il est également un outil parfait de prélèvement dans la basse atmosphère.

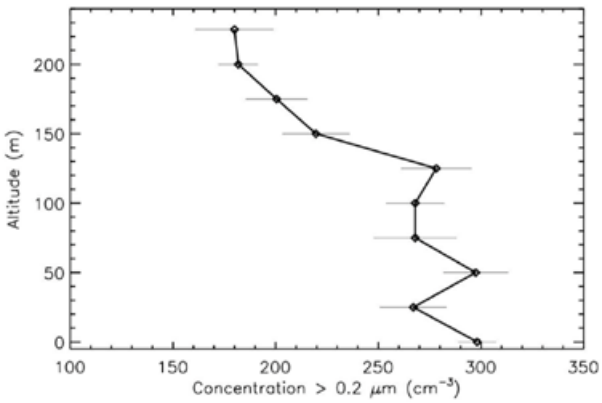
Le Grand ballon captif de Paris est installé depuis 1999 dans le parc André Citroën, XVe arrondissement. Il mesure et informe sur la qualité de l'air depuis 2008 !

Depuis l'installation du ballon Air de Paris en 2008 par Aerophile, la société a effectivement lancé un vaste programme de recherche complet afin d'utiliser le ballon comme un laboratoire volant d'analyse de l'air parisien. Le programme de recherche baptisé « Pollusphère » a permis de développer un vrai système d'analyse et d'information autour du ballon. Un système lumineux d'information dynamique sur les enveloppes de ballon captif a notamment vu le jour et a perduré avec le nouveau ballon Generali.

Cela fait maintenant plusieurs années que nous effectuons des mesures en région parisienne pour mieux comprendre les comportements des diverses familles de polluants : Particules fines PM, Ozone, Oxydes d'azote Nox. Le suivi de la qualité de l'air, et notamment du contenu en particules fines entre 0.1 et 10 µm, est fondamental en termes d'enjeux

À bord du ballon, trois instruments mesurent en continu les concentrations en ozone, en oxyde d'azote et en particules fines

sanitaires. Deux types d'effets peuvent être dégagés. Lors des pics de pollution, les effets à court terme se manifestent par des irritations, des allergies, et des problèmes respiratoires et cardiovasculaires sérieux. Une exposition prolongée, même à de faibles niveaux en particules, peut entrainer le déclenchement de pathologies chroniques et graves telles que les infarctus du myocarde, les affections respiratoires, les cancers. Les résultats du projet européen APHEKOM ont montré que la pollution particulaire pouvait engendrer 1400 décès anticipés chez les adultes, ainsi qu'une perte par habitant de 6 mois d'espérance de vie à 30 ans, lorsque la pollution en particules PM2,5 (diamètres inférieurs à 2.5 µm) était supérieure à la norme de 10 µg/m^3 de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé).



Exemple de profil vertical de concentrations en particules fines (de diamètre supérieur à 0.2 µm) mesurées avec le LOAC du Grand ballon captif de Paris le 22 janvier 2020

Nos travaux sont reconnus internationalement, avec la parution de plusieurs articles scientifiques dont, par exemple, *« Vertical Profiles of Pollution Particle Concentrations in the Boundary Layer above Paris (France) from the Optical Aerosol Counter LOAC Onboard a Touristic Balloon »* pour la revue MDPI dans la rubrique sensors pour les études menées par le LOAC sur le ballon Generali. Par ailleurs, Aerophile est lauréat d'un projet CORTEA en 2016 avec le LISA, laboratoire du CNRS à Créteil.

Les résultats des études menées ont été publiés dans diverses revues, et ont fait l'objet d'une présentation du projet MesurePOP : *« Observation of vertical and horizontal urban structures in Paris for ozone and aerosols »* auprès de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie) en Mai 2019. Enfin, l'année 2020 a été marquée par les différents confinements. Elle a été l'occasion pour nous de mener de nombreuses campagnes de mesure de la qualité de l'air à Paris et d'observer la très forte chute des

émissions de PM10 et de PM2.5 alors que l'ensemble de la capitale était confiné.

Aujourd'hui le partenariat avec la Mairie de Paris et Airparif est plus que jamais d'actualité. Aerophile continue de travailler avec différents acteurs pour améliorer les connaissances globales autour de l'air et de la pollution dans les villes. La Ville de Paris a renouvelé la concession du ballon dans le parc André Citroën pour 5 ans de 2018 à 2022, des villes chinoises et indiennes se sont montrées très intéressées par le concept. Un ballon a été installé en 2019 à Cracovie en Pologne, équipé comme le ballon de Paris de panneaux LED et de capteurs de particule. L'implication d'Aerophile lui a permis d'approfondir ses connaissances en matière de qualité de l'air, de sensibilisation des populations aux problématiques de pollution et de diversification de ses activités afin de lever de nouveaux marchés en proposant une offre toujours plus innovante. Le ballon a démontré toute son utilité dans le domaine puisqu'il permet d'embarquer les instruments de mesure adaptés à l'étude de la distribution des particules fines, partie essentielle de la pollution dans une grande métropole comme Paris. Et ce n'est que le début ! Les questions de qualité de l'air sont devenues incontournables et de nombreux progrès restent à faire, qu'il s'agisse de recherche fondamentale ou de solutions innovantes. "Aerophile" signifie en grec "qui aime l'air" : nous l'aimons pour la beauté des ascensions que nous y faisons, et nous nous battons maintenant pour qu'il soit pur !

Références

Renard, J.-B. and al ; *Impact of rain precipitation on urban atmospheric particle matter measured at three locations in France between 2013 and 2019,* Atmosphere, 2021, 12, 769. https://doi.org/10.3390/atmos12060769.

Renard, J.-B. and al ; *High Resolution Mapping of PM2.5 Concentrations in Paris (France) Using Mobile Pollutrack Sensors Network in 2020,* Atmosphere, 12, 529. 2021, https://doi.org/10.3390/atmos12050529.

Renard, J.-B. and al ; *Vertical Profiles of Pollution Particle Concentrations in the Boundary Layer above Paris (France) from the Optical Aerosol Counter LOAC Onboard a Touristic Balloon,* Sensors, 20, 1111, 2020, doi:10.3390/s20041111.

Renard, J.-B. and al ; *LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation. Atmospheric Measurement Techniques – Part 2: First results from balloon and unmanned aerial vehicle flights,* European Geosciences Union, 2016* ■

ZEPHALTO : LA CROISIÈRE AUX PORTES DE L'ESPACE

par **Kévin Mariette**, PhD, **Ilan Raphael**, PhD, **Olivier Jeanneau**, Zephalto [1]

INTRODUCTION

Dès 1783 l'humanité conquiert le ciel à bord de ballons (Lecornu, 1903). Très vite, le vol à altitude croissante devient un enjeu majeur, tant sportif que scientifique. À partir des années 1930, les capsules atteignent la stratosphère avec les vols d'Auguste Piccard ainsi que les programmes similaires Américain et Soviétique. Tout comme les vols ultérieurs durant les années 1950, pourtant précurseurs indispensables aux vols spatiaux, et les ascensions sportives plus récentes (les sauts de Baumgartner et Eustace - Leidich, 2016), ces vols habités sont des réalisations techniques rares et des exploits isolés.

Avec l'avènement récent de l'ère du tourisme spatial, s'ouvre maintenant un marché lourd de plusieurs milliards d'euros (Northern Sky Research, 2021) dans lequel la croisière sous ballon stratosphérique a un rôle à jouer. Zephalto, en France, propose une alternative plus écologique, plus contemplative et plus douce aux vols propulsés par des moteurs ou des fusées. L'entreprise développe un voyage en toute sécurité à la frontière de l'espace pour proposer des croisières exceptionnelles dans des conditions de confort inégalées. Pour ce faire, un certain nombre de défis sont à relever. L'objectif de cet article est de donner une vision globale de ces enjeux et de présenter les récentes avancées de Zephalto.

PRÉSENTATION TECHNIQUE

Profil de vol

L'expérience stratosphérique conçue par Zephalto consiste en une croisière de plusieurs heures à 25 km d'altitude. Or, si le vol habité est commun pour des altitudes allant jusqu'à 12 km grâce à l'aviation moderne, emporter des passagers dans la stratosphère reste un défi ambitieux et inédit. Par dessus tout, donner la possibilité de contempler la Terre depuis ces altitudes pendant une durée relativement longue implique l'usage d'un système stable et économe en énergie tel que le ballon à gaz. La figure 1 présente un exemple de profil de vol pour une croisière stratosphérique offerte à environ 6 passagers avec un palier de 2 heures à 25 km d'altitude. Les phases d'ascension et de descente doivent pouvoir être maîtrisées par un pilote et assistées par un système de contrôle facilitant la navigation dans les couches de l'atmosphère qui sont soumises, bien souvent, à des vents importants (Bellemare et al., 2020). Ainsi, à la différence de la majorité des ballons stratosphériques utilisés à des buts scientifiques, Zephalto prévoit de pouvoir ramener ses passagers au sol grâce à une descente douce et régulière terminée par un atterrissage, c'est à dire sans avoir à déchirer le ballon et à amortir la chute de la capsule par un parachute.

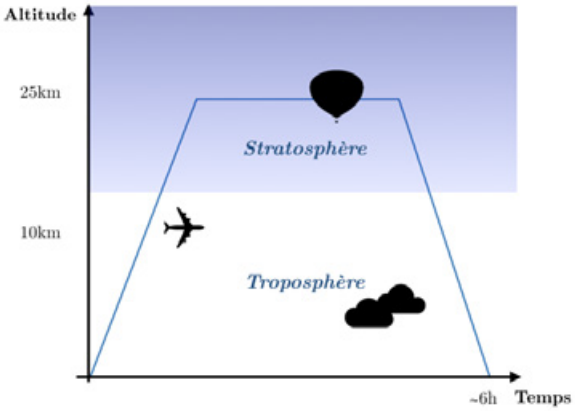


Figure 1. Profil de vol d'une croisière stratosphérique

Chaîne de vol

Les besoins de la mission type décrite plus haut seront comblés par un système innovant : la chaîne de vol Céleste. Ce système sera constitué principalement d'un ballon stratosphérique ouvert (BSO) de grande taille gonflé par un gaz plus léger que l'air (dihydrogène ou hélium), d'une chaîne d'accroche et d'une capsule habitable pressurisée. Ces spécificités sont dictées par le besoin d'emporter une masse importante (plusieurs tonnes) à très haute altitude, dans un environnement froid et à très basse pression. Les dimensions du BSO, une fois à son altitude maximale, sont comparables à celles d'un Airbus A380 comme illustré par la figure 2 ; ce qui conduit Zephalto à concevoir de nouvelles stratégies de manipulation et de contrôle de l'enveloppe et de la dynamique de vol applicable à des ballons de

1. Zephalto, Domaines des Trois Fontaines, 34230 Le Pouget

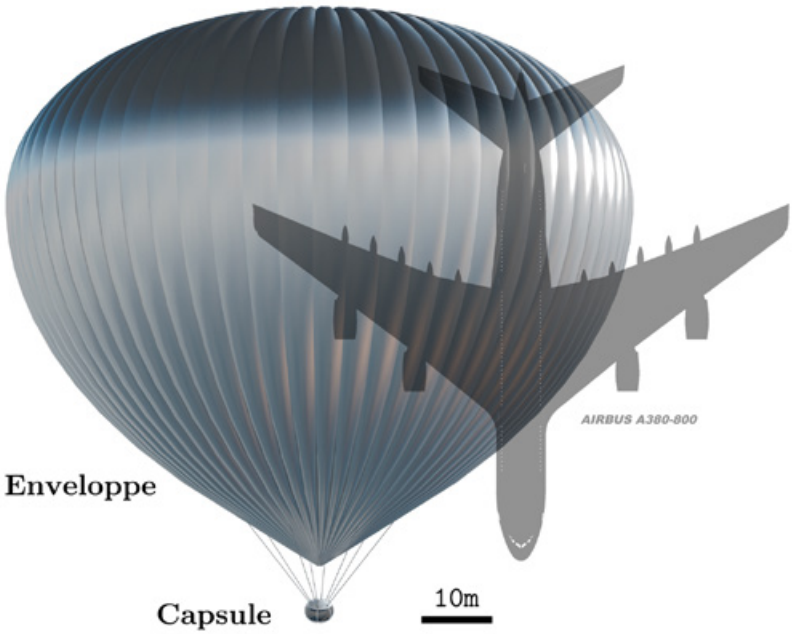


Figure 2. Comparaison des dimensions de la chaîne de vol Céleste à 25 km d'altitude avec un Airbus A380

grande taille. En addition à cette configuration, pour les besoins de certaines missions, Zephalto peut s'appuyer sur un ballon secondaire servant de régulateur d'altitude, conçu et développé en interne et pouvant compenser certaines variations de portance du BSO.

Enfin, Céleste ne saurait se passer de moyens rigoureux et fiables assurant le confort et la sécurité des passagers. Par exemple, la capsule pressurisée permettra la régulation de l'atmosphère de l'habitacle selon des standards proches du secteur aéronautique, et chaque opération de Céleste nécessitera une veille météorologique assidue et déterminante. De plus, un mode de parachutage d'urgence de la capsule sera implémenté et permettra de maintenir l'intégrité de la capsule lors d'un atterrissage d'urgence sur terre comme en mer.

UN VOL SÛR GRÂCE À UN AÉROSTAT CERTIFIÉ

Comme dans l'industrie aéronautique, le fait de transporter des passagers au cours d'une activité commerciale nécessite de garantir leur sécurité et donc de concevoir des systèmes et d'opérer les vols avec des exigences de fiabilité élevées. Une fois la démonstration faite de cette fiabilité du système, la possibilité d'opérer est conditionnée à l'obtention des certifications et laissez-passer réglementaires délivrés par les autorités aériennes compétentes (EASA et FAA principalement).

L'enjeu est de co-construire un cadre législatif dédié à l'utilisation de ballons de très grande taille pour le transport de passagers à haute altitude, et donc hors de la réglementation appliquée aux avions de lignes et aux montgolfières traditionnelles (Schoenmaker, 2014). Il faudra donc s'appuyer sur les structures de certification aéronautique et sur les normes existantes pour l'aérostation (CS31-GB, par exemple), tout en travaillant à leur extension à un nouveau domaine de vol.

Conception, fabrication et qualité

La certification d'un aéronef ou d'un aérostat pour le transport de passagers est un processus minutieux afin de garantir la sécurité en opération des passagers et des personnes au sol. Ces considérations sont essentielles dans le développement technique. Les niveaux de fiabilité attendus sont donc pris en compte dès les choix systèmes et le début de la conception. Il est donc crucial pour Zephalto de s'entourer de coopérants certifiés ou certifiables (Part 21, DOA et POA) pour les phases de conception et de production des différents sous-systèmes de la chaîne de vol.

Un personnel qualifié

Outre le matériel, le personnel (au sol et en vol) est un point clé pour garantir la sécurité des vols stratosphériques. Puisqu'il n'existe pas (encore) d'école pour former les équipes d'aéronautes (pilotes et personnels de vol) stratosphériques, il faut donc mettre en place le cursus de formation théorique et pratique, ainsi

que les outils adéquats, qui permettront de former du personnel à ces métiers. Pour les pilotes, ces cursus devront s'appuyer sur des formations au pilotage de ballons "classiques" à air chaud et à gaz, mais également sur des outils de simulation permettant de se préparer aux conditions inédites du vol stratosphérique ainsi qu'aux procédures d'urgence. Pour le personnel au sol, il faudra également le former à des tâches spécifiques permettant notamment de gonfler et récupérer des enveloppes de grande taille et d'assurer la bonne mise en place de la chaîne de vol.

STRATÉGIE DE DÉVELOPPEMENT

Construction d'un programme industriel

Zephalto n'est cependant qu'au début du développement de son projet, et une phase de production industrielle, de mise en place de partenariats et de contractualisations s'est déjà ouverte pour concrétiser l'annonce de ses premiers vols commerciaux en 2024.

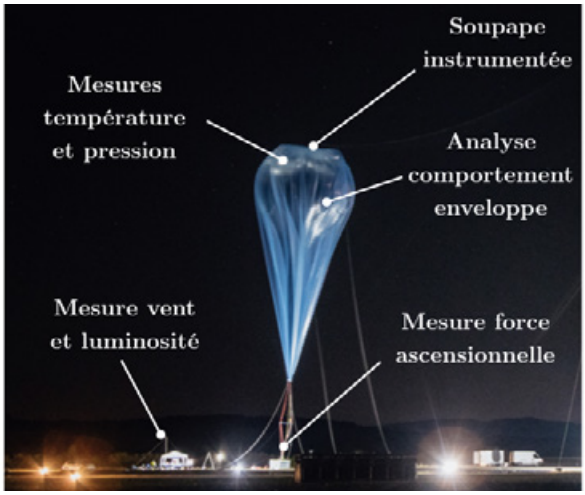


Figure 3. Essai de gonflage instrumenté sur un ballon de 8000 m³

Pour aboutir à un système fiabilisé et certifié, Zephalto élabore donc une stratégie de fabrication qui va impliquer un grand nombre d'acteurs, en particulier en Europe, pour fabriquer des enveloppes de BSO, produire des capsules pressurisées, et assurer la logistique des opérations. L'entreprise devra notamment être le maître d'œuvre de l'assemblage des parties du ballon et de la cohérence de l'ensemble avec l'expérience client qu'elle envisage de créer. Dans ce cadre, les équipes de techniciens et d'ingénieurs de Zephalto bénéficient d'un soutien du CNES, et peuvent compter sur la richesse du secteur industriel aéronautique et spatial en France et en Europe pour mener à bien ce projet.

Stratégie expérimentale

En plus de la construction du programme industriel, Zephalto mène une démarche de démonstration expérimentale. Il s'agit de former et d'entretenir des compétences en termes de mise en œuvre d'aérostats et de réaliser des essais préliminaires permettant d'affiner les choix techniques de conception et les scénarios d'opération.

Ainsi Zephalto a réalisé en 2018, 2020 et 2021 des expérimentations à grande échelle avec des essais en vol et des gonflages instrumentés au sol (voir Figure 3). Les mesures réalisées lors de ces essais servent notamment à alimenter les modèles numériques développés en interne pour simuler, prévoir et contrôler la dynamique de la chaîne de vol Céleste. À titre d'exemple, la figure 4 présente des résultats de simulations réalisées pour déterminer un périmètre d'atterrissage depuis des points d'envols probables, à partir de données météorologiques. À l'avenir, de tels outils de prévision permettront de sélectionner des zones d'atterrissages propices et sécurisées pour les opérations de Zephalto.

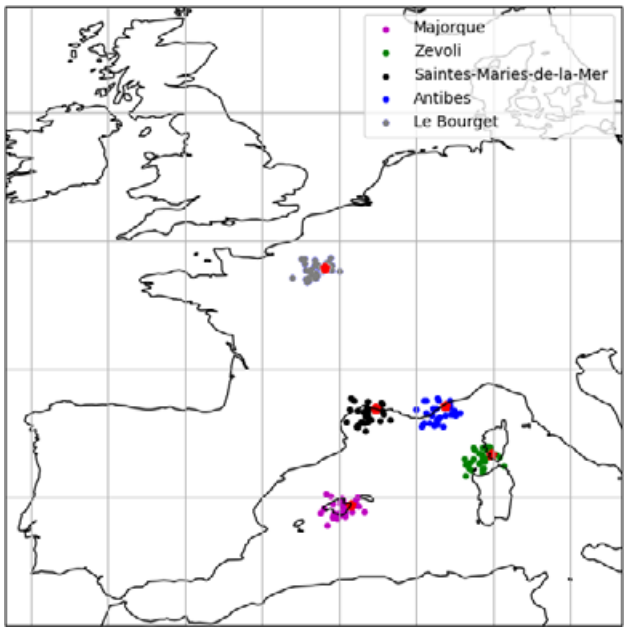


Figure 4. Simulations basées sur des données météorologiques (été 2020) de lieux d'atterrissage pour quelques lieux de décollages considérés (point rouge)

CONCLUSION

La croisière stratosphérique telle que développée par Zephalto propose une expérience unique aux portes de l'espace avec des vues imprenables sur notre planète. Pour permettre ces voyages de rêve, ce sont des défis bien réels que l'équipe relève au quotidien avec ses partenaires. Le travail sur ces problématiques techniques, logistiques et réglementaires permet de concrétiser le projet en passant d'une phase de prototypage au développement industriel. L'objectif est maintenant de participer à l'entrée de l'aérostation française dans une nouvelle ère en proposant des croisières stratosphériques à l'horizon 2024 en Europe et dans le monde.

Références

Bellemare, Marc G. 2020. *Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning.* Nature 588:77-98.

Lecornu, Joseph. 1903. *La navigation aérienne : histoire documentaire et anecdotique.*

Leidich, Jared. 2016. *The Wild Black Yonder: The Inside Story of the Secret Trip to the Edge of Space for the Highest Balloon Flight and Skydive of All Time.*

Northern Sky Research. 2021. *SPACE TOURISM AND TRAVEL MARKETS, 2ND EDITION*

Schoenmaker, Annelie. 2014. *Certification and safety aspects relating to the transport of passengers on high altitude balloons in Europe.* 1st ed. Vol. 100. *http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.03.010.* ■

AERALL, 50 ANS D'ACTION AU SERVICE DU DIRIGEABLE

par **Jean-René Fontaine**, président d'AERALL, membre 3AF

Faire renaître en France une grande industrie du dirigeable. 50 ans d'action d'AERALL. Aujourd'hui en très bonne voie. Encore des résistances à lever.

Mon premier mot sera pour féliciter les organisateurs pour l'opportunité et la qualité de ce colloque. Bienvenu car l'heure était venue de faire un point sur les évolutions favorables des technologies nécessaires à un développement crédible d'engins fiables. Qualité car en une journée a été exposé l'état d'avancement de tous les projets français. La direction des débats par l'ONERA a été de nouveau très appréciée.

AERALL (Association d'étude et de recherche sur les aéronefs allégés) envisageait de réunir un nouveau colloque pour célébrer en 2022 les 50 ans de sa fondation. Le Covid a différé tout début de préparation. Ce colloque était une étape nécessaire. Je remercie Bruno Chanetz de m'avoir invité à intervenir dans cette revue. Je souhaite résumer en quelques lignes l'objectif d'AERALL et les actions qu'elle a menées depuis sa création. L'objectif : faire renaître une véritable industrie du dirigeable capable de réaliser toute la gamme d'engins aériens complémentaires des plus lourds que l'air.

En constatant que pendant et depuis la guerre ces derniers ont bénéficié d'investissements massifs des États sur toute la chaîne de production et d'utilisation, AERALL s'est donné pour but de rechercher la reconnaissance par les pouvoirs publics de leur utilité et donc l'obtention d'un soutien public de même nature pour leur développement.

Ainsi l'association a œuvré inlassablement dans cette direction. Principalement par des colloques internationaux de 3 jours pour que se rencontrent experts technologiques, économistes du transport et responsables administratifs et politiques. Le premier en 1973 avec le parrainage de Pierre Contensou, directeur général de l'ONERA. D'autres en I979, 1983, 1994.C'est au dernier en 2004 à l'Aéroclub de France avec l'appui de la mairie de Paris que l'administration de tutelle est enfin intervenue. C'est alors et enfin que s'est ouverte une période d'intéressement progressif des pouvoirs publics pour le sujet. À partir de cette date le ministère des Transports a reconnu la complémentarité de ces engins avec les autres vecteurs pour le transport de charges lourdes et indivisibles. Il a chargé AERALL d'un rapport sur le sujet qui a débouché sur la création d'un réseau de recherche DIRISOFT animé par des chercheurs de l'ENS Cachan. Puis AERALL a participé à la création en 2007 en région PACA du pôle de compétitivité Pégase dédié à l'étude globale du sujet. Cette organisation a permis le rassemblement des connaissances et des experts et a permis de créer un diagnostic pluridisciplinaire des compétences et des besoins d'une telle industrie. Tout était prêt lorsque le gouvernement a lancé son programme d'investissements d'avenir. Avec le directeur de DIRISOFT, AERALL a présenté à l'Elysée un dossier sur le dirigeable de transport. Ecarté lors du premier programme, il a été retenu en 2013 dans la nouvelle France industrielle et confirmé depuis par le Président de la République. Ainsi depuis quelques 8 ans un soutien des pouvoirs publics est assuré pour quelques projets labellisés après étude par le pôle Pégase. Ils ont contribué aux progrès technologiques essentiels qui ont été exposés aujourd'hui. Mais je me permets d'insister : cette reconnaissance des pouvoirs publics bénéficie à tout le secteur notamment l'assistance officielle des centres de recherche en premier lieu l'ONERA, le concours du secteur de la réglementation stratégique pour la certification et la mobilisation de tous les équipementiers.

On peut maintenant espérer que le but va être atteint prochainement. Si les technologies annoncées parviennent à supprimer les vulnérabilités des engins. Mais aussi s'il n'y a pas de fautes de management conduisant à des échecs cuisants comme par le passé. Enfin si la population accueille favorablement le changement d'échelle des aéronefs : des engins de 200 sur 40 mètres circulant lentement à 1000 mètres d'altitude. Je suis confiant. Le public est charmé depuis des décennies par la féérie des envols de montgolfières de Chambley. Et puis cette année le Tour de France cycliste, l'épreuve sportive universellement télévisée n'a-t-elle pas été commentée chaque soir dans la nacelle du dirigeable VELOCLUB....

site internet : *http://www.aerall.org/*

AERALL, 50 ANS D'ACTION AU SERVICE DU DIRIGEABLE

In memoriam Pierre Balaskovic [1] († 2021)

Pierre BALASKOVIC était l'un des quatre fondateurs d'AERALL en 1971 et sa présence dans notre bureau a été d'une grande importance pour lancer notre association.

Il était à l'époque à la tête d'une importante équipe consacrée au développement du projet PEGASE dont il était le promoteur passionné. Il s'agissait de mettre au point une plateforme stratosphérique lenticulaire capable d'emporter pour une longue durée des relais de télécommunications et de télévision. Le projet était officiellement parrainé et financé par toutes les institutions de recherche et de communications. Grâce à son soutien le premier Colloque International d'AERALL a pu se réunir au PLM Saint Jacques dès 1973 et rassembler de nombreuses personnalités de la recherche ,de l'administration et même de la politique. Ce fut un grand succès dont nous pouvons lui être profondément reconnaissants.

Sa passion s'est ensuite en suite dirigée vers la mise au point de grands dirigeables de transport et ne s'est jamais découragée. L'objectif d'AERALL étant de faire renaitre une véritable industrie du dirigeable nous saluions ses efforts et sa magnifique obstination qui a permis à la collectivité française de ne cesser de penser à ce grand potentiel dont il approchait de si près la réalisation. Optimiste je pense qu'il ne lui a manqué que quelques années pour assister au positionnement dans la stratosphère tropicale du STRATOBUS de THALES et du grand dirigeable de transport de FLYING WHALES ainsi que beaucoup d'autres projets de surveillance. AERALL a le devoir de reconnaitre la grande contribution de Pierre BALASKOVIC pendant toute sa vie pour faire renaître dans un proche avenir une industrie du dirigeable. Qu'il en soit remercié.

Il a exprimé le souhait que ses abondantes archives correspondant à plus de 50 ans d'études et de réalisations soient rassemblées, classées et mises à la disposition de la collectivité. Bruno Chanetz m'a mis en contact avec Pascal Taillandier (ONERA) qui a bien voulu accepter de s'engager dans ce travail, lequel a été retardé par les contraintes de la pandémie. ■

Prototype Alizé

1.Pierre Balaskovic est le frère de l'actrice et réalisatrice française Josiane Balasko

SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !

par **Pierre Cordesse**, membre du CA d'Alumni-ONERA, membre 3AF

Diplômé de l'École Centrale de Paris, Pierre Cordesse a réalisé une thèse de doctorat au laboratoire de mathématiques appliquées de l'École polytechnique, financée par l'ONERA et le CNES, et récompensée par le prix de thèse 3AF 2020, sur la modélisation mathématique et la simulation numérique des écoulements diphasiques en chambre de combustion de moteurs fusées cryogéniques. En parallèle, il valide un MBA au Collège des Ingénieurs dans le cadre du programme Sciences & Management, ce qui lui permet d'entrer au sein d'Air Liquide Advanced Technologies à Grenoble, d'abord en tant que Project Management Officer du directeur de la Business Unit Spatiale, pour être aujourd'hui Responsable Produit des systèmes de management de gaz pour les satellites et les lanceurs. Par ailleurs, Pierre Cordesse est investi au sein de plusieurs associations : il est membre du groupe Ile-de-France et de la commission propulsion de 3AF, membre de l'association Space Generation Advisory Council et enfin cofondateur de l'association SpaceCon.

L'Espace, pour nous, a toujours été excitant et informel, insufflant enthousiasme et passion à quiconque s'y intéresse et capable de rassembler pour entreprendre des projets des plus complexes. Pourtant, la plupart des événements en lien avec le spatial auxquels nous avons participé n'ont jusqu'alors pas exactement été en phase avec l'énergie positive que libère cette passion. Très structurés, très institutionnels, très formels. Si nous sommes certains que ces événements ont toute leur place dans l'écosystème et qu'ils ont joué et jouent encore un rôle important dans le façonnement du secteur, nous pensons qu'il y a quelque chose d'autre à offrir.

Il y a plusieurs mois, nous ne savions pas ce qu'était vraiment ce "quelque chose d'autre". Avec l'avènement de la vague du #newspace apportant des entreprises incroyablement dynamiques et une accélération des innovations technologiques, mois après mois, et non plus décennie après décennie, nous sentions au fond de nous-mêmes que quelque chose devait aussi changer dans la façon de présenter l'histoire du spatial pour insuffler une dynamique toujours plus forte dans l'écosystème innovant, particulièrement en Europe.

La première fois que nous avons essayé de relever ce défi, c'était en 2019 avec l'organisation du #newspace forum à l'École polytechnique sous l'égide de la 3AF. L'objectif de cet évènement fut de mettre en relation des étudiants, doctorants, chercheurs et industriels avec des start-up de l'industrie spatiale d'initiative privée, des incubateurs et accélérateurs, des centres spatiaux étudiants et des agences spatiales gouvernementales d'Europe dans une ambiance conviviale. Ce faisant, le #newspace forum a donné lieu à de nombreux échanges techniques, des mises en relation et l'émergence de nouveaux projets de collaboration. Cet événement fut une première réponse au besoin de dynamisme en Europe. Il nous a permis d'apprendre à se connaître et l'engouement qu'a suscité cette journée nous a encouragés à aller encore plus loin.

Nous avons alors beaucoup échangé autour de certaines expériences vécues aux États-Unis, notamment lors d'un lancement de SpaceX et de la célébration de la mission Curiosity. Au cours de ces événements nous avons ressenti des émotions semblables à celles que procure un grand festival de musique ou un concert : un enthousiasme contagieux, une passion motivante pour le spatial, et une atmosphère informelle, chaleureuse et accueillante pour échanger et rencontrer d'autres passionnés de l'espace. Ces émotions, nous voulions les recréer en Europe en créant un événement dédié qui puisse incarner pleinement ces valeurs pour encourager l'innovation dans le spatial. C'est ainsi que 2019 fut le véritable point d'ancrage de SpaceCon : une nouvelle façon de se rencontrer autour d'une même passion : l'Espace !

Nous avons travaillé sans relâche sur le concept de SpaceCon pendant deux ans ; nous étions fermement convaincus que l'événement devait se dérouler en face à face et le COVID a bien sûr tenté de déjouer nos plans ! Après tant de mois de travail à distance,

SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !

à animer une équipe internationale de jeunes étudiants et professionnels bénévoles, nous n'avions envie que d'une seule chose : ressentir une émotion intense autour du spatial et y goûter pleinement. Les 19 et 24 juin 2021, nous avons enfin eu notre victoire : SpaceCon a eu lieu !

19 JUIN 2021 : #KSPACECONTEST

Des équipes participant au KSPACECONTEST en jouant sur les puissantes plateformes OMEN.

Le 19 juin, nous avons organisé la première compétition e-sport sur le jeu vidéo Kerbal Space Program, nommée #KSPACECONTEST. Vingt six joueurs venus de toute la France se sont retrouvés dans la ville de Meudon pour tenter de remplir une mission révélée le jour même du concours : construire une base lunaire, en répondant à des exigences spécifiques sur la survivabilité des Kerbals (c'est le nom donné aux personnages qui jouent le rôle des astronautes dans le jeu). Nous nous sommes associés à OMEN, qui a sponsorisé les plateformes de jeu de très haut niveau, et à une association française nommée Kerbal Space Challenge, pour mettre en place cette mission stimulante et divertissante alliant sciences et jeu dans laquelle les joueurs avaient environ 8 heures pour accomplir la mission et préparer des présentations devant un jury composé d'experts et de créateurs de contenu du secteur spatial (ESA, ArianeWorks, Venture Orbital System, @SpaceExplorerW, Real Dream, Laboratoire de mécanique des fluides de Lille). Le résultat a été formidable, de très nombreux concepts intéressants et innovants ont été proposés !

Voici un résumé vidéo de 3 minutes
https://www.youtube.com/watch?v=faJSpDjuYw8

Et ici l'album photo
https://photos.app.goo.gl/ViouJJbCrdez9VXF9

24 JUIN 2021 : SPACECONFERENCE, SPACECONCEPT, SPACECONNECT

Le 24 juin à Meudon a eu lieu le point d'orgue de l'expérience spatiale que nous planifions depuis si longtemps ! Tout a commencé par une question : "Qu'y-a-t'il dans cette boîte ?". Quelle était l'étrange matière à l'intérieur de cette boîte ? Du sucre ? Du sable ? Personne ne pouvait le savoir dans notre auditoire. Mais laisser libre court à l'imagination peut déboucher vers les plus grandes révolutions technologiques !

Qu'y a-t-il dans cette boîte ? Arnaud, Ruben et Pierre ouvrant la journée du 24 juin.

La journée était organisée en différentes parties thématiques : SpaceConference, une sélection de conférences inspirantes à la TEDx, agrémentées de tables rondes portées par des invités de renom du monde entier. Ainsi ont pu être débattus les défis et opportunités commerciales en Europe, aux États-Unis et en Chine, et les perspectives d'avenir des activités humaines sur la Lune et sur Mars. Alexandra Jercaianu, consultante chez Euroconsult et coordinatrice régionale Europe du SGAC, nous a fait l'honneur d'animer SpaceConference tout au long de la journée.

SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !

Invités d'honneur de SpaceCon – de gauche à droite, Eric Labaye Président de l'École polytechnique, Bruno Sainjon, Président de l'ONERA, Michel Assouline, Directeur général de la 3AF représentant le Président Louis Le Portz, Philippe Baptiste, Président du CNES.

Une photo du deuxième panel : ***New Space, la nouvelle ruée vers l'or ? Défis et opportunités commerciales en Europe, aux États-Unis et en Chine****, avec des invités de l'ESA, de la NASA, de Spacety, de Planet, de Leaf Space, de BLAST, d'Hemeria et animé par Victoria Carter-Cortez PwC/ SGAC.*

De longues pauses durant le cycle de conférences ont permis aux personnes de l'écosystème spatial d'échanger et de visiter les 33 stands disposés sur le parvis du Centre d'art et de culture de Meudon. Dans la lignée du #newspace forum de 2019, startups, petites et moyennes entreprises, groupes d'étudiants, associations de créateurs, laboratoires de recherche et institutions se sont réunies à SpaceCon pour se retrouver et échanger dans une ambiance décontractée et partager leur engouement au sujet du #newspace.

Fusée présentée sur le stand de Fédération Open Space Makers à SpaceConnect

En parallèle, se déroulait SpaceConcept, un concours de pitch pour les entreprises en phase de démarrage qui prévoient de bouleverser le secteur spatial. Sept équipes se sont confrontées avec pour mission de convaincre en 3 minutes un jury composé d'experts issus d'incubateurs, d'agences spatiales et de startups. En plus de confronter leurs idées à la réalité du marché, ce concours permettait aux participants de remporter des prix auprès d'incubateurs dans le but de développer leur projet. Trois lauréats ont été récompensés : Gama, représenté par Louis de Gouyon Matignon, gagnant du Pack Hardware de PARIS-SACLAY HARDWARE ACCELERATOR, Space Owl représenté par Paul Faugeras, lauréat du Pack Développement d'IncubAlliance et enfin Innovative Propulsion Laboratory, représenté par Hippolyte Mallevays, Simon Allardet & Julien Senon, nommé Coup de cœur de l'édition 2021 ! SpaceConcept s'est déroulé dans un cadre privilégié : la salle était ornée d'une fabuleuse exposition d'art sur le thème de l'espace de l'artiste Pascal Genevois.

SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !

Salle recevant SpaceConcept et les magnifiques tableaux de Pascal Genevois

La journée s'est terminée par une soirée également inscrite dans la thématique spatiale grâce à un cocktail animé par la musique électro-jazz de l'artiste Guillaume Perret, artiste qui a aidé Thomas Pesquet à jouer du saxophone sur la Station spatiale internationale.

Guillaume Perret clôturant SpaceCon

CONCLUSION

Prévoir comment un événement construit au cours de deux années va finir par se dérouler n'a rien de simple, surtout lorsqu'une pandémie internationale s'en mêle. Nous ne nous attendions pas à un tel résultat et nous sommes reconnaissants envers l'équipe incroyable de bénévoles qui a cru en ce projet et qui s'est impliquée jusqu'au bout dans une telle mission ! SpaceCon a été un succès incroyable à plusieurs points de vue.

Tout d'abord, de par sa fréquentation. Malgré le contexte sanitaire compliquant largement la planification de l'événement, avec des incertitudes majeures levées quelques jours avant le jour J, plus de 300 personnes sont venues dans la ville de Meudon pour nous rejoindre dans l'aventure SpaceCon.

Deuxièmement, le programme. L'édition 2021 de SpaceCon a proposé un programme large et inclusif, mettant en scène des experts industriels, des associations, des artistes, des créateurs de contenu et bien d'autres. Nous croyons fermement que l'aventure spatiale s'inscrit dans l'histoire de l'humanité, et que chacun peut participer à l'effort collectif pour briser les barrières technologiques actuelles.

PROCHAINES ÉTAPES

Depuis la fin de l'été, nous publions toutes les interventions sur notre chaîne YouTube et notre page LinkedIn afin de permettre à tous de revivre ce moment.

Nous préparons déjà la prochaine édition : nous voulons étendre l'expérience, faciliter l'accès à l'événement, peut-être en l'organisant dans une ville centrale de France, en impliquant davantage de personnes du monde entier, en invitant de nouvelles personnalités à rejoindre le mouvement et à vivre pleinement cette nouvelle façon de se rencontrer autour d'une même passion : l'Espace !

Vous souhaitez rejoindre l'équipe ? N'hésitez pas à nous contacter à l'adresse info@spacecon.io

VOIR TOUTES LES PHOTOS

Linkedin : *https://www.linkedin.com/company/spacecon-io*

Youtube : *https://www.youtube.com/channel/UCqpIteGhwCWemW7arNMbkeg*

Twitter : *https://twitter.com/spacecon_io* ■

SPACECON, UNE NOUVELLE FAÇON DE SE RENCONTRER AUTOUR D'UNE MÊME PASSION : L'ESPACE !

FORMATION

FICHE EUROSAE SUR L'AÉROSTATION

Découverte des concepts AED

AED 074

LES DIRIGEABLES

BUT

Cette formation est destinée aux auditeurs souhaitant mieux comprendre le fonctionnement des dirigeables, leurs performances et leurs limites actuelles.

DUREE ET EMPLOI DU TEMPS

Le stage dure 4 jours (28 heures) et comporte 16 exposés de 1h30 environ, ponctués de nombreuses illustrations ou de mises en application pratiques.

ESPRIT GENERAL

Ce stage vise à donner des connaissances générales à toutes les personnes qui peuvent être concernées par la définition, la conception ou l'utilisation des systèmes aérostatiques. (ballons, dirigeables,…)

Pendant les exposés, les présentateurs s'attacheront à mettre en évidence les phénomènes physiques spécifiques aux dirigeables en se bornant aux développements théoriques strictement nécessaires.

L'objectif est de s'approprier le socle de connaissances générales sur le domaine très particulier des dirigeables, de disposer des bons ordres de grandeur et d'acquérir les bons réflexes.

PREREQUIS ET PUBLIC VISÉ

Niveau du stage : Base
Ce stage s'adresse à des ingénieurs ou techniciens.

Des connaissances de base en aérodynamique, en mécanique et en automatique sont souhaitables (niveau bac + 3).

ANIMATEUR

Pascal TAILLANDIER
Chef de projets Dirigeables à l'ONERA

SOMMAIRE

- ***Généralités, Historique et Évolutions***
- ***Applications civiles et militaires***
- ***Concepts et Architectures de dirigeables***
- ***Spécificités***
  - ***Principe Aérostatique***
  - ***Ballastage***
  - ***Matériaux et Structures***
  - ***Manœuvres au sol***
- ***Aérodynamique du Dirigeables***
  - ***Coefficients statiques et dynamiques***
  - ***Effets instationnaires (Turbulence, Masses ajoutées,…)***
  - ***Approche expérimentale***
- ***Mécanique du Vol du dirigeable***
  - ***Présentation Générale***
  - ***Equilibre***
  - ***Stabilité***
- ***Pilotage, Guidage et Lois de commande***
- ***Conception Avant-projet et Dimensionnement***
  - ***Des Spécifications vers le dimensionnement***
  - ***Présentation des modules disciplinaires***
  - ***Masses Centrage et Inerties***
  - ***Performances sur des phases de vol simples***
- ***Applications des nouvelles technologies***
  - ***Dirigeable Hybride***
  - ***Énergies renouvelables et Gestion Énergie***
  - ***Génération électrique***
  - ***Contraintes environnementales***
- ***Réglementation, navigabilité et Certification des Dirigeables***

DATE	PRIX
à PARIS : du 22 au 25 novembre 2021	**1850 € HT (TVA 20 %)** Voir conditions générales

EUROSAE

Site web : www.eurosae.com - E-mail : inscriptions@eurosae.com- Tél. 01 41 08 01 01 - Télécopie : 01 41 08 07 77

HISTOIRE

L'ENTREPRENANT, LE PREMIER BALLON D'OBSERVATION MILITAIRE

par **Pierre Muller** et **Denis Quênot**, collectionneurs

Longtemps avant les expériences des frères Montgolfier, René Louis de Voyer, marquis d'Argenson (1694-1757), lieutenant de police de 1720 à 1724, envisageait l'utilisation des forces aériennes par les militaires et la police : *« Je suis persuadé qu'une des premières découvertes à faire, et réservée peut-être à notre siècle, c'est de trouver l'art de voler en l'air. De cette manière, les hommes voyageront vite et commodément et même on transportera les marchandises sur de grands vaisseaux volants. Il y aura des armées aériennes. Nos fortifications actuelles deviendront inutiles. La garde des trésors, l'honneur des femmes et des filles seront bien exposés, jusqu'à ce qu'on établît des maréchaussées en l'air, et coupé les ailes aux effrontés et aux bandits. Cependant, les artilleurs apprendront à tirer au vol. Il faudra dans le royaume une nouvelle charge de secrétaire d'état pour les forces aériennes. La physique doit nous conduire à cette découverte. Pourquoi n'imiterions-nous pas les oiseaux volants, comme les poissons nageants ?... (1).»*

Quelques décennies plus tard, les armées s'emparent de la fantastique nouvelle du siècle des Lumières ; l'homme a réalisé le rêve qui le taraudait depuis l'Antiquité : voler! Pourtant, le formidable chaos de la tourmente révolutionnaire, si peu encline aux idées nouvelles ou aux études scientifiques, avait failli mettre un terme aux expériences qui se succédaient jusque-là pour la conquête de l'air. Mais l'État français, isolé et attaqué de tous côtés, dut se résoudre à ne négliger aucune ressource, y compris les découvertes de la science, pour faire face à ses ennemis. C'est ainsi que le Comité de salut public créa une commission afin d'appliquer les innovations scientifiques à l'État et à la défense du territoire.

Guyton de Morveau, déjà connu pour ses tentatives de diriger les ballons, notamment celles effectuées les 25 avril et 12 juin 1784 sous l'égide de l'Académie des sciences de Dijon, propose à ses collègues que l'armée utilise des ballons captifs comme moyen d'observation des lignes ennemies. Le Comité de salut public accepte cette proposition et charge le physicien Coutelle de réaliser une première expérience aux Tuileries en utilisant la décomposition de la vapeur d'eau en oxygène et hydrogène au contact de la limaille de fer portée au rouge, le nouveau mode de fabrication de l'hydrogène que venait de décrire Lavoisier. Ce procédé permettait de fabriquer une plus grande quantité d'hydrogène que celui mis au point par Charles. Surtout, il n'utilisait pas l'acide sulfurique qui était obtenu par la combustion du soufre et du salpêtre, deux ressources précieuses qui devaient être réservées à la fabrication de la poudre. Aidé par ses amis, les physiciens Jacques Alexandre Charles et Nicolas Jacques Conté, Coutelle réussit l'expérience avec succès devant la commission. Il rejoint rapidement le général Jourdan, commandant de l'armée de Sambre-et-Meuse pour lui soumettre le projet d'utiliser des ballons captifs comme moyen d'observation. Malgré ses réticences, ce dernier presse Coutelle de rejoindre Paris et de revenir dès que possible avec le matériel nécessaire sur le terrain des opérations militaires.

Guyton de Morveau

Vernissage des ballons d'observation militaire à Meudon

De retour à Paris, Coutelle reçoit le titre de Directeur des expériences aérostatiques avec pour première mission, l'organisation de l'aérostation militaire. Le petit château de Meudon est mis à sa disposition pour préparer des ballons captifs et le matériel nécessaire à leur gonflement. Il s'entoure de Conté. Ayant perfectionné le générateur d'hydrogène, Coutelle et Conté cherchent ensuite à rendre l'enveloppe des ballons imperméable au gaz. Ils élaborent un vernis capable de garder les aérostats gonflés pendant de longues semaines.

Après plusieurs expériences de vols captifs jusqu'à 500 m de hauteur devant les membres de la commission, le Comité de salut public constitue la première compagnie d'aérostiers par un arrêté du 13 germinal de l'an II (2 avril 1794). Elle est composée d'un capitaine, Coutelle, d'un lieutenant, Delaunay, d'un sous-lieutenant, Lhomond, d'un sergent-major, de quatre sous-officiers et de vingt-six soldats.

Le 3 mai 1794, Coutelle reçoit l'ordre de rejoindre l'armée de Sambre-et-Meuse avec la première compagnie et le premier ballon militaire L'Entreprenant. Celle-ci se trouve alors à Maubeuge, reprise aux Autrichiens. Dans le récit de ses travaux, Coutelle écrit : « Peu de jours près, mes équipages étant arrivés, je pus mettre le feu à mon fourneau, et l'aérostat fut rempli dans moins de cinquante heures. Alors, deux et souvent trois fois par jour, je m'élevais, par ordre du général commandant, avec un officier de l'état-major, pour examiner les travaux de l'ennemi, ses positions et ses forces.» La première ascension a lieu dès le 2 juin 1794 (2).

Quelques jours plus tard, le général Jourdan qui veut investir la place de Charleroi, ordonne le déplacement de l'aérostat. Le transport du ballon gonflé ayant imposé de nombreux détours pour éviter les rues étroites des villages, c'est après avoir parcouru douze lieues (au lieu des cinq lieues qui séparent ces deux villes) qu'il arrive quinze heures plus tard aux environs de Charleroi. Après deux ascensions de Coutelle et du général Morlot, Charleroi capitule le 26 juin 1794. Son occupation permet au général Jourdan de prendre position à Fleurus, une commune voisine. L'armée autrichienne, conduite par le prince de Cobourg ignorant la reddition de Charleroi, vient se briser sur les positions de l'armée française qui la met en déroute. Après la bataille de Fleurus, la première compagnie d'aérostiers accompagne l'armée française dans sa marche vers le Rhin mais à Namur, L'Entreprenant est déchiré de haut en bas par un coup de vent qui le porte dans un arbre. La compagnie attend un deuxième ballon qu'elle espère utiliser pour remplacer L'Entreprenant. Il se révèle si mal construit et impropre à l'usage des observations militaires que Coutelle décide de réparer L'Entreprenant et fait construire une sorte de tente-abri pour le soustraire aux coups de vent malencontreux. Continuant sa route vers Aix-la-Chapelle, la compagnie s'arrête à Borcette où elle fait un long séjour et construit un campement fixe pour réparer et entretenir son matériel.

C'est alors que Coutelle est rappelé à Paris pour organiser une deuxième compagnie d'aérostiers, constituée par décret de la Convention, le 5 messidor an II (23 juin 1794). Celle-ci crée ensuite

Assiettes en faïence illustrant l'aérostation militaire - Époque XIXe siècle

l'École nationale aérostatique de Meudon dont Conté devient directeur par un décret du 10 brumaire an III (31 octobre 1794). La deuxième compagnie rejoint l'armée du Rhin commandée par le général Lefèbvre, qui assiège alors Mayence, et dotée de L'Intrépide, puis, en 1796, de L'Hercule.

Image d'Épinal - Gouache de Dirk Langendyk
Bataille de Fleurus

Un décret du 23 mars 1795 réorganise ensuite les deux compagnies et les porte à cinquante-cinq hommes comprenant chacune : un capitaine, respectivement Lhomond et Delaunay, deux lieutenants, Plazanet et Gancel pour la première compagnie, de Selle de Beauchamp et Merle pour la seconde, un lieutenant quartier-maître, respectivement Varlet et Deschard, un sergent-major, un sergent, un fourrier, trois caporaux, un tambour, et quarante-quatre aérostiers.

Pendant l'hiver 1795-1796, le matériel est remis en état à Frankenthal. Au printemps, la campagne recommence près de Mannheim, mais L'Entreprenant est endommagé par un soldat autrichien qui l'avait mitraillé avec son fusil. À peine réparé, la compagnie fait retraite sur Strasbourg et prend résidence dans le petit village de Molsheim, où elle demeure trois ans sans aucune activité militaire, la campagne étant terminée pour elle, jusqu'à sa dissolution en février 1799.

Les morceaux de l'enveloppe de l'Entreprenant

Aux Archives municipales de Strasbourg, deux lettres datées de 1796 relatent l'expérience aérostatique qui s'est déroulée le 14 juillet 1796 à la Plaine des Bouchers à Strasbourg. L'une d'elles est de la main de Charles Conservé, l'autre de Henri Gottfried Oberlin. Dans cette dernière, Henri Oberlin décrit à son père, le célèbre pasteur Jean Frédéric Oberlin, prêcheur et pédagogue remarquable du Siècle des Lumières, le ballon de Fleurus, la technique utilisée pour le gonfler à l'hydrogène, la perte du ballon par éclatement, la dispersion des morceaux de l'enveloppe de l'Entreprenant :

Strasbourg, ce 26 Messidor an IV
Très cher Papa,

[...] À midi, j'ai vu, avec Charles, devant la Porte des Bouchers, un ballon de 30 pieds de long sur 15 de haut, élevé et retenu, en hauteur, par des cordes. Il est destiné à l'Armée et sert de magasin de gaz ; il s'est déjà ressorti de la guerre. Il n'y a pas fort longtemps, lorsque l'armée ennemie était assez près de la nôtre, un individu ennemi a trouvé le moyen de s'en approcher et d'y décharger son fusil bien rempli de mitraille. Il a donc été rempli à nouveau à 3 lieues d'ici et mené devant la ville.

On estime la perte à 100 écus. Monsieur Herrmann, le professeur, fut présent, hier, à son remplissage avec le gaz à hydrogène et il a eu la bonté de nous en faire part, ce matin, au collège. L'appareil est constitué d'un fourneau de pierre en forme de carré oblong et traversé par 9 tuyaux de fer dont cinq en une ligne et 4 par-dessus, en croix et fouarrés (3) de limailles de fer. Au-dessus de ces tuyaux, avant le fourneau, brûle un bon feu et au-dessous encore, mais à côté, se trouve un réservoir d'eau – avec 9 tubes en verre – muni d'un robinet pour régler le débit comme on le désire. Goutte sur goutte, l'eau est conduite dans 9 tubes de fer-blanc. Alors se produit sa décomposition en oxygène et hydrogène. Le fer absorbe l'oxygène et laisse passer le second à travers 9 autres tubes de drap ou de peau vernie, je crois. Ils conduisent l'hydrogène dans un autre réservoir d'eau de chaux pour y déposer son peu de gaz carbonique.

Après, l'hydrogène est encore une fois bien nettoyé par 9 autres tuyaux à travers un autre réservoir divisé en 9 parties par des planches superposées et placées en croix. Ces planchettes ont chacune une bonne quantité de petits trous afin d'obliger l'hydrogène à se diviser en plusieurs parties pour mieux déposer, dans l'eau, son gaz hétérogène. Puis, il est conduit à l'embouchure du ballon couché à terre et qui se lève à mesure qu'il se remplit. Faute d'assez d'attention, ils ont perdu un tiers du gaz ; ils s'aperçurent alors qu'il avait une ouverture.

Le directeur de ce ballon nous confie qu'on préfère, à présent, la forme d'une ellipse égale aux deux bouts car cette forme s'approche de celle du poisson dont on essaie de reproduire le mouvement. [...]

Ce même directeur monta plusieurs fois dans le ballon de Fleurus. À 200 pieds, il ne sentit aucun changement dans sa respiration bien que l'air fut très froid.

Ce ballon de Fleurus a éclaté et péri ; Monsieur Hermann [...] et d'autres [...] en ont reçu quelques échantillons. Charles en a eu un joli morceau avec sa couture.

Le ballon était fait de taffetas enduit d'un vernis de gomme élastique « défait » dans l'éther ; c'était, je crois, pour contrer l'influence de l'air extérieur. Intérieurement, il fut enduit d'une autre espèce de vernis dont j'ai oublié la composition. [...] Henri » (4).

Le morceau de l'enveloppe du ballon reçu par Charles Conservé est aujourd'hui au Musée du Pasteur Jean Frédéric Oberlin à Waldersbach au Ban de la Roche en Alsace. Le pasteur a confectionné lui-même un étui cartonné recouvert d'un papier marbré pour protéger ce précieux témoignage des ballons d'observation militaire de la 1ère République. Sur l'enveloppe, le pasteur a écrit «Morceau du ballon de Fleurus».

Dès 1783, Oberlin s'intéressa en effet à ces machines qui s'élevaient dans les airs. En 1784, il rédigea un Rapport spirituel de ces machines pour aller en l'air, c'est dire des Ballons Aérostatiques. Le manuscrit est conservé aux Archives de la Ville de Strasbourg.

Pendant ce temps, la première compagnie commandée par Lhomond suit l'armée de Sambre-et-Meuse, assurant des missions de reconnaissance devant Worms, Mannheim, Ehrenbreisten. À la bataille de Wurtzbourg, le 3 septembre 1796, un aérostat est endommagé, la première compagnie est faite prisonnière avec tout son matériel. Les aérostiers sont libérés à la signature du traité de Leoben, le 16 avril 1797. L'Hercule est aujourd'hui conservé au musée d'histoire militaire de Vienne en Autriche. L'armée de Sambre-et-Meuse est alors commandée par le général Hoche qui refuse d'utiliser les aérostats. Il envoie un courrier au ministère de la Guerre le 30 août 1797 pour demander le licenciement de la deuxième compagnie.

NAPOLÉON ET LES AÉROSTATS

En 1798, Bonaparte entreprend l'expédition d'Égypte, emmenant avec lui une compagnie d'aérostiers commandée par Conté, laquelle regroupait des hommes issus des premières compagnies formées par Coutelle. Ils embarquent sur Le Patriote et L'Orient. Le premier fait malheureusement naufrage dans le port d'Alexandrie, l'autre est coulé par les Anglais à Aboukir. La compagnie ayant perdu tout son matériel, les hommes sont réaffectés à des tâches techniques et scientifiques au sein de l'armée napoléonienne. Bonaparte doit se contenter de donner au Caire une fête à l'occasion du 9 vendémiaire, septième anniversaire de la République française. Pour impressionner les Égyptiens, on fait s'élever dans le ciel du Caire une montgolfière de 15 m de diamètre aux couleurs de la France. Le public ne lève pas les yeux pour observer

la machine volante et reste impassible face aux spectacles illustrant les arts et les sciences organisés par Monge et Berthollet comme démonstration de la supériorité de la France.

Projet utopique de Napoléon pour envahir l'Angleterre
Miniature sur ivoire signée Sarah Cotes

Par décret du 18 février 1799 (28 pluviôse an VII), les compagnies d'aérostiers sont dissoutes. À son retour d'Égypte en octobre 1799, Bonaparte licencie les aérostiers militaires et deux ans plus tard ferme l'École nationale d'aérostatique de Meudon. En 1802, le matériel des deux compagnies est vendu aux enchères. L'acquéreur du matériel de L'Entreprenant, le physicien flamand Robertson, accompagné de son compatriote Lhoëst, entreprend des ascensions scientifiques pour observer les phénomènes météorologiques, le magnétisme terrestre et l'électricité.

Napoléon ne croit plus à l'intérêt stratégique des aérostats militaires. Si l'armée française, la seule à en être pourvue, avait su tirer parti de son avantage, la construction des aérostats n'étant plus un secret, toutes les armées avaient la possibilité d'en construire, … et aucune ne le fit.

Cependant Napoléon ayant le dessein d'envahir l'Angleterre, Lhomond, ancien commandant de la première compagnie d'aérostier, imagina d'y parvenir non par la mer mais par les airs, à l'aide d'une flottille de ballons.

Un rapport de Monge, conservé à l'École polytechnique, eut raison de ce projet qui excita néanmoins l'imagination populaire. En témoigne le projet de l'avocat Jean-Charles Thilorier, d'un ballon géant portant son nom, pouvant transporter trente mille hommes. La rumeur en parvient outre-Manche. Elle est si forte qu'elle se transforme en conviction inébranlable. Pamphlets, gravures, miniatures ainsi que diverses représentations et descriptions détaillées se répandent dans l'île.

Références

1. «Mémoires du Marquis d'Argenson», in-12, t. V, p. 390, dans J. Lecornu, La Navigation aérienne – Histoire documentaire et anecdotique, Paris, Librairie Nony & Cie, 1903, p. 32. Cet extrait est commenté par ces quelques lignes : «Il y a quelque temps, on prêtait plaisamment à M. Lépine, le créateur des agents cyclistes et des agents plongeurs, l'idée d'instituer un corps d'agents aéronautes : on voit que notre Préfet de Police n'aurait pas la priorité de l'idée, dont l'honneur, si elle est réalisée, devra, en toute justice, être reporté au marquis d'Argenson, lieutenant de Police en 1720.» –
2. Coutelle a laissé le récit de ses travaux et de ses campagnes. On en trouve de longs extraits dans Arthur Mangin, La Navigation aérienne, Tours, A. Mame, 1855, pp.102-113, et dans Fulgence Marion, Les Ballons et les voyages aériens, Paris, Librairie Hachette, 1867, pp. 305-313. –
3. Mot patois qui signifie «fourrer». –
4. «Lo Tambourier», Bulletin de liaison du Musée Oberlin de Waldersbach, mai 2007, transcription de la lettre conservée aux Archives municipales de Strasbourg. ■

HISTOIRE

EXPOSITION ALBERT CAQUOT ET L'AÉROSTATION MILITAIRE À MEUDON

par **Bruno Chanetz, Marie-Claire Coët, Claire Fauveau-Laville, Jean-Bruno Kerisel, Jean Molveau, Pierre Muller, Denis Quenôt** et **Philippe Tixier**, membres du comité scientifique et d'organisation de l'exposition

Inauguration de l'exposition le 3 septembre à 18 h 30 (de g. à d. Olivier Mousson, président de la SEIN [1], Jean-Bruno Kerisel, petit-fils d'Albert Caquot, Bruno Chanetz, Denis Larghero, Maire de Meudon et le général Julien Sabéné, directeur du CESA [2], Michel Scheller, président d'honneur de la 3AF était également présent bien qu'absent sur la photo)

NAISSANCE DE L'AÉROSTATION MILITAIRE (1793–1794)

« La République n'a pas besoin de savants, ni de chimiste ». En dépit de cette sentence bien connue, attribuée au président du tribunal révolutionnaire qui condamna à mort Lavoisier le 8 mai 1794, la Première République créa en 1793 une commission où siégeaient, entre autres, Carnot, Chaptal, Berthollet, Fourcroy, Monge, Guyton de Morveau, en vue d'appliquer à la défense du territoire, les innovations scientifiques.

Dès juillet 1793, Guyton de Morveau proposa l'emploi de ballons captifs comme moyen d'observation militaire et lança un programme de recherche pour trouver un procédé industriel de fabrication de l'hydrogène à partir de la récente description par ce même Lavoisier de la décomposition de la vapeur d'eau. Ce procédé alternatif à la production d'hydrogène au moyen du fer et de l'acide sulfurique, visait à économiser cet acide, appelé à l'époque « vitriol fumant », afin de le réserver pour la fabrication de la poudre. Pour rendre imperméable au gaz l'enveloppe des ballons, est mis au point un vernis, permettant de garder les aérostats gonflés durant plusieurs semaines.

Le Comité de Salut Public nomme le physicien Jean Marie Joseph Coutelle (1748–1835) directeur des expériences aérostatiques avec la mission d'organiser l'aérostation militaire. Le château de Meudon est mis à sa disposition. Le 2 avril 1794, le Comité de salut public crée la première compagnie d'aérostiers. Le décret du 31 octobre 1794 nomme Nicolas Jacques Conté (1755–1805) directeur de l'École nationale aérostatique de Meudon.

1. SEIN : société d'encouragement pour l'industrie nationale
2. CESA : centre d'études stratégiques aérospatiales

LES BALLONS DE LA PREMIÈRE RÉPUBLIQUE (1794-1796)

En mai-juin 1794, Coutelle rejoint avec sa compagnie l'armée de Sambre et Meuse, commandée par le général Jourdan, et contribue à la victoire de Fleurus grâce au ballon *L'Entreprenant*. De retour à Paris, Coutelle organise la deuxième compagnie d'aérostiers créée par le décret du 23 juin 1794, dotée de deux ballons : *L'Hercule et L'Intrépide,* elle rejoint l'Armée du Rhin. Le 3 septembre 1796, le ballon *L'Hercule* est endommagé lors de sa retraite précipitée devant Würzburg ; la compagnie avec son matériel est faite prisonnière. Les aérostiers seront libérés par le traité de Loeben, L'Hercule est toujours conservé à l'arsenal de Vienne en Autriche. D'autres ballons captifs seront mis en chantier et construits au château de Meudon : *Le Martial, L'Émule, L'Industrieux, Le Précurseur, Le Svelte, Le Vétéran et L'Aigle.*

CHARLES RENARD, GÉANT DE L'AÉRONAUTIQUE (1847-1905)

Charles Renard naît le 23 novembre 1847 à Damblain, dans les Vosges. En 1868, à sa sortie de l'École polytechnique, il intègre l'École d'application de l'artillerie et du génie de Metz. Lieutenant du Génie pendant la guerre de 1870, il commande une section du 15e corps d'armée sur la Loire, avant de rejoindre l'armée de l'Est pour la défense de Besançon. En 1871, après la défaite, il est muté au 3e régiment du Génie d'Arras, Son jeune frère Paul, de 7 ans son cadet, aussi élève à l'X, lui fait parvenir des résumés d'ouvrages scientifiques, dont la lecture amplifie son intérêt pour le vol humain.

En 1873 Il fabrique, à titre personnel, un petit planeur de 8 kg, le parachute dirigeable ou *Aéride*, l'objectif étant de lancer des messages depuis un ballon (on lâche le petit planeur avec des messages depuis le ballon ; cet objet est conservé au musée de l'Air et de l'Espace du Bourget). Promu capitaine, Charles Renard est muté à Belfort pour des travaux de fortification.

En 1877 est créé à Meudon *l'Établissement central de l'aérostation militaire,* sous la direction de Charles Renard. Il s'entoure des meilleurs spécialistes, le lieutenant Arthur Krebs, lui aussi grand inventeur, puis plus tard son frère Paul. Ayant constaté l'emploi de 425 câbles de diamètres différents pour la construction et l'arrimage des ballons, Renard invente une série mathématique pour réduire leur nombre à 17, devenue la série de Renard. Albert Caquot s'inspirant de cette invention qu'il découvrira à Meudon, jettera la base de la normalisation industrielle.

En 1879, les ascensions débutent en juin, avec un ballon sphérique captif depuis un premier parc sur un plateau au sud de Meudon. En 1880 Il récupère un pavillon métallique conçu par Henri de Dion pour l'exposition universelle de 1878, en augmente la hauteur pour les ballons, et y ajoute des appentis latéraux : ce sera le Hangar Y.

À Chalais-Meudon, Charles Renard supervise l'élaboration d'un matériel d'aérostation (ballons, treuils, etc.) qui démontre ses qualités au cours des campagnes du Tonkin (1884), de Madagascar (1895), de Chine (1900) et du Maroc (1909).

Parallèlement, il entreprend la construction du dirigeable La France d'une longueur de 50,4 m et d'un diamètre maximal de 8,4 m. La nacelle a une longueur de 33 m. Une hélice tractrice de 7 m de diamètre est montée à l'avant et un gouvernail est installé à l'arrière. Krebs conçoit le moteur (12 ch ; masse 98 kg). L'aéronef est équipé de piles « légères » (320 kg) au chlore et au chrome, spécifiquement conçues pour l'opération. Le 9 août 1884 vers 16 heures, La France s'élève à environ 300 m au-dessus du Hangar Y avec à son bord Renard et Krebs, direction Villacoublay. Vingt-trois minutes plus tard, ayant parcouru 7,6 km, La France revient à Chalais-Meudon. C'est le premier vol piloté de l'histoire avec retour au point de départ.

En 1886, l'Académie des sciences attribue le prix Ponti à Charles Renard et Arthur Krebs. En 1889, Charles Renard est promu lieutenant-colonel et participe à l'organisation du premier congrès international d'aéronautique à Paris, dont il est le vice-président.

En 1900, il est nommé colonel et fait partie du comité de l'Exposition universelle à Paris. Il réalise une autre première mondiale avec le vol d'un hélicoptère. De brefs soulèvements sont obtenus avec un dispositif expérimental, muni de deux rotors de 2,5 m de diamètre en tandem, les deux pales de chaque

rotor étant articulées. Le moteur est un bicylindre Anzani de 3 ch. Cette relique fait également partie des collections du Musée de l'air et de l'espace.

Charles Renard meurt le 13 avril 1905 à Meudon. Un journaliste du Moniteur universel écrira ces lignes élogieuses : *« Je fis connaissance avec l'œuvre immense de ce savant à peine apprécié. Le colonel avait étudié tout ce que la mécanique aérodynamique de son temps avait pu concevoir… Les essais de matériaux, les essais d'hélices, les essais de transmission ou d'évaporation, tout à Chalais-Meudon respirait le génie, la précision et la perfection »*. De son côté, Albert Caquot prononcera plus tard lors de son éloge du colonel Renard : *« Le plus grand sacrifice qu'un savant puisse faire à son pays, ce n'est pas de lui donner son sang, mais ses idées et ses travaux sous le voile de l'anonymat. »*

Charles Renard a fondé le premier laboratoire aérodynamique au monde d'où sont issus tous les centres d'études et d'essais aéronautiques français. Les travaux de Charles Renard menés à Meudon ont permis la création de l'aérostation militaire française qui a servi de modèle dans tous les autres pays. Ils ont concouru aussi à la naissance et au développement de l'aviation.

LA GRANDE GUERRE DES AÉROSTIERS (1914-1918)

Au début du XXe siècle, l'aérostation doit partager le ciel avec l'aviation naissante. Si les militaires restent convaincus de l'utilité du ballon dirigeable, qui dispose alors sur l'avion d'avantages conséquents (endurance, capacité d'emport de charge), le ballon captif d'observation n'a plus la cote.

En 1914, le ballon captif d'observation est considéré comme un outil de transition en fin de vie, destiné à disparaître par extinction. De plus, on est alors persuadé que la guerre sera courte, et ces équipements sont peu mobiles (douze lourds chariots à traction hippomobile pour un ballon).

À la mobilisation, huit compagnies d'aérostation sont formées. Chacune des places fortes est dotée de six captifs sphériques (ballon E), mis en l'air par des treuils à vapeur dits « de siège ». Maubeuge dispose d'un parc pour l'instruction, dont les matériels vont servir lors de l'attaque de la ville. Les compagnies de ces places fortes ont interdiction de s'éloigner des camps retranchés dont elles assurent la garde : les armées sont donc totalement démunies de moyens aérostatiques d'observation sur le front…

Dans le camp d'en face, l'ennemi profite de l'été pour employer massivement et en toute impunité, ses ballons captifs allongés Drachen pour observer le champ de bataille et régler les tirs d'artillerie. Les Français utilisent encore sur les champs de bataille les ballons d'observation sphériques de 750 m^3 conçus en 1881 par le capitaine Pezet sous l'égide du commandant Renard. Le capitaine Albert Caquot, insatisfait des performances de ce matériel, par ailleurs trop peu nombreux, planche sur un nouveau ballon captif allongé, se voulant supérieur au Drachen allemand. Un prototype est réalisé à Chalais-Meudon. Début 1915, le général Hirschauer, directeur de l'aviation au ministère de la Guerre, fait effectuer des essais comparatifs avec le ballon sphérique type E, la copie du Drachen germanique en production à Chalais Meudon (ballon H) et le ballon Caquot (type L). Le verdict est sans appel : le sphérique supporte des vents de 38 km/h, le Drachen/ballon H de 54 km/h et le Caquot de 90 km/h grâce à sa carène ovoïde offrant une résistance aérodynamique minimale. Aussi en juin 1915 Albert Caquot est nommé à la direction de l'atelier mécanique d'aérostation de Chalais-Meudon afin de procéder à la construction en grande série des ballons de son invention. La ballon M de 930 m^3, perfectionnement du ballon L avec un empennage à trois surfaces à 120°, se standardise comme équipement des armées française et alliées à partir de la fin 1915. À partir de 1917, le ballon R de 1 000 m^3, avec deux nacelles, est de plus en plus employé, en parallèle avec le modèle M.

En 1916, à Verdun et dans la Somme, l'aérostation donne toute sa mesure, réglant les tirs, repérant les batteries adverses. Surnommés « saucisses » par les Poilus, elles sont en l'air dès que les conditions météorologiques le permettent. Les pertes sont conséquentes, suite aux tirs d'artillerie, aux attaques aériennes et aux intempéries : le 5 mai un violent orage emporte vingt-huit observateurs-aérostiers, dont seuls dix-huit peuvent sauter en parachute.

En 1917, au Chemin des Dames, en prévision de l'offensive Nivelle, les emplacements de l'aérostation

captive sont préparés à l'avance. Les compagnies s'y installent discrètement à partir du 2 avril. Le 6 avril tous les ballons sont en l'air, positionnés parfois à peine à 3 km des lignes. Malgré des conditions météorologiques défavorables, le travail est satisfaisant, particulièrement lors des attaques générales du 16 avril et du 5 mai 1917.

Idéales pour l'observation d'un front statique, les compagnies d'aérostiers doivent s'adapter avec la reprise de la guerre de mouvement et au recul initial des lignes lors de l'offensive allemande de 1918. L'aviation ayant notablement progressé, la DCA protégeant les ballons est renforcée par des canons de 75 effectuant des tirs de barrage. Néanmoins, les attaques étant incessantes, le succès des missions de surveillance est amoindri. Lors de la contre-offensive finale, la pression diminue et le rendement de l'aérostation augmente, les compagnies suivant le mouvement des troupes.

Les ballons Caquot jouèrent également un grand rôle sur mer grâce à une adaptation spécifique du treuil réalisée par Albert Caquot pour la marine britannique. Ce dispositif maintient le câble avec une tension variable, afin que le ballon puisse osciller en souplesse en altitude. De juillet à fin novembre 1916, 46 ballons de 900 m^3 sont livrés au Royaume-Uni, puis Albert Caquot est envoyé à Londres en décembre 1916 pour construire sur place les ballons destinés à la Marine (ballons P). Grâce à l'utilisation de ces ballons sur des navires britanniques, la détection des sous-marins allemands en Mer du Nord est plus aisée et les pertes par torpillage moindres que pour la marine française, qui n'utilise pas encore les ballons Caquot sur mer. Aussi en 1917 Caquot est envoyé à Brest pour mettre la Royale au même niveau. Les ballons Caquot sont également mis à contribution en 1917 et 1918 pour protéger Londres des bombardements allemands. Ils permettent de soutenir des câbles tendus qui font barrage contre l'aviation allemande.

LES DEUX PREMIERS BOMBARDEMENTS AÉRIENS DE L'HISTOIRE DONT L'ÉPOPÉE DU DIRIGEABLE *LE FLEURUS*

Le 3 août 1914, l'Allemagne déclare la guerre à la France. Le 5 août, un dirigeable allemand, le Zeppelin LZ-21 (matricule militaire Z-6), bombarde Liège. Cette énorme machine de 150 m de long, volant à plus de 3 000 m et lâchant des bombes, inaugure les bombardements aériens. Il provoque ce jour-là un impact psychologique énorme. La presse mondiale rapporte à grands titres l'évènement. Ce n'est pas les dégâts réels causés, d'ailleurs limités, qui frappent l'opinion, c'est la taille de l'objet agresseur, et surtout le sentiment qu'il est invulnérable à l'altitude élevée où il vole, et qu'il est très meurtrier.

Le gouvernement français estime aussitôt qu'il faut une riposte à fort impact psychologique. La décision est prise d'envoyer le dirigeable Fleurus bombarder l'Allemagne. Le Fleurus a été étudié par le capitaine Lenoir à Chalais-Meudon – la forme de sa carène a bénéficié d'essais à la soufflerie Eiffel – ; il a effectué son vol inaugural à Saint-Cyr le 23 novembre 1912.

Le commandant de bord désigné est le capitaine Louis Tixier. Cette mission est effectuée dans la nuit du 9 au 10 août. Les obus de 155 mm largués de nuit à 1 800 m d'altitude sur le nœud ferroviaire stratégique allemand de Konz Karthaus font mouche, détruisent cet emplacement stratégique, et tuent peut-être quelques habitants proches. Au retour à la base, l'inspection met en évidence 74 impacts de balles sur l'enveloppe du Fleurus. Cette enveloppe était gonflée à l'hydrogène, le seul gaz porteur disponible à l'époque. Si une seule balle avait été incendiaire, le Fleurus se serait abîmé en flammes, sans survivant. Louis Tixier a reçu les félicitations du général Joffre, commandant en chef des armées françaises. L'ironie de cette histoire, c'est que le dirigeable allemand LZ-21 qui avait bombardé Liège n'a pas pu revenir à sa base par ses propres moyens, à cause du vent devenu trop fort : en perdition, il s'est écrasé au sol, avec son équipage, le lendemain de l'attaque du 5 août sur Liège.

ALBERT CAQUOT, LA CARRIÈRE D'UN BÂTISSEUR (1881-1976)

Albert Caquot est né le 1er juillet 1881 à Vouziers (Ardennes). Il entre à l'âge de 18 ans à l'École polytechnique d'où il sort en 1901 dans le corps des Ponts & Chaussées. Albert Caquot, après son service militaire comme sous-lieutenant dans un bataillon de sapeurs aérostiers, est ingénieur au service des Ponts & Chaussées de l'Aube de 1905 à 1912. Il assainit la ville de Troyes insalubre où règne la typhoïde. Son étude

Les nombreuses décorations étrangères décernées à Albert Caquot

sur l'évacuation des eaux deviendra un ouvrage de référence pour les ingénieurs sanitaires. En 1912 il quitte l'administration pour devenir l'associé d'Armand Considère, l'inventeur du béton fretté, et de Louis Pelnard, gendre de Considère, fonction qu'il assumera jusqu'en 1940 pour concevoir de nombreux ouvrages en béton armé aux caractéristiques hardies : plus de trois-cents ponts, des barrages, des centrales électriques, des hangars d'aviation, le môle d'escale du Verdon, la forme Jean-Bart à Saint-Nazaire, la structure interne du Corcovado à Rio, etc.

En 1914, lors de la déclaration de guerre, il est mobilisé comme capitaine commandant la 21e compagnie d'aérostiers. Il conçoit un nouveau ballon, surnommé « saucisse Caquot » par les Poilus, également produit en Angleterre et aux États-Unis.

Après deux retours à l'aviation de 1928 à 1934 et de 1938 à 1940, il travaille seul, conduit de nombreuses recherches, prend part à la normalisation industrielle, publie des articles scientifiques, conçoit des ouvrages de génie civil dont certains sont des records du monde : les ponts La Fayette et de la Caille, le barrage de la Girotte, la grande écluse et le pont à haubans de Donzère-Mondragon, l'usine marémotrice de la Rance, inaugurée en 1966. Il professe la résistance des matériaux dans les écoles des Mines, des Ponts & Chaussées et de l'Aéronautique.

En 1934, il entre à l'Académie des sciences dont il deviendra le président en 1952. Son jubilé scientifique a lieu le 20 octobre 1947. Par décret du 21 décembre 1951, il est élevé à la dignité de Grand-Croix de la Légion d'honneur. En 1967, il se déclare hostile au tunnel sous la Manche et propose un pont à tablier avec des portées de huit-cents mètres.

Pendant les dix dernières années de sa vie, il conçoit une nouvelle usine marémotrice de 18 000 MW, l'équivalent de six centrales atomiques, en fermant la baie du Mont Saint-Michel. Ingénieur visionnaire, il est peu de domaines du génie civil et de l'aéronautique qu'il n'ait abordés et perfectionnés, voire radicalement transformés.

Les auteurs, tous membres de l'ACEBD, remercient chaleureusement Marianne Lombardi, directrice du Musée d'Art et d'Histoire de Meudon sans qui rien n'aurait été possible.

L'inauguration du 3 septembre

De g à d : Sylvie Vucic, Maire adjointe à la culture de Meudon, arrière petite-nièce d'Antonin Lapresle, bâtisseur de la Grande Soufflerie de Meudon, le général Sabéné et Denis Larghero

COLLECTION PIERRE MULLER – DENIS QUÊNOT

De l'acte anodin … à la passion … genèse d'une collection

Nous pouvons dater à l'année 1980 l'acquisition de la première pièce de notre collection « au ballon ». C'était un jour de printemps, chinant à la recherche de l'objet rare. Nous sommes attirés par une assiette en faïence décorée d'un ballon avec une nacelle où se tenaient deux personnages manœuvrant des rames, deux étendards aux Armes de France étaient déployés à partir de la nacelle. Un coup de cœur, l'achat fut vite conclu, nous avions fait une acquisition qui s'avère être l'origine de la collection. Quel envol de ballon commémorait cette assiette ? Quelle manufacture l'avait fabriquée ? Notre cabinet d'amateur s'enrichissait du témoignage des premiers envols de l'homme dans les airs.

Au travers de recherches, nous découvrons que cette assiette en faïence de La Rochelle représentait les tentatives de Jean Pierre Blanchard d'orienter le vol d'un ballon.

Quelques mois plus tard, notre attention est attirée par une miniature dans l'esprit des gouaches napolitaines. Curieusement elle représente aussi un envol de ballon et porte l'inscription «Il Polane Volante». Elle rejoint le cabinet d'amateur.

Au fils des acquisitions, notre cabinet d'amateur évolue progressivement pour laisser une place de plus en plus importante à la thématique de l'envol de l'humain dans les airs. Un nouveau centre d'intérêt apparaît, une fascination naît, une recherche documentaire voit le jour, une quête incessante de l'objet rare, de l'unicum devient une obsession permanente, une collection thématique se constitue.

Année après année, la collection s'enrichit. Dix-huit ans plus tard, une réalité s'impose, les œuvres graphiques, les faïences et les porcelaines et autres objets ainsi réunis sont indissociables. Ils constituent un important témoignage de la réalisation, dans l'effervescence intellectuelle et scientifique du Siècle des Lumières, du rêve qui taraudait l'Homme depuis l'Antiquité « Imiter l'oiseau, voler ! ».

Souhaitant la partager avec le plus grand nombre, la léguer aux générations futures, la ville de Rosheim, ce coin d'Alsace que certains qualifient de béni des dieux et berceau de la famille Muller, exposa en 2007 cent quatre-vingt-dix pièces de la collection dans les salons de l'Hôtel de Ville. La collection, jusqu'à lors confidentielle, est révélée au public. Les expositions se succèdent (1), les publications s'en emparent (2).

En plus des arts graphiques, la collection comprend des tabatières, objets de parures et éventails, des pièces en faïence et en porcelaine (Fig A - Tasse et sous-tasse Sèvres 1786), des meubles (Fig. B fauteuil de Jean-Baptiste Demay 1783), miroirs (miroir XVIIIe C), baromètres (baromètre XVIIIe D), rafraîchissoirs (rafraîchissoir E) et lustres …

La collection recèle en outre des pièces rarissimes et historiques comme :

- les deux porte-flambeaux de la 1ère compagnie d'aérostiers datés de l'an II de la République (Fig 1a et 1b)
- la pendule automate signée par Cailly qui exerçait ses talents au cœur du centre d'horlogerie de Saint Nicolas d'Aliermont en Normandie (Fig. 2) ;
- les miniatures historiques réalisées par la dynastie des Van Blarenberghe, telles La Caroline du parc du château de St Cloud à Meudon, le 15 juillet 1784 - Van Blarenberghe (Fig.3) ;
- les deux luminaires en faïence ajourée commandés par un neveu des Frères Montgolfier en 1825 (Fig. 4a et b)

La collection Pierre Muller - Denis Quênot est actuellement composée d'un corpus de sept cents pièces des XVIIIe, XIXe et XXe siècles complété d'un fonds documentaire de deux cents volumes, manuscrits et publications des XVIIe, XVIIIe, XIXe et XXe siècles. Elle fait référence dans le monde dans la continuité des collections Soulavie, Barthou, Tissandier, Charles Dollfus, … aujourd'hui dispersées.

1 – Expositions de La collection Pierre MULLER – Denis QUÊNOT :

- 2007 : « Les Ballons » Hôtel de Ville de Rosheim (Bas-Rhin)
- 2008 : « Les Ballons » Louvre des Antiquaire Place du Palais Royal Paris
- 2008-2009 : « Voyage en ballon » Musée de la Toile de Jouy, Jouy en Josas (Yvelines)
- 2009 : « De la Montgolfière au Dirigeable, Le Pouvoir de voler » Musée Promenade, Marly-le-Roy /Louveciennes (Yvelines)
- 2009 : « Les Ballons » Conseil Général du Bas Rhin à Strasbourg
- 2016 : « Ne Rêvez plus, Volez ! Ballon ou Montgolfière ? » Musée Maison de l'Armateur au Havre
- 2016 : « In de wolken » (« La tête dans les nuages ») au Musée Teylers à Haarlem (Pays-Bas)
- 2018 : « Faïences au ballon » Lunéville
- 2018 : « Les Sentinelles de l'Air » Lunéville,
- 2019 : « Art de la table rime aussi avec voyage » Arnay Le Duc (Bourgogne)
- 2021 : « Soyer Père et Fils. Miniaturiste et scientifique au cœur de l'Empire » Lunéville
- 2021 : « Albert Caquot et l'Aérostation militaire à Meudon » Meudon

2 – Publications relatives à la collection Pierre Muller – Denis Quênot :

- « Les Ballons », Pierre Muller-Denis Quênot (2007)
- « Ballons et montgolfières dans la toile imprimée XVIIIe-XIXe siècles » – Anne de Toisy-Dallem, Editions des Falaises (2008)
- « De la Montgolfière au Dirigeable, Le Pouvoir de voler » sous la direction de Christine Kayser, Editions Artlys (2009)
- « L'aérostation dans le nord de la France de 1783 à nos jours » Daniel Casemode, Les Presses du Midi (2013)
- « Les débuts de l'aérostation » Daniel Casemode, Les Presses du Midi (2014)
- « Guyton de Morveau des Lumières à l'Empire Le pouvoir du savoir » sous la direction de Christine Lamarre, Académie des Sciences, des Arts et Belles Lettres de Dijon, Editions Universitaires de Dijon (2017)
- Revue SABIX N° 60 - Louis Bernard Guyton de Morveau, Société des Amis de la Bibliothèque de l'École Polytechnique (2017)
- « Cahiers Flaubert-Maupassant » N°36 2018 – Janvier 2020
- « Chanteclerc » N° 09 – juillet 2018

Tasse Sèvres et sous tasse Sèvres (1786)

Lumninaires en faïence ajourée
Commande d'un neveu des frères Montgolfier (1825)

Fauteuil - Jean Baptiste Demay (1783)

Baromètre XVIIIe

Pendule automate avec globe signée Cailly (1829)

Porte-flambeaux de la 1ère compagnie d'aérostier An II de la République (1794)

Miroir XVIIIe

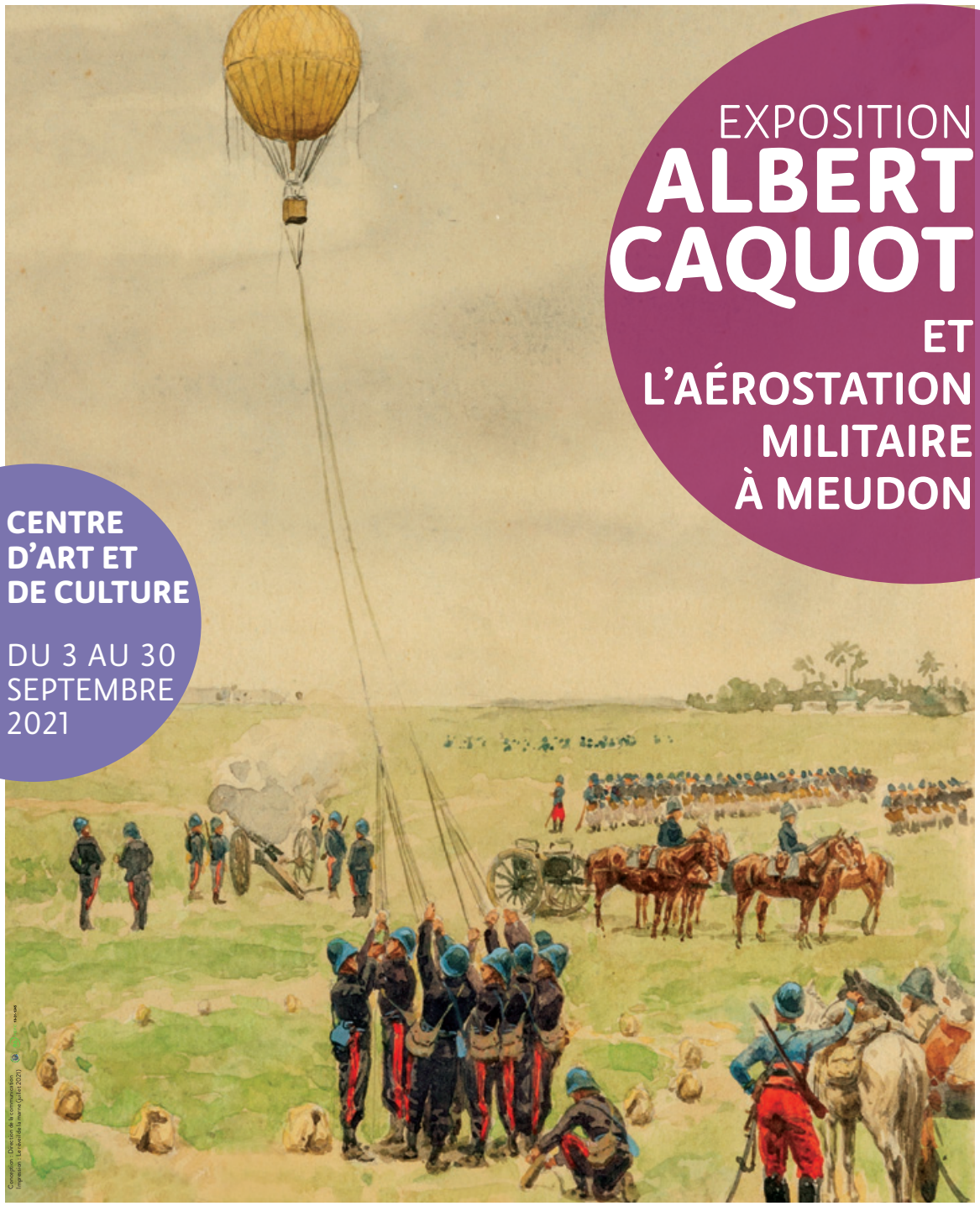
Vol de la Caroline le 14 juillet 1784 du parc du château de Saint-Cloud à Meudon

Rafraichissoir - Époque Empire ■

EXPOSITION ALBERT CAQUOT ET L'AÉROSTATION MILITAIRE À MEUDON

Ville de Meudon

musée d'art et d'histoire de Meudon



EXPOSITION
ALBERT CAQUOT
ET L'AÉROSTATION MILITAIRE À MEUDON

CENTRE D'ART ET DE CULTURE

DU 3 AU 30 SEPTEMBRE 2021

Lucien Rousselot, *La Vigie*, aquarelle, 1885, Collection Pierre Muller et Denis Quénot

15 boulevard des Nations-Unies - Meudon

Exposition en accès libre du mardi au samedi,
de 15h à 18h30 et le dimanche selon la programmation

Avec le soutien de

3AF Association Aéronautique et Astronautique de France

ONERA LUMNI

Société d'Encouragement pour l'industrie nationale

NOTES DE LECTURE

LE HANGAR À DIRIGEABLES D'ECAUSSEVILLE, UN CENTENAIRE PLEIN D'AVENIR SOUS LA DIRECTION DE PHILIPPE PÂRIS ET DOMINIQUE BARJOT AUX ÉDITIONS OUEST-FRANCE

par **Bruno Chanetz**, membre émérite 3AF

Il y a des colloques sans actes, mais aussi des actes sans colloque. C'est le cas de ce remarquable ouvrage collectif, tenant lieu du colloque qui aurait dû avoir lieu en 2020 dans le Hangar à dirigeables d'Ecausseville pour le centenaire de son achèvement. La crise sanitaire ne l'a pas permis, mais en tant que membre du conseil scientifique qui préparait l'évènement, je me félicite que tous les intervenants pressentis aient accepté de consigner leurs connaissances dans ce superbe ouvrage qu'on doit à Philippe Pâris et à Dominique Barjot. Ils ont su réunir historiens, universitaires, architectes, ingénieurs experts et constructeurs de dirigeables pour brosser un tableau varié et approfondi. L'ouvrage est divisé en quatre parties.

La première est relative à l'histoire du bâtiment et de l'aéronautique dans la Manche pendant la guerre de 1914-1918. À la fin de la guerre de 14, le parc des dirigeables de la Marine française culmine en effet à 37 unités, dont 9 Chalais-Meudon. Dès 1916, la décision de créer un port d'attache dans la région de Cherbourg est prise. Ce sera le lieu-dit de la Bergerie de Vaux, située sur la commune d'Ecausseville et proche de la ville de Montebourg. Par rapport aux hydravions et avions côtiers, dont le rayon d'action est trop court et donc la durée de vol utile faible, l'intérêt des dirigeables escorteurs, est qu'ils pouvaient aller au large pour accueillir et accompagner les convois., un dirigeable pouvant "croiser" plusieurs heures dans des zones où il ne risquait pas, alors, d'être victime d'un avion de chasse. Du fait du formidable pont d'observation qu'ils constituaient, ces dirigeables, armés de bombes, pouvaient aisément attaquer un sous-marin, y compris en petite plongée. Autonomie et permanence sur zone constituaient des avantages décisifs au plus léger que l'air. L'Aéronautique maritime a ainsi protégé le commerce allié et joué un rôle déterminant dans l'issue du conflit.

La deuxième partie traite de l'architecture du Hangar d'Ecausseville, mais aussi des hangars à dirigeables d'Orly, des hangars pour avions à la même époque, qu'ils soient en bois, métal ou béton armé. Le Hangar d'Augusta en Sicile, qui a fêté son centenaire en 2020 également cent ans, fait l'objet d'un intéressant chapitre. C'est le seul hangar à dirigeables construit dans le cadre du premier conflit mondial avec Ecausseville, subsistant en Europe. Cette partie architecture se termine par un panorama des entreprises françaises du béton armé, ainsi sur l'évocation de l'ingénieur Henry Lossier, constructeur du Hangar d'Ecausseville. De grosses entreprises de construction sont évoquées et notamment l'entreprise Limousin, qui au début des années 30 construisit à Chalais-Meudon la Grande soufflerie. De même il est fait mention d'un grand

nombre de personnalités du génie civil de cette époque, dont Albert Caquot. De plus l'existence de deux lexiques des personnes et des lieux permet de retrouver facilement les renseignements cherchés.

Compte tenu des désordres qu'un tel ouvrage en béton armé a pu subir au cours du temps, la troisième partie est consacrée à la problématique de restauration, en envisageant les différents éléments, la structure elle-même, les immenses portes et les tuiles Minard le recouvrant, mais ces analyses tiennent compte des avancées dans le domaine, tels les bétons fibrés à ultra-haute performances.

La quatrième partie envisage l'avenir du bâtiment à l'aune de l'avenir des dirigeables eux-mêmes. Philippe Tixier, président du Groupe de travail 3AF Aérostation et dirigeables, évoque le renouveau du dirigeable, un sujet qu'il connait bien, étant également président de Dirisolar, un projet de dirigeable solaire pour le tourisme. Thibault Prioux décrit le projet de transport de charge Flying Whales et Alain Bernard celui du transport de fret Voliris. En effet, ainsi qu'en témoigne ce n° spécial de la Lettre 3AF, le dirigeable connaît aujourd'hui un renouveau, surtout en France. Écausseville peut-il en profiter ou d'autres pistes sont-elles à rechercher pour lui trouver un futur ?

Ce bâtiment exceptionnel méritait ce livre exceptionnel, qui demeurera un ouvrage de référence, car il est le fruit d'un travail interdisciplinaire de grande qualité. Il intéressera les étudiants aussi bien que les passionnés de l'histoire et de l'actualité du dirigeable, ainsi que les curieux de l'architecture en béton du début du XXe siècle, sans oublier les amateurs du patrimoine insolite et les habitants du territoire sur lequel se dresse ce bâtiment hors norme. ■

Le comité de rédaction remercie MM Pâris et Barjot de l'avoir autorisé à reproduire dans cette lettre les articles Stratobus et Flying Whales parus dans leur ouvrage.

NOTES DE LECTURE

DE VERDUN À RIO ALBERT CAQUOT ITINÉRAIRES D'UN GÉNIE PAR JEAN-BRUNO KERISEL AUX ÉDITIONS ITINÉRAIRES

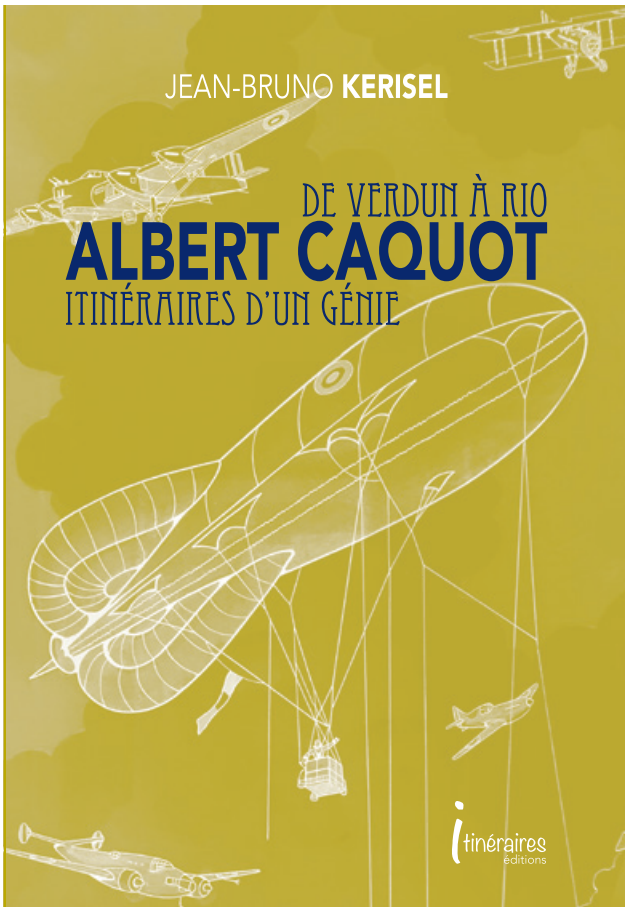
par **Bruno Chanetz**, membre émérite 3AF

Malgré son titre, ce livre ne raconte pas la vie d'Albert Caquot et c'est très bien ainsi, la biographie d'Albert Caquot ayant déjà été faite et fort bien faite par son gendre, Jean Kerisel [1], père de Jean-Bruno Kerisel, l'auteur de cette exo-fiction.

Aussi Jean-Bruno Kerisel a pris le parti de faire un portrait intime d'Albert Caquot en le mettant en scène dans un récit dont il n'est pas le personnage principal, mais le mentor du héros. Il procède par allusion, nous livre un portrait de son grand-père par petite touche, comme un peintre le ferait, en nous contant la vie d'un contemporain de son grand-père : Louis Mangin, décédé quelques mois après Albert Caquot avec lequel il a entretenu une correspondance tout au long de sa vie.

1. Jean Kerisel, Albert Caquot, 1871-1976 : Savant, soldat et bâtisseur, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2001.

DE VERDUN À RIO ALBERT CAQUOT ITINÉRAIRES D'UN GÉNIE PAR JEAN-BRUNO KERISEL AUX ÉDITIONS ITINÉRAIRES



Début 1917, Louis Mangin, ingénieur des Arts et Métiers, est affecté à la 68e compagnie du 2e régiment d'aérostation. Fin 1917 il fait la connaissance d'Albert Caquot à Chalais-Meudon, où il deviendra son second pour la réalisation des ballons d'observation.

Après la guerre, il obtient un diplôme d'architecte et fort de cette double formation, frappe fin 1920 à la porte du bureau d'étude d'Albert Caquot. Il participera ainsi à tous les projets d'après-guerre du « patron ».

En août 1923, Louis Mangin se marie avec sa belle-sœur Marie, veuve de son frère le capitaine François Mangin, mort pour la France. Malheureusement Marie décède en 1928. Pour aider Louis à surmonter sa peine, Albert Caquot l'associe au projet de la structure en béton armé du Christ rédempteur au mont Corcovado à Rio de Janeiro, œuvre du sculpteur Paul Landowski.

En 1932, il épaule Albert Caquot pour le suivi des travaux de la Grande soufflerie de Chalais-Meudon, confiés à Antonin Lapresle, collaborateur et successeur de Gustave Eiffel dans sa soufflerie d'Auteuil. Puis ce sera en 1934 la concrétisation d'une attirance ancienne pour la vie monastique avec son entrée comme novice dans un couvent bénédictin. Il finira sa vie à l'abbaye bénédictine d'Abu Gosh en Israël.

Ici l'auteur fait vivre d'autres pans inconnus de l'histoire. Le héros rencontre à Paris le poète Guillaume Apollinaire, lui aussi au front pendant la Première guerre mondiale, laissant avec humour ces lignes sur les ballons d'observation :

Il y a dans le ciel six saucisses et la nuit venant on dirait des asticots dont naîtraient les étoiles ...

D'autres célébrités sont approchées, le cinéaste Jean Rouch, le compositeur Reynaldo Hahn et l'architecte Oscar Niemeyer, ce qui confère à ce livre un intérêt soutenu, qui ne se dément pas tout au long des pages, témoins de l'histoire d'un siècle marqué par de grandes réussites industrielles, en dépit des deux guerres mondiales qui l'ont ensanglanté. La figure d'Albert Caquot résume bien les progrès de cette époque dans le domaine de l'aéronautique et du génie civil.

L'auteur conclut :

« Nous avons plus que jamais besoin d'ingénieurs visionnaires, comme il l'a été en son temps. De nouveaux poètes devraient surgir, tels ceux qu'il décrivait dans un mémoire sur la locomotion aérienne en 1911 :

L'ingénieur, poète de notre époque, a réalisé ce rêve aussi vieux que le monde. Il a dompté la matière, construit un oiseau aux ailes soyeuses et au cœur d'acier, et il l'a lancé chaque jour avec plus de succès à la conquête de l'air ».

En vente à la Fnac. ■

Space Connect
ONERA LUMNI
MEUDON SPACE CONTRACTOR
24 juin
25 juin
26 juin
2021
présentent la 3e édition partie 1 de
STAR'S UP
LE FESTIVAL DE L'ESPACE
CENTRE D'ART ET DE CULTURE
POTAGER DU DAUPHIN & EN LIVE
Meudon
Entrée gratuite sur réservation
Rencontre avec des astronautes
Spacecon | Conférences
Colloque de l'aérostation
Animations | Ateliers
Films en plein air
#StarsUpFestival
www.starsupfestival.fr
Ville de Meudon

LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS

8 OCTOBRE 2021

9-10 NOVEMBRE 2021

7-9 DÉCEMBRE 2021

2022

1-3 FÉVRIER 2022

28-30 MARS 2022

9-13 MAI 2022

3 JUIN 2022

Association Aéronautique
et Astronautique de France

www.3af.fr