



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10106>

To cite this version :

Thomas VANNESTE, Alexandre BONTEMPS, Caroline SOYER, Jaen-Bernard PAQUET, Olivier THOMAS, Éric CATTAN, Sébastien GRONDEL - Développement d'un insecte artificiel. Nanodrone dédié à la surveillance intra-bâtiment - 2015

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : archiveouverte@ensam.eu



in217

Développement d'un insecte artificiel - Nanodrone dédié à la surveillance intra-bâtiment

Date de publication : 10/07/2015

Par :

Thomas VANNESTE

Ingénieur, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Alexandre BONTEMPS

Ingénieur Sensefly, Cheseaux-Lausanne, Suisse

Caroline SOYER

Maître de conférences à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Jean-Bernard PAQUET

Ingénieur de recherche à l'Office national d'étude et de recherche aérospatiale, Lille, France

Olivier THOMAS

Professeur des universités au Campus de Lille d'Arts et Métiers ParisTech et au Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes (LSIS, UMR CNRS 7296), France

Eric CATTAN

Professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Machines aérodynamiques et compresseurs

Sébastien GRONDEL

Professeur à l'École nationale supérieure d'ingénieurs en informatique, automatique, mécanique, énergétique, électronique (ENSIAME), Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.

Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 02/07/2015

Pour le compte : 7200097598 - éditions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.153

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Développement d'un insecte artificiel

Nanodrone dédié à la surveillance intra-bâtiment

par **Thomas VANNESTE**

Ingénieur, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Alexandre BONTEMPS

Ingénieur Sensefly, Cheseaux-Lausanne, Suisse

Caroline SOYER

Maître de conférences à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Jean-Bernard PAQUET

Ingénieur de recherche à l'Office national d'étude et de recherche aérospatiale, Lille, France

Olivier THOMAS

Professeur des universités au Campus de Lille d'Arts et Métiers ParisTech et au Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes (LSIS, UMR CNRS 7296), France

Eric CATTAN

Professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

et **Sébastien GRONDEL**

Professeur à l'École nationale supérieure d'ingénieurs en informatique, automatique, mécanique, énergétique, électronique (ENSIAME), Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Résumé : Dans l'optique de réaliser de la surveillance intra-bâtiment avec un système autonome, mobile, très discret, des recherches sont en cours pour développer des nanodrones. Elles se concentrent sur la compréhension et l'imitation du vol battu des insectes et sur les aspects de la miniaturisation. Cet article décrit la conception et la réalisation d'un insecte artificiel à ailes résonantes à l'aide des technologies de microfabrication de la microélectronique. Un actionneur électromagnétique induit un mouvement de flexion/torsion des ailes correspondant à une cinématique similaire à celle des insectes. L'estimation des phénomènes aéroélastiques en grands déplacements est réalisée à l'aide d'un modèle basé sur les éléments finis et une formulation analytique de l'aérodynamique. Une validation expérimentale est ensuite proposée.

Abstract : *In order to achieve intra-building surveillance with autonomous, mobile and very discreet system, research is underway to develop nano air vehicles (ou nano drones). They focus on understanding and imitation of flapping flight of insects and on miniaturization. This paper describes the design and realisation of an artificial insect with resonant wings using the micro-fabrication of microelectronics technologies. An electromagnetic actuator induces a bending / twisting motion of the wings corresponding to a kinematic similar to that of insects. The estimation of aero elastic phenomena in large displacement is performed using a model based on the finite elements method and on an analytical formulation of aerodynamics. An experimental validation is then proposed.*

Mots-clés : Ailes battantes, nanodrone, objet volant mimant l'insecte, actionneur électromagnétique, MEMS, modélisation de puissance et aéroélastique

Keywords : *flapping wings, NAV, artificial insect, electromagnetic actuator, MEMS, power and aeroelastic modelling*

Points clés

Domaine : Nanodrone

Degré de diffusion de la technologie : Émergence | Croissance | Maturité

Technologies impliquées : Techniques de microfabrication utilisées pour réaliser des microsystèmes

Domaines d'application : Surveillance militaire ou civile intra-bâtiment

Autres acteurs dans le monde : Université de Harvard, Microrobotics Laboratory
Prof. Robert Wood

Contact : sebastien.grondel@univ-valenciennes.fr

1. Contexte

Les chercheurs qui travaillent à recréer artificiellement le vol stationnaire de l'insecte n'ont pas encore réalisé de prototypes à ailes vibrantes qui soient capables de voler de façon autonome. Le défi est donc de reproduire la cinématique des ailes des insectes à l'aide d'un robot et de générer une force de portance suffisante pour lui permettre de s'envoler. Une envergure de quelques centimètres et une masse de quelques dizaines de milligrammes sont visées. Cet objectif peut être atteint en utilisant les technologies de microfabrication dédiées habituellement à la réalisation de microsystèmes. L'objet volant mimant l'insecte (OVMI) sera alors classé dans la catégorie des nanodrones télécommandés susceptibles d'emporter une charge utile et d'effectuer des missions de reconnaissance en milieu confiné.

Cette problématique nécessite la résolution de nombreux défis scientifiques et technologiques. Dans ce but, une équipe composée de chercheurs de l'ÎEMN, de l'ONERA, de l'ENSAM et de l'ENSIAME a été mise en place et a permis la réalisation de travaux sur :

- la conception d'une structure polymère micro-usinée avec un corps et des ailes ;
- l'intégration de microactionneurs électromagnétiques pour l'actionnement des ailes ;
- la cinématique et l'aérodynamique autour du nanodrone.

Cet article a pour vocation de retracer les avancées de cette recherche, de montrer les potentialités et de présenter les perspectives à court terme.

2. De l'insecte volant aux nanodrones

2.1 Microcosmos, les insectes volants

La nature, on le sait, est une formidable source d'inspiration et d'innovation quasi illimitée. Elle est en effet constituée d'un éventail d'espèces animales offrant des moyens de locomotion terrestres, sous-marins et aériens prometteurs, aussi les recherches sur les systèmes bio-inspirés ont fait l'objet de beaucoup d'attention au cours de la dernière décennie. Lorsque l'on s'intéresse aux insectes, on ne peut être qu'admiratif devant leur évolution depuis l'ère paléolithique, leur grande diversité et leur performance en vol. En effet, ils démontrent des capacités aériennes impressionnantes : effectuer un vol stationnaire, enclencher des accélérations fulgurantes, effectuer un vol à reculons, ou tout simplement se

déplacer à des vitesses pouvant avoisiner les $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Leur pluralité apporte de multiples solutions pour concevoir des nanodrones. Parmi l'ensemble de ces familles, on peut citer par exemple quatre ordres d'insectes communs représentatifs de la grande variété anatomique d'ailes : les lépidoptères (papillons, figure 1a), qui se caractérisent par deux paires d'ailes membraneuses recouvertes d'écaillés colorées, les anisoptères (libellules, figure 1b), constitués de deux paires d'ailes durcies déployées au repos, les hyménoptères (abeilles, guêpes, bourdons, figure 1c), possédant deux paires d'ailes couplées, et les diptères (mouches, moustiques, figure 1d), qui ne possèdent qu'une paire d'ailes fonctionnelle.

Ces ailes disposent d'une répartition de rigidité variée aussi bien au sein de leur structure que d'une espèce à l'autre. En outre, elles possèdent généralement une grande souplesse qui semble indispensable à la qualité de leur vol. Cette dernière leur sert également à mieux résister aux conditions climatiques (gouttes d'eau, vent...). Nous ne nous étendrons pas ici sur l'ensemble des capteurs sensoriels (haltères, poils...) dont disposent les insectes volants qui génèrent les sens usuels tels que la vue, l'odorat, le goût mais aussi l'ouïe et des informations équivalentes à celles d'un gyroscope. Ces récepteurs sont localisés sur des poils, dans des cryptes ou des pores.

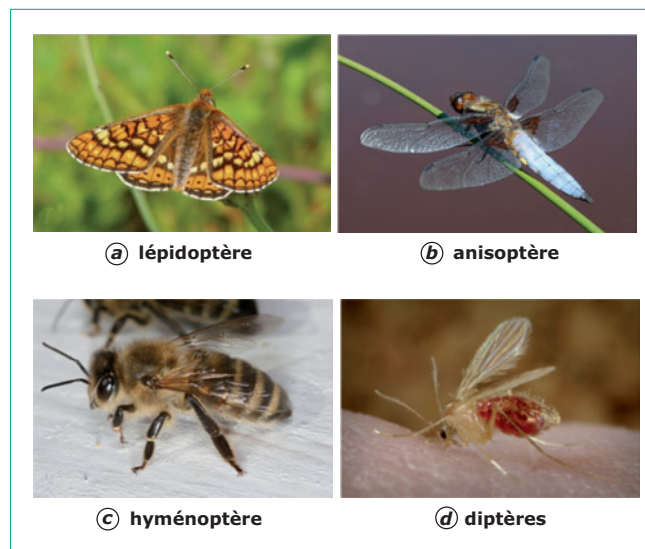


Figure 1 - Exemple d'ordres d'insectes volants

2.2 Rupture technologique : nécessité d'un nouveau moyen de locomotion

L'aviation et l'ingénierie puisent depuis longtemps leur inspiration dans l'observation des oiseaux et du monde marin par l'introduction par exemple d'ailettes verticales à l'extrémité des ailes de certains gros porteurs inspirées des ailes des rapaces ou encore par l'utilisation d'une structure similaire à celle de la peau du requin afin d'améliorer les performances hydrodynamiques de certaines machines. En raison des progrès récents dans les technologies de microfabrication et de miniaturisation de l'électronique, il est opportun de réfléchir aujourd'hui à concevoir et réaliser des objets volants fonctionnels et autonomes de très petite taille (micro- et nanodrones). Actuellement, deux types de drones sont très largement employés, les drones à voilure fixe (avion, figure 2a) [1] et les drones à voilure tournante (héli- ou quadricoptère, figure 2b) [2] dans les domaines civils et militaires pour des applications en espace non confiné. Une rupture technologique semble quasi incontournable lorsque l'on choisit de réduire les échelles et de disposer d'un outil pour travailler en espace confiné. C'est donc très logiquement que la recherche s'est intéressée aux mécanismes de locomotion des insectes.

Dans ce contexte, un troisième type de drone fait donc l'objet de recherches : il s'agit des micro- et nanodrones à ailes battantes (resp. vibrantes). L'idée est de développer des petits drones télécommandés capables d'effectuer un vol autonome et dont la conception et la réalisation s'inspirent directement du vol de certains petits oiseaux ou des insectes connus pour leurs performances en termes de manœuvrabilité, de rendement énergétique ou encore d'adaptabilité. Comparées aux voilures fixes, les voilures à ailes battantes et tournantes ont comme avantages principaux, d'une part, de permettre le vol stationnaire, et d'autre part, d'assurer une meilleure manœuvrabilité. Un autre avantage réside dans la discrétion acoustique de ces micro- et nanodrones puisque le bruit généré par les actionneurs est en général inférieur à celui créé par les hélices des drones à voilures tournantes et fixes.

Ces engins sont généralement destinés à intervenir là où l'homme ne peut pas agir, notamment dans les milieux confinés ou nécessitant une taille réduite et une grande agilité de déplacement. Les applications possibles concernent les missions de surveillance et de reconnaissance civile ou militaire en milieu urbain intra-bâtiment. On peut citer à titre d'exemples l'œil déporté du fantassin, l'inspection des structures industrielles et des ouvrages d'art et pourquoi pas le monde du jouet.



Figure 2 – Modèles de microdrones

2.3 État de l'art sur les micro- et nanodrones

Depuis le début des années 2000, de nombreuses équipes s'intéressent à la conception et la fabrication de microdrones à ailes battantes propulsés à l'aide de moteurs électriques et disposant d'une caméra embarquée. Parmi les projets les plus aboutis, on peut citer le *DelFly Micro* [3] développé à l'université de Delft (figure 3a) qui pèse 3 g pour une envergure de 10 cm. Ses deux paires d'ailes battant à 14 Hz l'aident à voler de façon stationnaire pendant plusieurs minutes. À cette échelle, il existe également l'*Hummingbird* [4] réalisé par AeroVironment Inc. (figure 3b) qui pèse 19 g pour une envergure de 16,5 cm et qui peut voler durant 11 min. Ce n'est que très récemment, sous l'impulsion de R.J. Wood dans le cadre du projet *RoboBee* [5] au laboratoire de microrobotique de l'université de Harvard qu'enfin un prototype de la taille d'un insecte et d'un poids de 80 mg (figure 3c) a réussi à décoller verticalement. Les ailes sont actionnées à une fréquence de 110 Hz par des actionneurs piézoélectriques et pour l'instant ce nanodrone à ailes battantes reste alimenté par des fils.

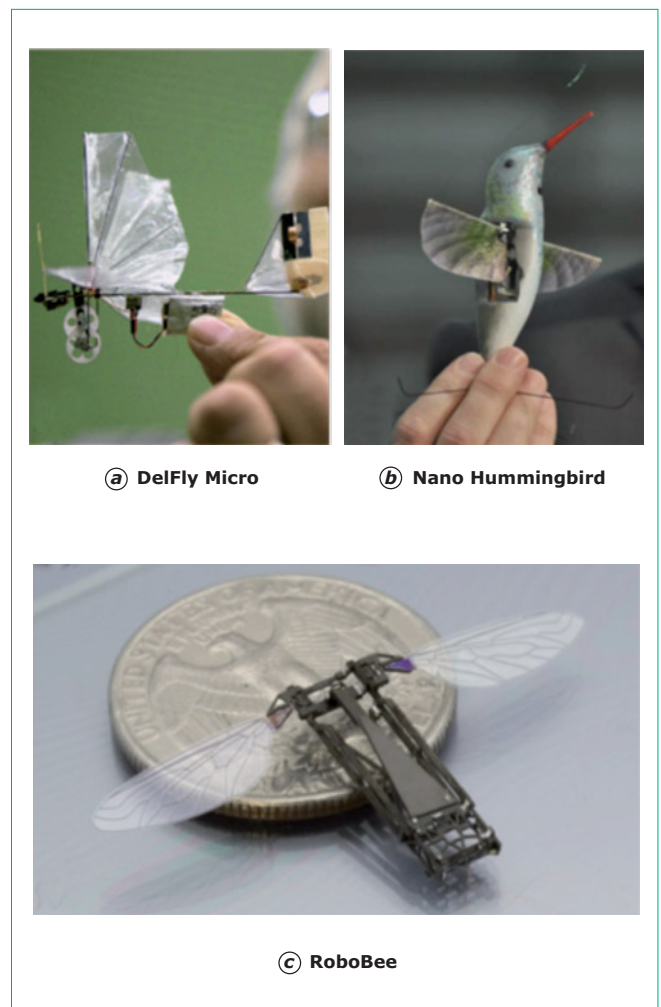


Figure 3 – Deux exemples de microdrones (a et b) et un exemple de nanodrone (c)

Compte tenu de leur faible taille mais également de par la multitude et la complexité des éléments qui doivent être embarqués (actionneur, transmission, organes de contrôle...), la conception et la réalisation de ces systèmes nécessitent de relever un grand nombre de défis.

3. Défis scientifiques et technologiques

Lors de la conception de ce type d'engins, la principale difficulté à surmonter est d'intégrer au sein du corps de l'insecte artificiel un ou plusieurs actionneurs, de densité énergétique suffisante, nécessaires à la création d'une cinématique similaire à celle des ailes d'insecte. Cette dernière doit engendrer une force de portance supérieure au poids du nanodrone pour permettre son envol. Une fois cette étape franchie, le travail qui reste à effectuer réside dans la recherche de solutions bio-inspirées afin d'obtenir des performances en termes de communication et d'orientation dans l'espace proches de celles des insectes sociaux (abeilles, fourmis, termites).

3.1 Actionneur

Il est remarquable de constater que les ailes de certains insectes volants battent à des cadences très élevées : elles peuvent atteindre le kilohertz chez les cératopogonidés. Plus précisément, c'est l'action de puissants muscles dans le thorax qui provoque le mouvement de brassage des ailes. Les impulsions envoyées aux muscles peuvent être à des fréquences inférieures à celle des ailes en raison de l'utilisation d'un mode résonant entretenu, il n'en reste pas moins que ces muscles fonctionnent à des vitesses bien plus élevées que chez les autres animaux.

Si l'on souhaite se rapprocher de ces performances, l'actionnement du nanodrone requiert des caractéristiques toutes particulières en termes d'encombrement et de masse embarquée. Il n'est donc plus possible comme c'est le cas à l'échelle macroscopique de s'appuyer sur l'utilisation des moteurs électriques à courant continu dont le rendement diminue avec la taille. Il est donc nécessaire de s'orienter vers des actionneurs linéaires adaptés au prototype à réaliser. La première

contrainte réside dans la fréquence d'actionnement qui doit être aisément modulable entre une dizaine et plusieurs centaines de hertz afin de facilement s'adapter aux fréquences de résonance qui seront produites par des géométries d'ailes différentes. L'actionneur devra avoir de préférence un rendement et une densité de puissance élevés ce qui se traduit par une obligation de minimiser la masse embarquée et la consommation énergétique qui évidemment seront, à cette échelle de prototype, des éléments cruciaux à l'obtention d'un envol. La dernière contrainte forte est d'éviter de disposer de mécanisme d'amplification du mouvement, difficile à réaliser à ces dimensions et qui est source de pertes énergétiques. Cela peut être obtenu lors d'une transmission directe de l'effort vers l'aile impliquant un déplacement important de l'actionneur (> 10 %) (tableau 1) [6] [7].

Lorsque l'on considère les diverses technologies, il ressort principalement qu'aucune d'entre elles ne répond parfaitement à tous les critères. Aussi, si les polymères électroactifs de type élastomères diélectriques ou les actionneurs piézoélectriques offrent des caractéristiques remarquables par rapport aux autres technologies en termes de rendement, de génération de force ou de temps de réponse, leur principal inconvénient réside dans l'utilisation d'importantes tensions, ce qui peut être pénalisant pour l'autonomie du drone. Ce problème se retrouve également dans la solution électrostatique alors que les alliages à mémoire de forme sont pour leur part trop lents. Nous avons de notre côté fait le choix d'utiliser l'actionneur électromagnétique en raison, entre autres, de sa simplicité de commande, sa grande adaptabilité et sa rapidité de mise en œuvre. De plus, cet actionneur linéaire fournit d'emblée des déplacements de grande amplitude sur une plage de fréquence allant de quelques hertz à plusieurs centaines de hertz avec une force mécanique de l'ordre du millinewton. Il reste à vérifier cependant que la densité d'énergie est suffisante pour permettre de soulever son poids et plus. Notons enfin que les données sur les actionneurs présentées dans le tableau 1 proviennent de différentes études pour lesquelles les géométries et les tailles sont variables d'une technologie à l'autre et pas toujours optimales pour une comparaison aisée. Il convient donc de nuancer les conclusions sur le potentiel de ces actionneurs, ces dernières pouvant également être remises en question en fonction de la conception et de la technologie de fabrication du drone.

Tableau 1 – Comparaison qualitative des performances des technologies d'actionnement

| Technologie | Rendement | Contrôle | Temps de réponse | Déformation maximale (%) | Contrainte (MPa) | Densité d'énergie ($J \cdot g^{-1}$) |
|---|-----------|----------|------------------|--------------------------|------------------|--|
| Piézoélectrique | > 90 | simple | rapide | ~ 0,2 | 110 | 0,013 |
| Alliage à mémoire de forme | < 10 | complexe | lent | > 5 | > 200 | > 15 |
| Électrostatique | > 90 | complexe | rapide | 50 | 0,03 | 0,0015 |
| Polymère électroactif (élastomère diélectrique) | > 90 | complexe | rapide | ~ 63 | ~ 3 | 0,75 |
| Électromagnétique | > 90 | simple | rapide | 50 | 0,1 | 0,003 |

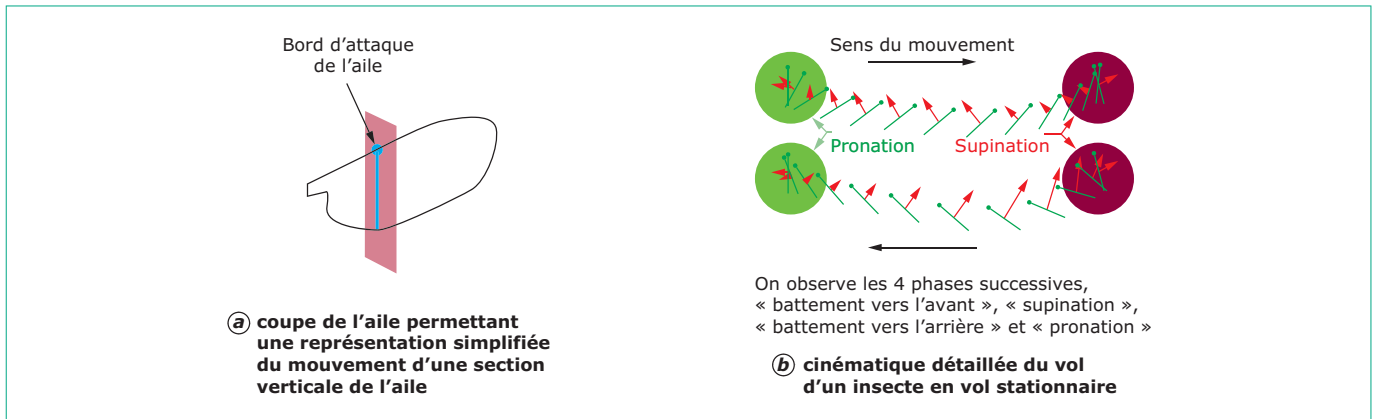


Figure 4 – Mouvement de l'aile de l'insecte (adapté de [11] [12])

3.2 Transmettre et transformer le mouvement

La cinématique du vol des insectes est aujourd'hui très bien documentée grâce aux travaux de nombreux biologistes [8] [9]. Le battement des ailes correspond à un mouvement périodique dont la fréquence varie entre 5 et 200 Hz [10] en fonction de la masse et de l'envergure de l'insecte notamment. Plus précisément, la cinématique décrite par l'aile (figure 4) [11] [12] se compose d'un mouvement de battement et d'un mouvement de prono-supination (pronation/supination) autour de l'axe du bord d'attaque, ce dernier ayant pour fonction de moduler l'angle d'attaque de l'aile durant le mouvement. Lors d'un demi-cycle de battement, l'aile accélère pour atteindre une vitesse maximale constante au milieu du demi-cycle de battement alors que l'angle d'attaque (figure 5) diminue pour atteindre un angle d'incidence de l'ordre de 35° à mi-battement. Lors de ces mouvements, différents mécanismes aérodynamiques rentrent en jeu pour permettre à l'insecte de se placer en sustentation et de se mouvoir dans l'air. Ainsi, les phases de translation à fortes incidences sont plutôt caractérisées par la présence d'un important tourbillon de bord d'attaque sans décrochage aérodynamique de l'aile alors que les phases de rotations sont plutôt le théâtre de phénomènes de masse ajoutée, l'air autour de l'aile freinant et poussant celle-ci, et de force rotationnelle (effet Kramer), force générée par le mouvement combiné de translation et de rotation de l'aile pour essayer de rétablir un écoulement normal au bord de fuite de l'aile. À cela s'ajoutent d'autres phénomènes comme le retard à l'établissement de la portance (effet Wagner) et de capture de sillage.

Afin de se mouvoir avec précision, l'insecte peut faire varier différents paramètres : plan de battement des ailes, angle d'attaque, fréquence de battement, position du corps. Ces modifications se répercutent très rapidement sur le comportement en vol de l'insecte et participent à l'extraordinaire agilité et à la très grande réactivité observées chez l'insecte, cependant les caractéristiques de vol peuvent être très différentes d'une espèce d'insecte à l'autre.

Pour générer une portance suffisante, il est essentiel d'arriver à créer une cinématique qui présente les 4 phases montrées sur la figure 4. Les phases de battement vers l'avant et de battement vers l'arrière présentent une vitesse maximale avec un angle d'attaque minimal et permettent de générer une portance conséquente et stable. Les phases de pronation et de supination sont plus fortement créatrices de portance

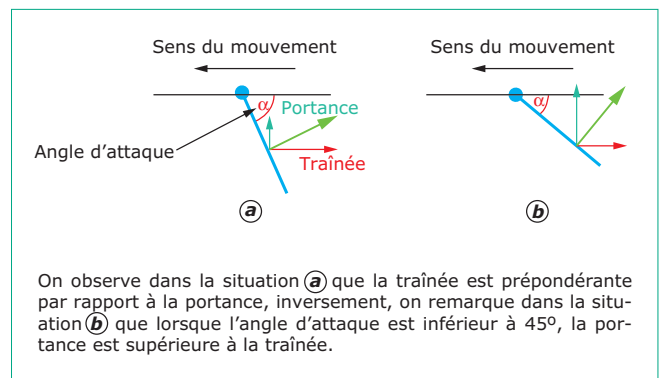


Figure 5 – Représentation schématique de l'angle d'attaque et de son implication

mais de manière beaucoup plus ponctuelle [13] [21]. Pour créer efficacement de la portance avec la cinématique décrite, il faut un maximum de portance pendant les phases de translations avec un effet transitoire bénéfique au moment des rotations, sans décrochage avant une rotation rapide qui doit créer un pic de portance si elle est optimale. On cherchera donc à maximiser, dans la cinématique, l'amplitude des phases de battement vers l'avant et de battement vers l'arrière.

La question se pose alors de savoir comment recréer et transmettre ce mouvement aux ailes de la façon la plus efficace possible. Dans son étude sur les insectes, Dudley [14] a remarqué que les ailes des insectes sont des structures passives, sans muscles et que la structure du thorax joue un rôle essentiel dans la génération de leurs mouvements. Le thorax peut en effet être assimilé à une boîte élastique dont la partie dorsale prend le nom de tergum. On distingue alors deux mécanismes pour la génération du mouvement des ailes selon le positionnement des muscles dans le thorax (figure 6).

Le premier mécanisme, dit **direct** (figure 6a) fonctionne grâce à des contractions alternées des muscles actionnant directement les ailes. Le second mécanisme, dit **indirect** (figure 6b), correspond au cas où les muscles responsables du vol ne sont pas directement attachés aux ailes. Les muscles moteurs du vol sont situés dans le thorax, y sont attachés et le déforment, et c'est la résonance en flexion du tergum qui

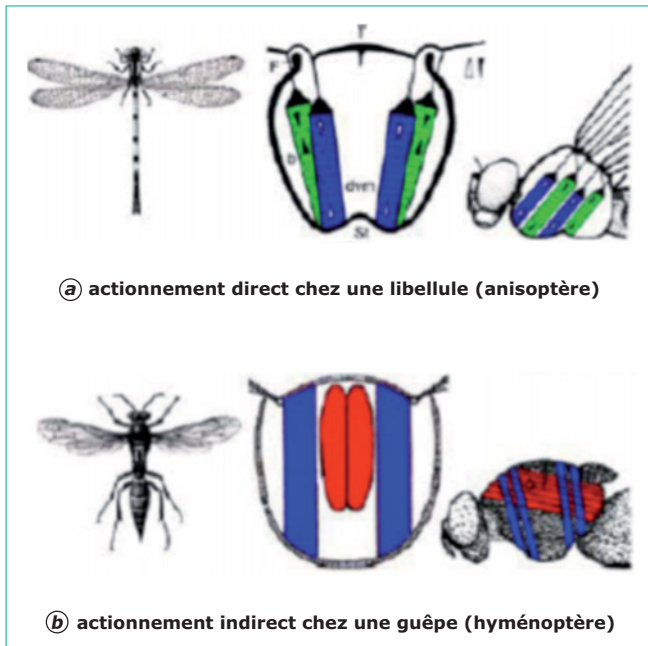


Figure 6 – Vue schématique représentant les différents types d'actionnement des ailes chez l'insecte [14]

provoque le mouvement de battement des ailes. Les muscles entretiennent la résonance du tergum sans être synchrone, avec les battements des ailes.

L'actionnement direct est préféré dans le domaine des microdrones et des nanodrones à ailes battantes, il équipe notamment le *DelFly* ou le *Hummingbird* (figures 3a, b). Toutefois, nous verrons par la suite que nous avons choisi de privilégier l'actionnement indirect car il présente des caractéristiques singulières adaptées à un des principaux concepts utilisés par la suite : le phénomène de résonance.

3.3 Éléments de commande de vol

Pour le contrôle de drones, une grande partie de la recherche actuelle s'appuie sur les équations standards à six degrés de liberté décrites dans de nombreux manuels de dynamique de vol des avions [15] :

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = m\dot{\mathbf{V}}_C + \boldsymbol{\Omega}_{TC} \wedge m\mathbf{V}_C \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_{\text{ext}} = I_C \dot{\boldsymbol{\Omega}}_{TC} + \boldsymbol{\Omega}_{TC} \wedge I_C \boldsymbol{\Omega}_{TC} \quad (2)$$

Dans ces équations m et I_C sont respectivement la masse du corps du drone et le tenseur d'inertie autour de son centre de masse ; \mathbf{V}_C et $\boldsymbol{\Omega}_{TC}$ sont la vitesse de translation et la vitesse angulaire du corps par rapport au repère terrestre exprimées dans le repère du corps. \mathbf{F}_{ext} et \mathbf{M}_{ext} représentent la somme des forces et des moments extérieurs appliqués au centre de masse, à savoir : les efforts de gravitation et aérodynamiques.

Ainsi, Oppenheimer *et al.* [16] [17] proposent la modélisation et le contrôle de microdrones à ailes battantes sur la base du *RoboBee* [18]. Le modèle aérodynamique utilisé dans ces simulations est développé en référence [19] et repose sur le travail de Sane et Dickinson [20] [21]. L'utilisation des

équations standards du mouvement est justifiée en prenant comme hypothèses soit que l'accélération et les effets gyroscopiques des ailes sont minimes comparés à ceux du corps du drone, soit que ces derniers sont en moyenne identiquement nuls sur un cycle de battement.

Cependant, certains auteurs [22] [23] affirment que ces effets de masse et d'inertie au niveau des ailes ne peuvent être négligés si l'on souhaite déterminer une loi de commande appropriée. Dès lors, un modèle multicorps est requis. Après analyse de premiers résultats, des différences significatives avec le modèle standard ressortent au niveau de la position et de l'orientation du microdrone. Pour ces études, les algorithmes de contrôle élaborés doivent maintenant être testés sur un prototype réel pour voir si les lois de régulation obtenues s'appliquent dans le monde physique.

D'autres questions se posent également lorsque l'on diminue la taille du drone pour s'intéresser aux nanodrones. Les débattements en rotation étant beaucoup plus élevés pour les insectes que pour les oiseaux en vol de croisière, on tend, par bio-mimétisme et réduction d'échelle des nanodrones, vers des ailes non plus battantes mais vibrantes. On parle dorénavant de flexion et torsion en référence aux déformations de l'aile et non plus de battement et de rotation. Étant donné la difficulté à simuler précisément ce type de phénomène, une autre approche possible consiste à combiner l'analyse et l'expérimentation autour de tels engins. Par exemple, Pérez *et al.* [24] proposent une méthode en deux étapes pour résoudre le problème : dans la première étape, des informations substantielles sur le système sont recueillies grâce à une identification expérimentale. Dans la deuxième étape, les informations recueillies à travers les expériences de déformation statique des ailes sont utilisées pour concevoir le régulateur de commande employé en vol vertical.

Du point de vue matériel, la recherche porte actuellement sur le choix et la miniaturisation de composants électroniques tels que des microcontrôleurs et des accéléromètres ou gyroscopes afin d'aider à une meilleure manœuvrabilité de l'insecte artificiel en présence d'obstacle. On peut souligner ici le fait que des progrès importants ont également été réalisés récemment dans la miniaturisation des émetteurs-récepteurs sans fil, des microactionneurs et des batteries. Dans un proche avenir, ils devraient être intégrés sur des puces de silicium d'échelle millimétrique, avec une masse de l'ordre de quelques milligrammes. En outre, la collaboration entre l'IEMN et l'entreprise japonaise Sharp a permis la réalisation de micropiles à combustible [25] [26] dont les caractéristiques (taille < 20 mm³, masse ~ 50 mg, puissance de sortie d'environ 1 mW) sont compatibles avec les dispositifs considérés.

Il convient également de réfléchir aux problématiques liées à la communication entre le drone et son environnement ou avec d'autres drones. À notre connaissance, les réseaux de capteurs sans fil mobiles [27] ne traitent pas pour l'instant de situations où les appareils mobiles sont actionnés par des ailes battantes (resp. vibrantes). En effet, les situations rencontrées concernent généralement des microdrones à ailes fixes [28] ou rotatives [29]. Outre le choix de composants électroniques de plus en plus petits pour réaliser les éléments de transmission, il est essentiel de trouver un compromis entre la plage de fréquence et les dimensions de l'antenne. Dans ce contexte, l'utilisation des techniques MEMS [30] et des métamatériaux [31] semble prometteuse. D'un point de vue plus « système », on peut rappeler que de nombreuses solutions existent : on peut citer par exemple les techniques adaptatives pour lesquelles la communication est adaptée en fonction de la gamme disponible ou du débit de données [32] mais également les techniques de gestion de l'énergie [33] [34] puisque c'est un élément non négligeable dans le cas de drones à énergie limitée.

4. Concepts mis en œuvre

Pour résoudre les défis liés à la conception d'un nanodrone à ailes vibrantes, l'équipe OVMI [35] a développé différents concepts innovants en rupture avec ceux utilisés dans les prototypes déjà existants afin de privilégier au maximum l'efficacité énergétique, et de minimiser la masse à vide et le coût de fabrication dans la perspective d'une utilisation à usage unique.

4.1 Résonance

Par définition, travailler à la résonance d'un système mécanique permet non seulement un échange optimal entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, mais également une amplification du mouvement bien supérieure à celle obtenue aux autres fréquences. La figure 7 illustre ce phénomène pour une structure encastree-libre lorsqu'une force sinusoïdale F est appliquée à son extrémité. Ses amplitudes de déplacement z varient en fonction de la fréquence d'actionnement et atteignent un maximum pour la fréquence f_r qui correspond à la fréquence de résonance du système.

Pour mettre en œuvre cette solution dans le cadre de notre prototype, nous avons choisi de faire coïncider la fréquence de résonance des ailes avec la fréquence de l'actionnement. L'objectif est de maximiser le débattement des ailes tout en minimisant la consommation énergétique de l'actionneur. Ce principe est aussi utilisé par Bolsman *et al.* [36] dans le cadre du microdrone à ailes battantes *Atalanta*.

4.2 Torsion passive

Lorsque l'on analyse la déformation des ailes d'insecte, on remarque que celle-ci n'est pas uniquement constituée d'un mouvement de flexion, mais qu'elle est associée à un mouvement de torsion (ou gauchissement) autour de son bord d'attaque (§ 3.2). La torsion est nécessaire à la création de portance puisqu'elle oriente l'aile afin de favoriser la composante verticale de la force aérodynamique lors de son mouvement.

Afin de générer ce mouvement de flexion-torsion, différentes solutions basées sur des systèmes intermédiaires de poutres 3D entre le corps et l'aile, assurant l'essentiel de la rigidité, ont été envisagées. Malheureusement, ces dernières sont source de pertes énergétiques aussi bien que de points de blocage ou de défaillance possibles. Or, à cette échelle, il est primordial d'utiliser l'énergie le plus efficacement possible et de maximiser la fiabilité. Il est donc préférable d'éviter de créer cette torsion de façon active ou à l'aide de structures complexes, mais au contraire de l'obtenir de la façon la plus directe et passive possible. Le but recherché est ainsi d'exciter les ailes, grâce à un mouvement de pilonnement de l'actionneur, sur un mode de flexion et d'obtenir la torsion de manière passive, grâce aux masses excentrées du bord d'attaque de l'aile et aux forces aérodynamiques agissant sur la membrane comme cela est présenté sur la figure 8. On parle ainsi d'une combinaison de mouvement : une flexion active et une torsion passive.

Pour ajuster le mode de résonance de manière à obtenir la cinématique souhaitée, il est nécessaire de déterminer une géométrie et une répartition massique de l'aile adaptées comme cela a été démontré successivement par Dargent *et al.* [37] puis par Tanaka *et al.* [38].

4.3 Technologies MEMS

S'agissant de la réalisation, le principal problème réside dans l'échelle de travail, puisque l'envergure du nanodrone doit être similaire à celle des insectes et donc être comprise entre

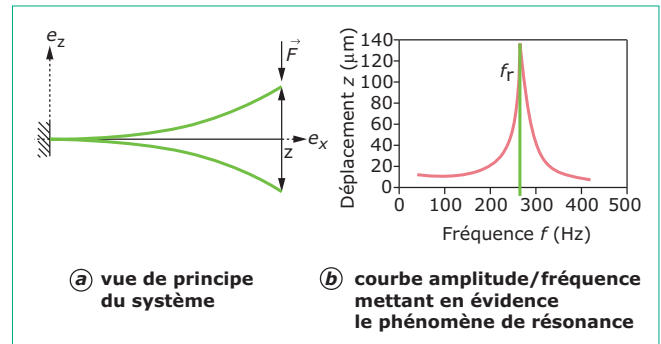


Figure 7 – Modèle de structure encastree-libre avec application d'une force à son extrémité

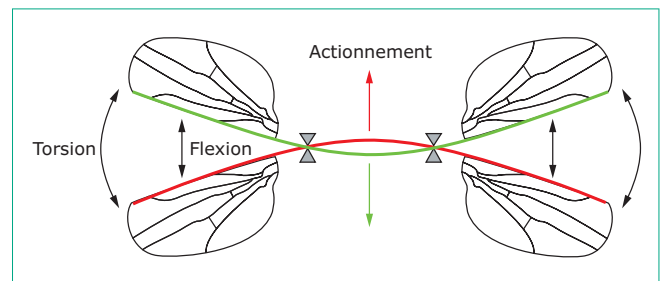


Figure 8 – Schéma illustrant le phénomène de torsion passive

quelques centaines de micromètres et 3 cm. On constate très rapidement que les technologies classiques telles que les techniques horlogères, le découpage laser ou le moulage ne sont *a priori* plus appropriées pour de la fabrication collective à cette échelle. En revanche, les technologies MEMS sont mieux adaptées pour répondre à cette diminution d'échelle. En effet, ces technologies permettent une fabrication collective, avec une grande précision, de structures micrométriques, ce qui est important en termes de coût et de reproductibilité.

C'est donc cette approche que nous avons privilégiée, en choisissant un matériau utilisé couramment dans les technologies de microfabrication, c'est-à-dire, les résines de la série SU-8 2000 Permanent Epoxy Resists [39] (figure 9). Le processus de fabrication est expliqué plus amplement au paragraphe 5.2. Ces résines offrent, de plus, des performances mécaniques proches de celles des ailes des insectes comme explicité dans le paragraphe 5.1.3.

5. Approche OVMI

Au-delà des objectifs présentés dans les paragraphes précédents comme principaux critères de conception et de réalisation, la simplicité et le faible coût de la solution choisie sont des critères prépondérants.

En respectant ce cahier des charges, le prototype s'articule autour d'une structure monolithique comprenant les ailes, le thorax, le tergum, le support de bobine et les liaisons. Le thorax et le support de bobine font 5 mm de diamètre, l'envergure du prototype est de 2 cm et le tergum est une simple barre qui relie les deux ailes au travers d'une liaison souple au centre de laquelle vient se fixer un aimant de 1,5 ou 1 mm de diamètre.



Figure 9 – Exemple de prototypes réalisés en SU-8 par photolithographie sur un wafer en silicium avant l'étape finale de libération

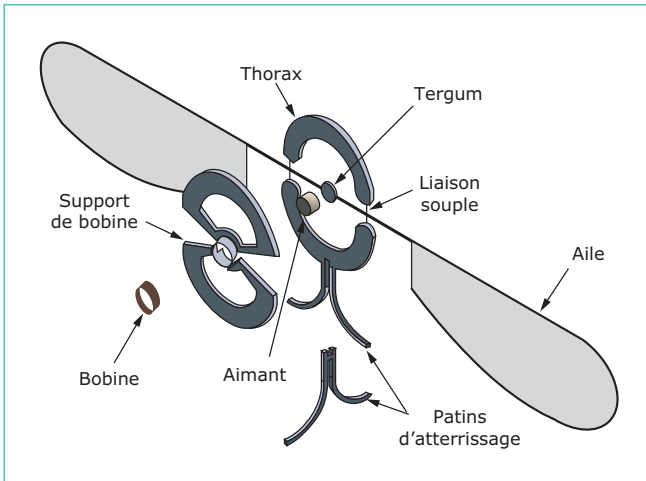


Figure 10 – Vue éclatée de l'OVMI présentant les différents composants

Cet aimant fait partie de l'actionneur électromagnétique utilisé pour exciter le prototype sur la fréquence propre des ailes. La bobine, qui complète ce dispositif et qui doit rester fixe, est collée au support de bobine, lui-même collé au thorax (figure 10). Au passage d'un courant alternatif dans la bobine, l'aimant est mis en mouvement par la force électromagnétique et entraîne la déformation des ailes. À l'heure actuelle, il manque encore un certain nombre de constituants pour pouvoir réaliser des vols autonomes comme par exemple la source d'énergie et le système de contrôle mentionnés précédemment.

Nous décrivons donc dans ce paragraphe les principales caractéristiques techniques de l'OVMI : dans un premier temps, les aspects liés au dimensionnement de l'actionnement, de la structure et des ailes seront abordés, puis dans un second temps la technologie de fabrication utilisée sera présentée en détail.

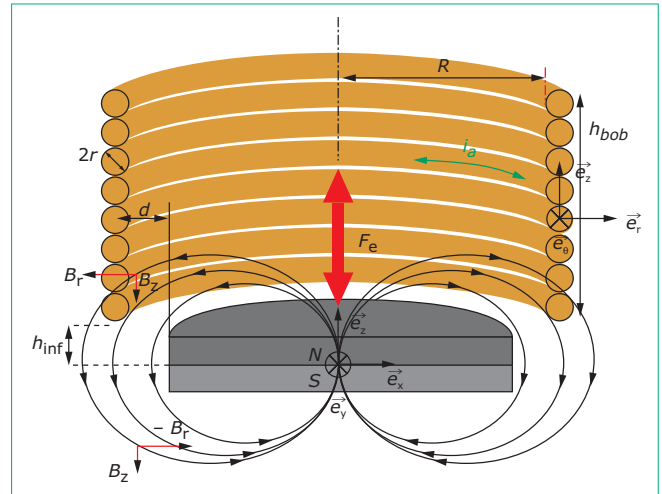


Figure 11 – Vue de principe de l'actionneur électromagnétique [40]

5.1 Conception et dimensionnement

5.1.1 Actionneur

L'actionneur électromagnétique linéaire (figure 11) [40] fonctionne selon le même principe physique que les moteurs électriques rotatifs classiques. Celui-ci consiste à faire passer un courant électrique alternatif i_a dans une bobine fixe de rayon R composée de n spires d'un fil de cuivre de rayon r qui entoure un aimant mobile. Le courant alternatif va interagir avec le champ magnétique \mathbf{B} produit par l'aimant et cette interaction va engendrer une force électromagnétique. Elle ne dépend que de la longueur $d\ell$ du fil dans lequel circule le courant i_a et du champ magnétique \mathbf{B} . Elle peut être exprimée comme suit :

$$d\mathbf{F}_e = i_a d\ell \wedge \mathbf{B} \quad (3)$$

Afin de prédire et optimiser la puissance générée par l'actionnement, différents modèles et expérimentations ont été développés, le principal critère d'optimisation étant le rapport puissance/masse. Dans ce sens, trois paramètres principaux de l'actionneur ont été étudiés : le nombre d'enroulements et le nombre de spires qui les composent ainsi que la position relative de l'aimant et de la bobine.

Le but de l'actionneur est de générer une force F_e verticale (figure 11). Pour cela, si l'on reprend l'équation (3) et étant donné que le courant circule selon \mathbf{e}_{θ_0} , il est nécessaire que celui-ci interagisse avec la composante radiale (dirigée selon \mathbf{e}_r) du champ magnétique \mathbf{B} . Or, cette composante varie en fonction de l'altitude z et de la distance radiale séparant l'aimant et la bobine. Cette répartition (figure 12a, b et c) qui va conditionner la position et la physiologie de la bobine a été évaluée à l'aide de simulations par éléments finis (figure 12a).

La première observation que l'on peut faire à partir de la figure 12 est que la composante radiale du champ magnétique (B_r) décroît considérablement dans la direction radiale. La bobine doit donc se situer au plus près de l'aimant pour optimiser la force magnétique F_e . Toutefois, des limites technologiques ne permettent pas aujourd'hui un positionnement à une distance d inférieure à $250\mu\text{m}$ sans risquer que par endroits l'aimant frotte sur la bobine. On observe sur la

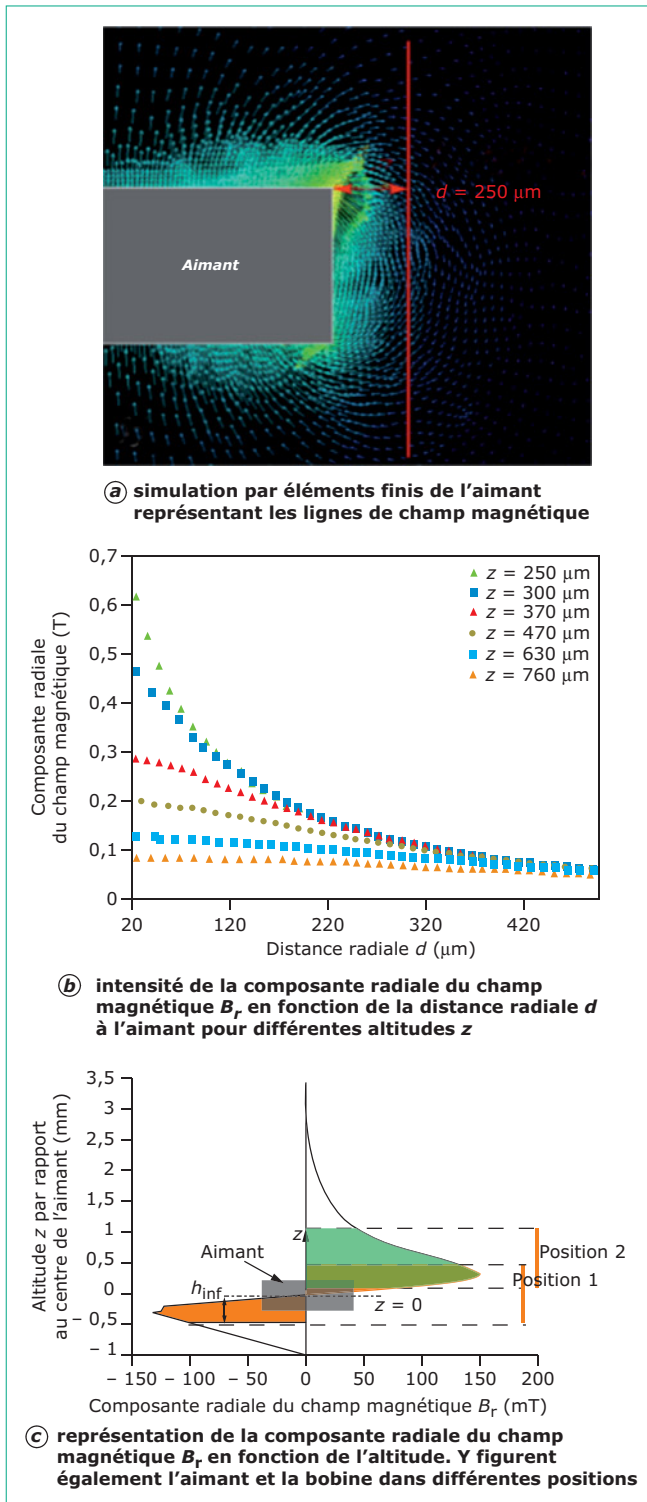


Figure 12 – Variations de la composante radiale du champ magnétique avec l'altitude et la distance radiale

figure 12b qu'à une distance de 400 μm de l'aimant, la valeur du champ n'est plus que de 65 mT. Au-delà de cette distance on considérera donc que la présence d'enroulement n'est plus profitable. La plage « utile » est donc de 150 μm ce qui correspond à un unique enroulement pour un fil de 120 μm de diamètre. De la même façon, en observant la répartition verticale (figure 12c) de B_r à une distance radiale d de l'aimant on peut procéder à une optimisation du nombre de spires de l'enroulement (c'est-à-dire de la hauteur de la bobine) ainsi que de sa position.

Nous pouvons tirer deux conclusions de cette analyse : tout d'abord que la valeur maximale de champ est obtenue pour une hauteur par rapport au centre de l'aimant de 300 μm , mais également qu'à partir de la médiane de l'aimant l'orientation de B_r s'inverse. Cette inversion provoque l'apparition d'une force F_e antagoniste et donc nuisible à l'amplitude du déplacement de l'aimant. Celui-ci étant mobile, la question se pose alors d'identifier jusqu'à quelle profondeur de pénétration de l'aimant dans la bobine cette force n'est pas nuisible à la force globale. La hauteur de la bobine sera alors limitée à 960 μm ce qui correspond à 8 spires. Afin de positionner cette bobine de façon optimale par rapport à l'aimant, nous avons analysé la composante radiale moyenne du champ magnétique B_{rm} s'appliquant sur le courant circulant dans la bobine i_a en fonction de la distance séparant le milieu de l'aimant et le bas de la bobine h_{inf} (figure 13a). Compte tenu de cette analyse, la distance verticale a pu être définie à 350 μm .

À partir du dimensionnement précédent, l'actionneur a été testé : la force délivrée expérimentalement est de l'ordre du millinewton, ce qui correspond aux résultats obtenus lors de la modélisation (figure 13b). Cet effort mécanique, généré par l'actionneur, doit ensuite être transmis aux ailes.

5.1.2 Transmission

Pour les drones à ailes battantes (resp. vibrantes), la transmission a comme fonction de conduire le mouvement de l'actionneur jusqu'aux ailes. Compte tenu de la taille et de la masse de ces prototypes, leur consommation énergétique doit être la plus faible possible. Il est donc exclu d'utiliser des systèmes de transmission actifs qui nécessitent un actionnement supplémentaire. Il est également important de minimiser les zones de frottement au sein des liaisons.

En général, l'actionnement fournit des mouvements élémentaires de rotation ou de translation. Ces derniers doivent donc être transformés par le biais d'un système de transmission afin de conférer aux ailes le mouvement adéquat. Cependant, comme cela a été présenté au paragraphe 3.2, la transformation d'un mouvement simple en un mouvement plus complexe se rapprochant de celui des insectes s'opérera de façon passive au niveau des ailes. Ainsi, la liaison aura dans ce prototype comme principale fonction de transmettre le plus efficacement le mouvement du tergum créé par l'aimant aux ailes et ainsi transformer un mouvement de translation en un mouvement de rotation. De plus, sa conception et sa fabrication doivent être en accord avec les capacités des technologies MEMS. Différentes solutions ont été envisagées [41], cependant la liaison souple (figure 14) est celle qui présente les caractéristiques les plus intéressantes. Ce type de liaison est couramment utilisé dans les technologies MEMS pour transmettre des efforts, en raison des nombreux avantages qu'elles apportent :

- une conception monolithique ;
- une durée de vie prévisible ;
- des déplacements continus ;
- une absence de frottement ;
- aucun assemblage ;
- une absence de jeu.

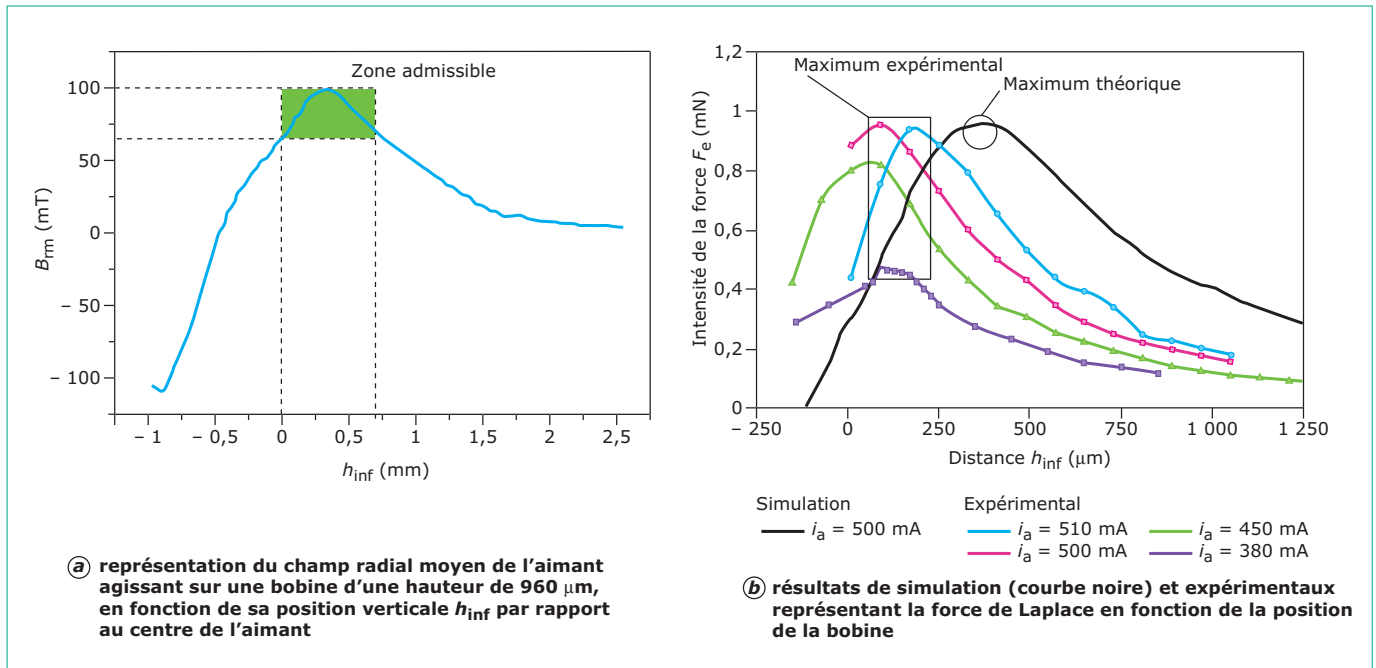


Figure 13 – Évolution du champ radial moyen et de la force magnétique en fonction de la position relative entre la bobine et l'aimant

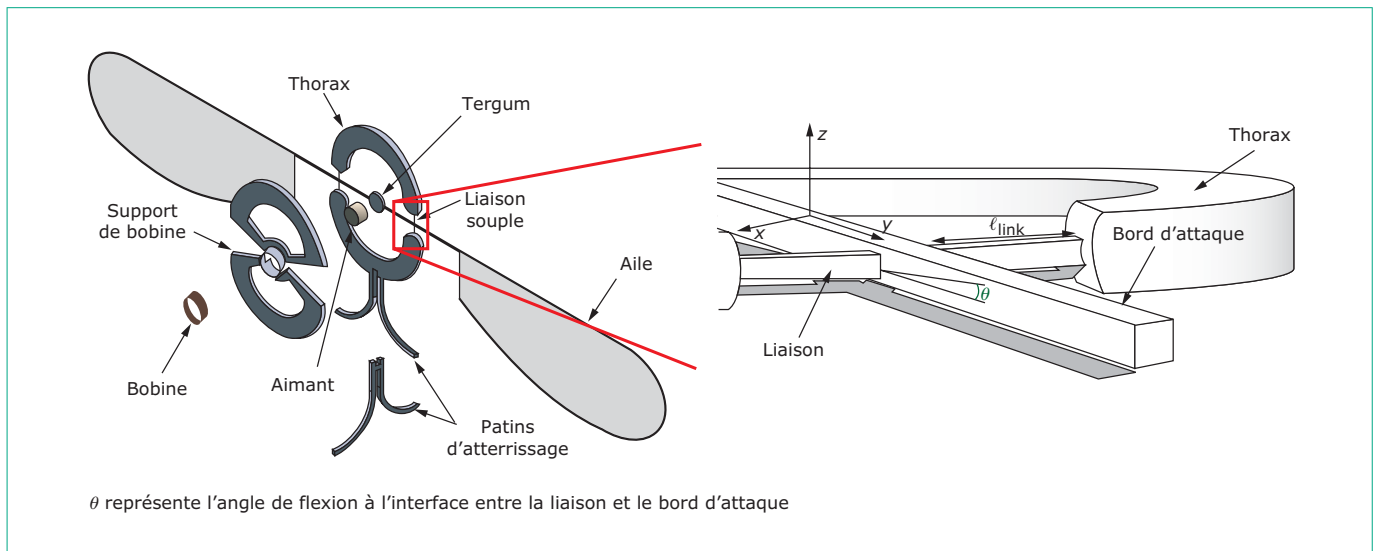


Figure 14 – Représentation de la liaison reliant le bord d'attaque et le thorax

La résine SU-8 possède des propriétés mécaniques (tableau 2) tout à fait adaptées à ce type de liaison.

En effet, la valeur de sa limite élastique est suffisamment grande pour envisager de grandes déformations (~ 50 à 130 MPa) tout en présentant des modules de Young et de cisaillement assez élevés. En outre, ses caractéristiques mécaniques sont proches de celles des insectes (§ 5.1.3 – figure 18).

La géométrie de la liaison doit permettre de limiter le nombre de degrés de liberté de la structure mobile (c'est-à-dire le bord d'attaque). Dans ce cas, on peut alors assimiler la liaison à un ressort imposant le mouvement souhaité. Pour notre application, le mouvement à favoriser est la rotation des liaisons autour de l'axe x (figure 14) afin que le mouvement de battement de l'aimant se transmette sous la forme d'un mouvement de flexion des ailes (maximiser θ).

Tableau 2 – Caractéristiques mécaniques de la SU-8

| Module de Young, E_{SU-8} (GPa) | Masse volumique, ρ_{SU-8} ($kg \cdot m^{-3}$) | Module de cisaillement, G_{SU-8} (GPa) | Limite élastique, R_e [42] [43] (MPa) |
|-----------------------------------|--|--|---|
| 4,6 | 1 190 | 1,88 | 50 à 130 |

Afin de dimensionner les liaisons, une modélisation analytique a été réalisée. Le critère de Von Mises associé à une poutre soumise à une flexion et une torsion, est explicité dans l'équation suivante où R_e représente la limite élastique du matériau :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{fz}^2 + \sigma_{fy}^2 + 3\tau_{torsion}^2} \leq R_e \quad (4)$$

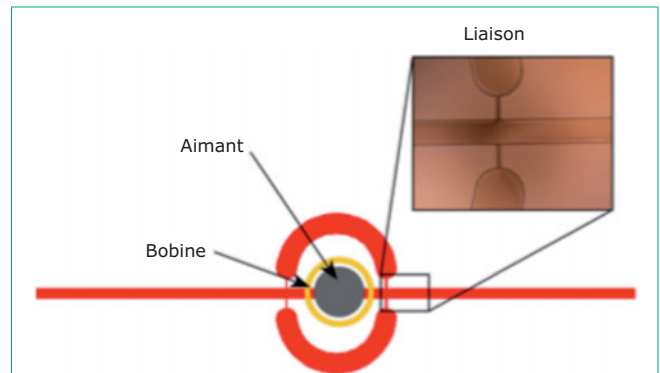
avec σ_{eq} contrainte équivalente,
 σ_{fz}, σ_{fy} contrainte en flexion selon z, selon y,
 $\tau_{torsion}$ contrainte tangentielle (torsion).

L'application numérique du modèle a conduit à définir une liaison optimale de 500 μm de long, 50 μm de large et 50 μm d'épaisseur. Ces dimensions aident à respecter les critères de souplesse pour fournir une rotation sans trop fléchir tout en assurant une résistance suffisante à la rupture. En effet, les résultats analytiques présentent une contrainte cyclique maximale de 46 MPa dans la liaison, ce qui est en dessous de la limite élastique R_e (tableau 2).

Ces calculs ont débouché sur la fabrication d'une série de prototypes avec ce type de liaisons souples (figure 15a). L'actionneur comprend un aimant et une bobine composée de 8 spires avec un fil de cuivre de 40 μm de rayon. La bobine est alimentée par un générateur basse fréquence suivi d'un amplificateur de courant faisant circuler dans la bobine un courant variant de 1 à 1 000 mA pour une fréquence de 80 Hz correspondant à la fréquence de résonance du bord d'attaque.

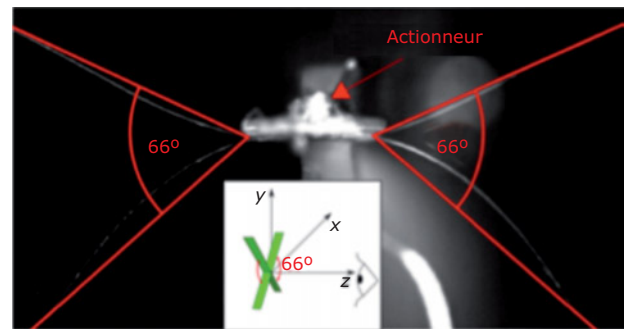
La figure 15b présente les résultats obtenus : ils mettent en évidence un angle de flexion parfaitement symétrique de 66° ce qui est tout à fait propice à la génération de portance. On peut conclure que les liaisons souples développées sont suffisamment robustes et bien dimensionnées pour assurer une plus grande mobilité du bord d'attaque. De plus, la pertinence du choix de la résine SU-8 est validée expérimentalement.

La principale problématique de ce bloc actionnement/transmission est de savoir si la puissance transmise aux ailes sera suffisante pour générer une portance capable de compenser le poids du prototype. Dans ce but, un modèle *bond graph* [S 7 222] de l'ensemble du bloc actionnement/transmission a été réalisé (figure 16), ce langage offrant non seulement une représentation aisée de systèmes multiphysiques mais également une visualisation directe des échanges de puissance. Ce bloc actionnement/transmission peut être décomposé dans le modèle *bond graph* selon deux sous-systèmes distincts : un premier sous-système correspondant au système électromagnétique et un second lié au système mécanique composé de l'aimant, du tergum et des liaisons. Pour chacun de ces sous-systèmes, les puissances dissipées et stockées sont estimées à l'aide des éléments *bond graphs* usuels. Le lecteur pourra se reporter à la référence [44] pour plus de détails.



L'insert présente une vue au microscope optique de la liaison.

(a) schéma de la structure présentant les différents composants du prototype



(b) prise de vue à la caméra rapide montrant un angle de flexion de 66° pour un courant de 840 mA

Figure 15 – Prototype de nanodrone avec transmission par liaison souple [41]

Il est également possible de simuler et d'évaluer les puissances d'entrée et de sortie de chacun des sous-systèmes, puis d'en déduire leur rendement propre en calculant le rapport entre ces deux puissances. Aussi, le rapport entre la puissance mécanique P_m en sortie du système électromagnétique et la puissance électrique injectée dans la bobine P_a conduit à la détermination du rendement du système électromagnétique η_e tandis que le rendement mécanique des liaisons η_m est obtenu à partir du rapport entre la puissance mécanique fournie aux ailes P_u et celle mettant l'aimant en mouvement P_m .

$$P_u = \eta_m \eta_e P_a \quad (5)$$

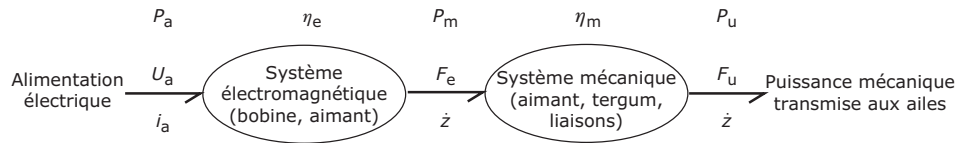


Figure 16 – Bond graph à mots de l'actionneur

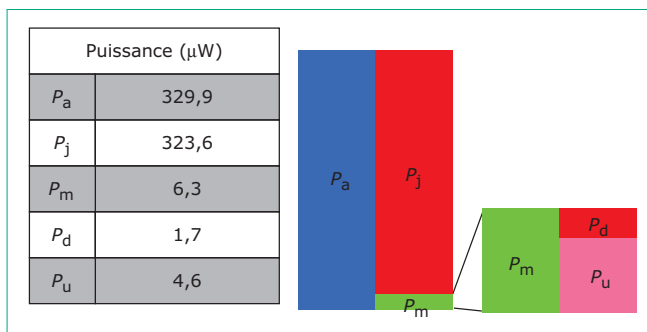


Figure 17 – Bilan de puissance du nanodrone

Les résultats simulés [46] avec ce modèle (figure 17) mettent en évidence une perte de puissance conséquente au niveau de l'actionneur. Sur cette figure, les puissances P_j et P_d sont relatives aux puissances stockées et dissipées dans chacun des sous-systèmes. Afin d'augmenter ce rendement, diverses améliorations peuvent être apportées pour limiter les pertes, en particulier au niveau de la bobine qui dissipe une majeure partie de la puissance électrique. Deux voies peuvent être explorées :

- diminuer la résistance R_b de la bobine ;
- réduire le courant i_a transitant dans la bobine.

Toutefois, cette dernière solution est en première approximation plutôt contre-productive, car en diminuant le courant i_a , la force électromagnétique disponible en sortie d'actionneur diminue également, ce qui réduit le mouvement des ailes. Une solution plus pérenne consisterait à augmenter le champ électromagnétique B ou du moins sa composante qui interagit avec le courant, afin de conserver une force verticale importante [équation (3)].

Bien que le rendement du prototype et plus particulièrement de l'actionneur soit faible, si l'on souhaite faire monter verticalement une masse de 22 mg à une vitesse ascensionnelle de $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, la puissance nécessaire serait alors de $4,2 \mu\text{W}$. La puissance utile P_u fournie par l'actionneur apparaît donc suffisante.

Le paragraphe suivant présentera les ailes qui ont comme rôle primordial de transformer la puissance mécanique fournie par l'actionneur au travers des liaisons en un mouvement complexe générant une force verticale opposée au poids : la portance.

5.1.3 Ailes

Le dimensionnement des ailes d'un drone à ailes vibrantes ou battantes est une tâche difficile surtout en l'absence de savoir-faire bien établi comme c'est le cas traditionnellement pour les avions. Pour pallier cela, la nature est encore utilisée comme source d'inspiration avec des milliers d'insectes volants

disponibles. Leurs ailes ont des formes assez différentes suivant les espèces, (figure 1), mais suivent toutes une organisation plus ou moins complexe de veines et de membranes. Celle-ci est la réponse de l'évolution aux contraintes rencontrées par les insectes dans leur environnement, mais ne correspond pas nécessairement à celle utile pour un drone, comme par exemple le pliage des ailes sur le corps au repos. Aussi pour la conception, on cherchera plus à s'inspirer des ailes d'insectes d'un point de vue mécanique *via*, par exemple, la répartition de masse et de rigidité. Avant de rentrer plus en avant dans les détails de la conception, il est important de noter que celle-ci, par facilité et par souci de gain de temps, est usuellement réalisée de manière empirique, par essais-erreurs expérimentaux, sur les drones, ce qui n'est pas sans conséquence sur les choix technologiques réalisés.

La première étape dans la conception des ailes est de choisir le ou les matériaux que l'on souhaite employer pour leur fabrication. Les ailes actuellement conçues et éprouvées, comme sur le *RoboBee* ou le *Hummingbird*, ont recours de manière systématique à la fibre de carbone, pour les veines, et au Mylar, pour les membranes. Ces matériaux peuvent être manipulés facilement et permettent ainsi un travail expérimental aisé dans les phases préliminaires de conception. Cependant, les ailes obtenues sont relativement rigides et omettent les gains aérodynamiques observés avec des ailes souples.

Dans le cadre d'OVMi et pour bénéficier au maximum des gains attendus de la combinaison aile souple et résonance, il faut s'inspirer plus explicitement des ailes d'insectes et, de plus, choisir un matériau compatible avec les techniques de fabrication MEMS, expliquées plus en détail dans le paragraphe 5.2. Pour cela, le comportement mécanique de différents matériaux a été comparé à celui observé sur les ailes d'insectes selon que le matériau est employé pour les veines ou pour les membranes (figure 18).

On remarque assez rapidement qu'un certain nombre de polymères (SU-8, PDMS, polyimide) partagent un comportement en flexion similaire à celui des veines et membranes d'insectes. Par facilité de fabrication et d'emploi, la résine SU-8 a été sélectionnée car elle bénéficie d'une bonne disponibilité et d'une utilisation abondante dans l'univers des micro-systèmes. De plus, cette résine permet la réalisation d'épaisseurs très variées similaires aux ailes d'insectes.

Initialement, la conception des ailes s'est appuyée sur le développement de poutres en forme de L reproduisant la rigidité structurale et partiellement la cinématique des ailes d'insectes [47]. Sur ce type d'aile, la cinématique n'était pas modifiée par l'ajout de membrane mais réduisait l'amplitude du mouvement. Différentes configurations ont ainsi été testées pour améliorer empiriquement le mouvement, en ajoutant des veines plus ou moins inclinées sur l'aile, en jouant sur les dimensions de la membrane et des veines par exemple. Ce processus d'améliorations empiriques continue, mais de nouvelles stratégies ont été adoptées pour accélérer la conception des ailes.

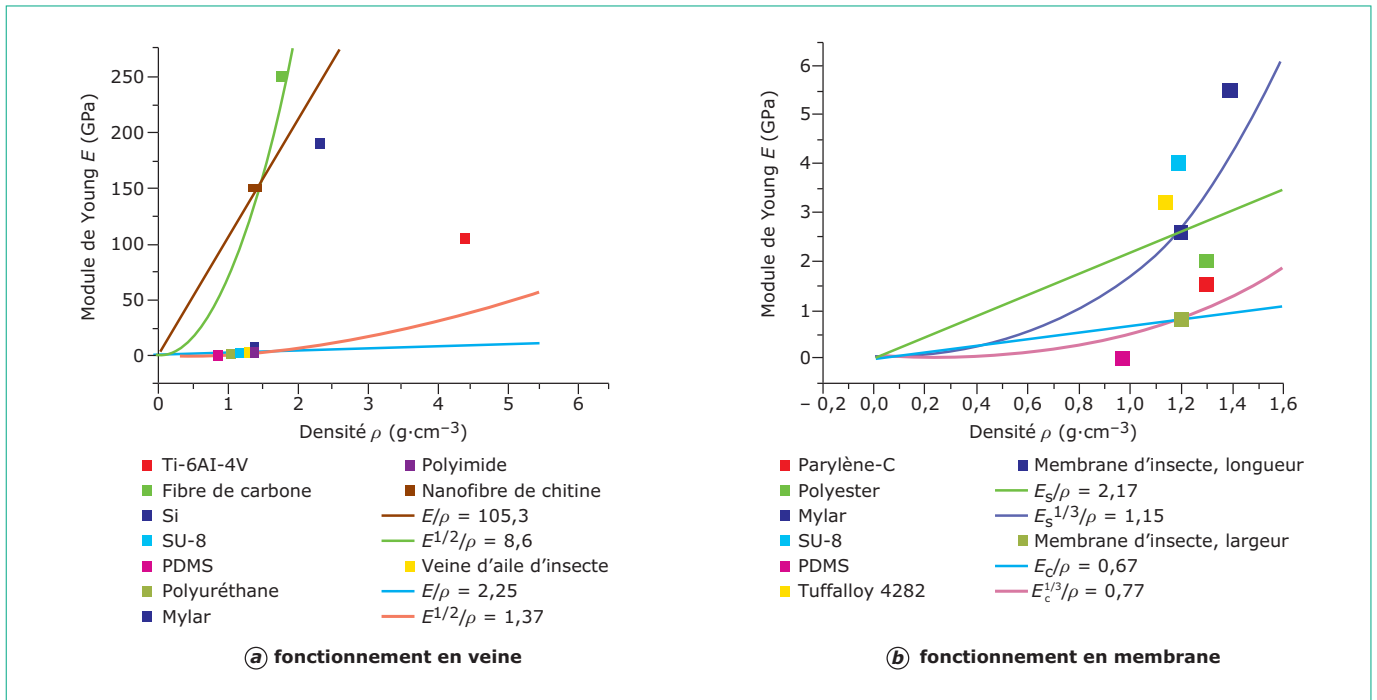


Figure 18 – Comparaison des performances mécaniques de différents matériaux avec ceux rencontrés chez l’insecte pour un fonctionnement en veine (a) et en membrane (b)

En effet, une approche numérique a été initiée pour évaluer une configuration d’ailes de manière relativement rapide et cela en prenant en compte la partie structure de l’aile, *via* notamment la flexibilité, l’aérodynamique spécifique de l’insecte, mais également l’interaction entre ces deux domaines : l’aéroélasticité. Mécaniquement, cela équivaut donc à résoudre l’équation suivante :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K(q)q = F(t, q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (6)$$

où $M, C, K(q)$ représentent le comportement mécanique de l’aile, F représente les forces aérodynamiques s’exerçant sur l’aile et q le vecteur déplacement.

Les modélisations mises en jeu doivent être robustes afin d’évaluer une grande variété de géométries d’ailes dans un temps de calcul relativement faible tout en utilisant une physique suffisamment fiable pour être représentative des phénomènes structuraux, aérodynamiques et aéroélastiques agissant sur les ailes de l’OVMI. Compte tenu de ces critères, une modélisation par éléments finis (EF) de l’aile couplée à un modèle aérodynamique quasi stationnaire du vol de l’insecte a été choisie pour simuler le comportement aéroélastique de l’aile en grands déplacements. En pratique, un battement d’aile est décomposé en plusieurs pas de temps au cours desquels les forces aérodynamiques et la déformation de l’aile sont calculées consécutivement. Ainsi, lors d’un pas de temps, les forces aérodynamiques sont calculées à partir de la cinématique de l’aile et appliquées sur celle-ci. La déformée résultante est établie automatiquement par le modèle EF lors du passage au pas de temps suivant et ainsi de suite. Le modèle aérodynamique a été développé spécifiquement pour rendre compte de la flexibilité de l’aile aussi bien selon l’envergure que selon la corde et permet d’intégrer les effets

aérodynamiques instationnaires majeurs observés chez les insectes volants [48]. L’approche quasi stationnaire, qui fait l’hypothèse que les forces aérodynamiques générées à chaque pas de temps sont les mêmes que celles obtenues en stationnaire par l’aile à vitesse et angle d’attaque identiques, permet d’avoir une formulation des forces aérodynamiques relativement simple et avec une fidélité convenable.

D’autres modèles existent dans la littérature donnant des résultats plus proches de la réalité des ailes d’insectes, mais ils sont également plus contraignants et coûteux à mettre en œuvre. La méthode « *Computational Fluid Dynamic* » peut également être utilisée pour calculer le vecteur force F mais le coût de calcul est alors très important réservant son usage pour des tâches de conception avancée. Une validation expérimentale sur différentes ailes avec et sans membrane a permis de qualifier cette approche aéroélastique pour des tâches de conception préliminaires. Ces ailes s’inspirent librement de la structure des ailes d’insectes en utilisant un bord d’attaque et des veines perpendiculaires tenant une membrane.

Ainsi, différents choix technologiques et de conception peuvent être testés rapidement tout en visualisant directement les conséquences de ceux-ci sur les performances aérodynamiques (figure 19) ou énergétiques de l’OVMI. Le modèle étant suffisamment modulaire et le temps de calcul d’une aile étant relativement faible, des applications d’optimisation sont également disponibles. Ainsi, le modèle a été couplé à un algorithme génétique qui permet, en choisissant correctement la fonction objective, d’optimiser les performances d’une aile et ainsi de souligner des géométries potentiellement intéressantes à tester expérimentalement. Ces outils numériques devraient à terme accélérer le développement de l’OVMI et optimiser ses performances [49].

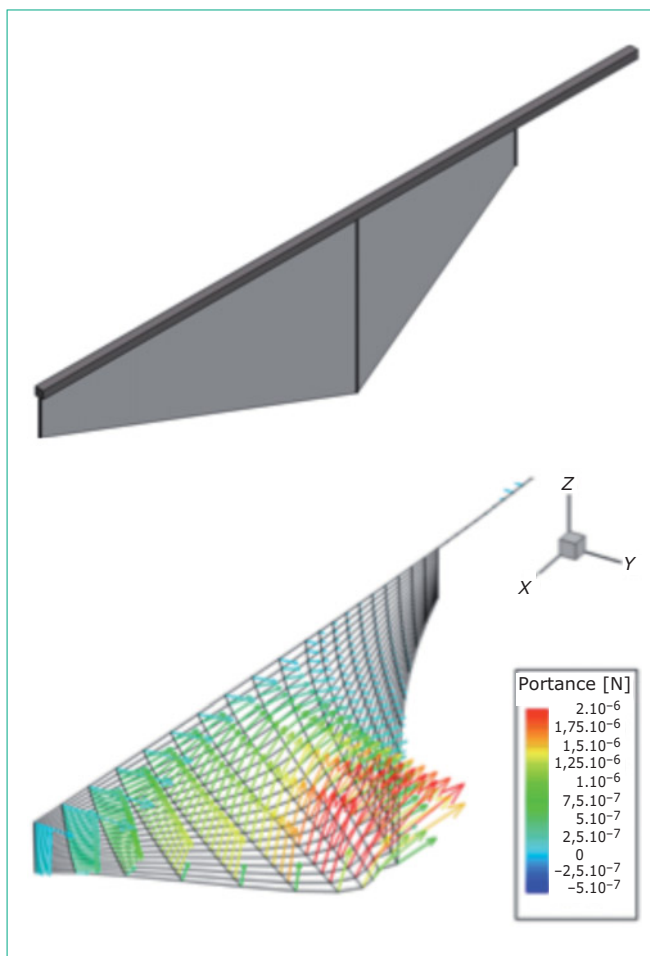


Figure 19 – Exemple de calcul sur une aile permettant de visualiser la déformée instantanée ainsi que les forces aérodynamiques permettant aux concepteurs d’affiner au fur et à mesure l’architecture de l’aile. Des données moyennes par cycle sont également disponibles et plus commodes pour une véritable comparaison

5.2 Fabrication

La fabrication d’un prototype se déroule en deux étapes : la première étape, effectuée en salle blanche, est la réalisation par photolithographie du squelette du prototype constitué du corps et du support. Le corps comprend une partie mobile, des ailes et un tergum, ainsi qu’une partie rigide, le thorax (figure 20). La seconde étape du processus de fabrication consiste en l’assemblage de l’actionneur sur le prototype, son assemblage avec la structure est une phase délicate de la fabrication.

Nous avons privilégié l’utilisation de la photolithographie optique qui est un procédé simple, rapide, reproductible et peu coûteux. Le principe de la photolithographie repose sur la propriété de certaines résines à voir leur solubilité évoluer en fonction de la quantité de radiation ultraviolette (UV, $\lambda = 365 \text{ nm}$) absorbée. La SU-8 est une résine dite « négative » : la partie de la résine exposée aux UV permet

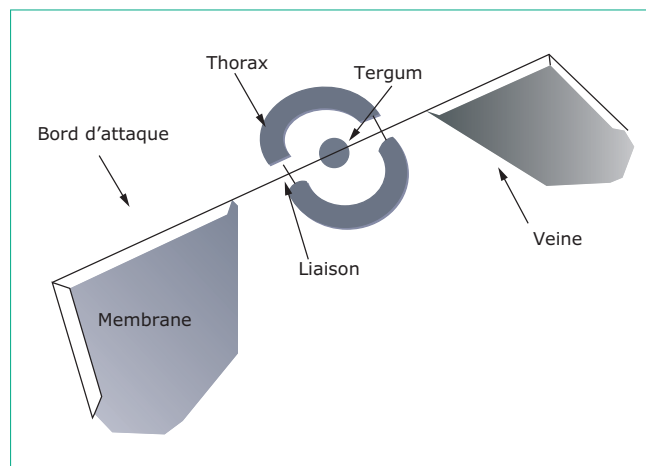


Figure 20 – Vue globale du thorax et de ses différents composants

aux chaînes de molécules de réticuler, ce qui a pour effet que les chaînes auparavant indépendantes s’interconnectent pour créer un réseau. Ainsi, après insolation et lorsque la résine est placée dans son solvant, les parties non insolées vont être solubilisées et les parties insolées, qui ont donc été réticulées, ne seront plus solubles dans le solvant. Pour définir les motifs qui seront insolés, des masques, qui bloquent les UV avec une résolution de l’ordre du micromètre, sont placés entre le substrat et la lampe.

Avant de commencer la fabrication qui se déroule en 5 étapes (figure 21) il est nécessaire d’enduire le substrat d’une résine sacrificielle (Omnicat®) qui permettra de libérer les structures à la fin du procédé de fabrication. La première étape consiste à déposer, par centrifugation, la résine (SU-8) sur le substrat et sert à définir l’épaisseur de la couche déposée [figure 21(1)]. Une fois étalée, une étape de pré-cuisson est requise afin d’assurer l’élimination rapide d’une partie des solvants [figure 21(2)]. L’exposition aux UV est alors réalisée [figure 21(3)] entraînant une polymérisation des zones exposées, et une tenue particulière au solvant de révélation alors que les parties non insolées disparaissent. Cette résine doit être ensuite recuite à 95 °C pendant plusieurs minutes en fonction de l’épaisseur de la couche afin de finaliser sa polymérisation [figure 21(4)]. Soulignons ici que, pour éviter la création de contraintes résiduelles, la montée et la descente en température doit se faire progressivement. Il est possible de répéter ces opérations afin d’augmenter localement une épaisseur (renforcement du bord d’attaque) ou de rajouter des couches d’épaisseurs différentes (membranes des ailes). La dernière étape consiste à développer la résine : le substrat est plongé dans un bain de 1-méthoxy-2-propyl-acétate (PGMEA) ce qui va dissoudre les parties non insolées de la résine sans dégrader les parties insolées [figure 21(5)].

Le procédé de fabrication d’un thorax comporte 5 couches de SU-8 d’épaisseurs différentes, avec pour chaque couche un masque spécifique. Ainsi, on obtient comme épaisseurs 3 μm pour la membrane, 37 à 55 μm pour les veines et les liaisons, entre 70 et 85 μm pour le bord d’attaque et de 130 à 225 μm pour le thorax (figure 22). Une fois les différentes couches de résines structurées, le substrat est plongé dans une solution permettant la dissolution de l’Omnicat® libérant ainsi les structures du substrat.

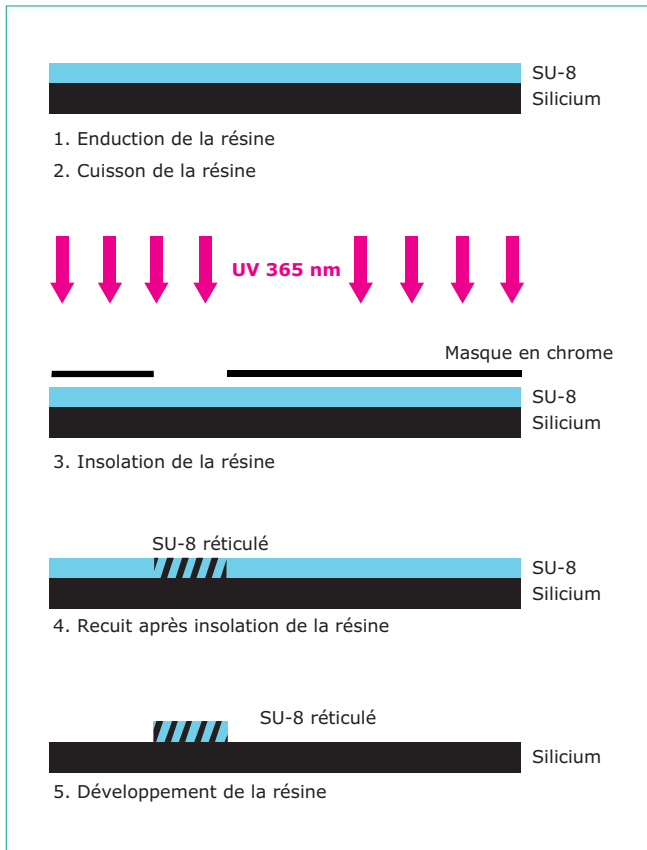


Figure 21 – Présentation du processus de fabrication d'une couche de SU-8



Figure 22 – Plusieurs thorax en SU-8 sur un substrat de silicium de 3 pouces, dont un sans membrane

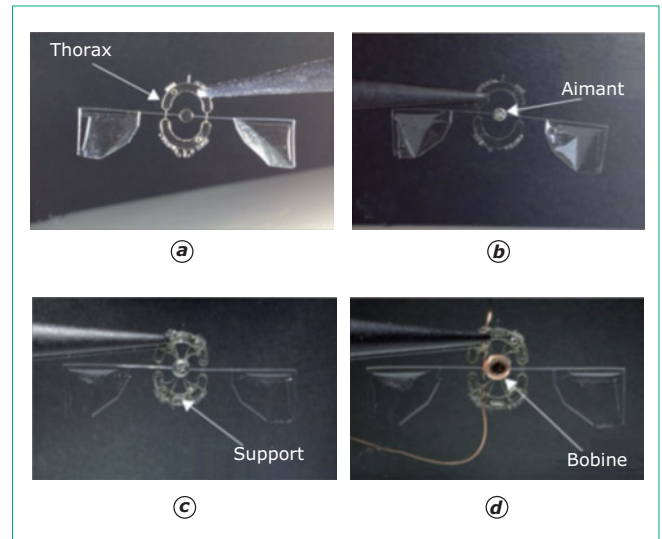


Figure 23 – Séquence d'assemblage du prototype

Lorsque celles-ci sont libérées, l'assemblage des différents composants s'effectue sous une loupe binoculaire. Dans un premier temps, l'aimant est collé au thorax, avec une colle dont le temps de séchage est assez long pour permettre, si besoin, d'ajuster la position de l'aimant sur la structure : le cylindre présent au centre du tergum (figure 23a) a un diamètre égal à celui de l'aimant, afin de centrer l'aimant par rapport au thorax (figure 23b). Dans un second temps, le support de bobine est positionné à l'aide des plots d'alignement mâles sur le thorax et femelles sur le support (figure 23c). Cette pièce assure le positionnement de la bobine par rapport à l'aimant. La colle doit par ailleurs être déposée en faible quantité à des points précis pour ne pas sur-contraindre la structure, car en séchant, elle a tendance à se rétracter. Les extrusions pratiquées dans le support facilitent ce collage. Une fois ce support positionné et collé, il ne reste plus qu'à y fixer la bobine. On la fabrique à la main à l'aide d'un calibre, puis on la centre vis-à-vis de l'aimant grâce au support de positionnement prévu à cet effet. Les fils sont ensuite collés sur les plots de fixation, et on obtient le prototype illustré à la figure 23d.

6. Tests et résultats

Réaliser des mesures sur un prototype est un défi en soi : celles-ci nécessitent d'être faites avec une précision proche du micromètre et à une fréquence d'acquisition supérieure à la vitesse d'actionnement des ailes afin de suivre temporellement leurs évolutions.

6.1 Bancs expérimentaux

Afin d'analyser avec précision le mouvement dans l'espace des ailes de nos prototypes et de pouvoir caractériser les phénomènes induits, plusieurs bancs d'essais ont été mis au point. Durant ces travaux, l'outil principal a été la caméra rapide. Grâce à sa haute fréquence d'acquisition (jusqu'à 6 600 images par seconde en pleine résolution), la caméra

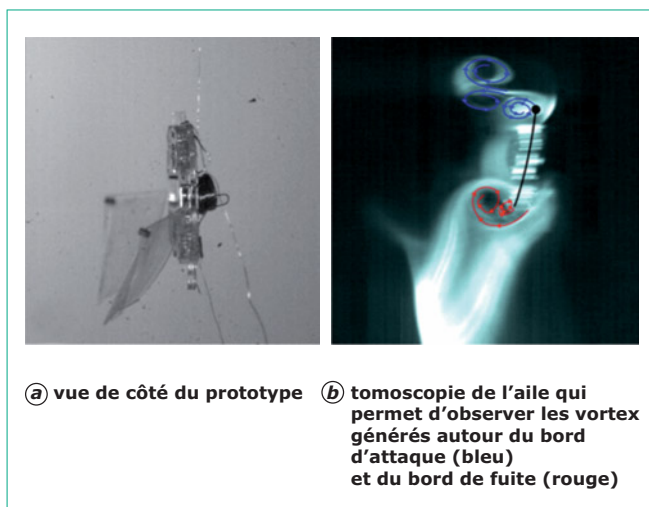


Figure 24 – Images issues de vidéos réalisées avec la caméra Phantom V 7.2

permet de visualiser progressivement et en détail la déformation de l'aile et son évolution au cours du battement (figure 24a). Par exemple, en couplant cette caméra à un logiciel de suivi de points, il est possible d'extraire la cinématique de l'OVMI et ainsi pouvoir travailler quantitativement à son amélioration.

De même, pour appréhender qualitativement les phénomènes aérodynamiques en jeu, la caméra a été couplée à un plan laser et à un injecteur de fumée pour réaliser des essais de tomoscopie laser (figure 24b). Il est ainsi possible de suivre et d'identifier les différents phénomènes tourbillonnaires générés autour et dans le sillage de l'aile, notamment le tourbillon de bord d'attaque et la capture de sillage. Différentes visualisations ont permis de montrer que l'écoulement correspond globalement à celui des insectes [48] [49], validant ainsi le concept d'ailes résonantes utilisé [50][51].

Bien que ces mesures nous fournissent des informations précieuses, il est primordial, afin d'avancer de manière efficace dans l'optimisation de la structure et du mouvement des ailes, d'avoir des informations quantitatives sur la portance générée durant leurs mouvements.

Les capteurs industriels n'étant pas capables de remplir le cahier des charges de telles mesures, une microbalance monocomposante (figure 25) a été développée, permettant de mesurer la dizaine de micronewtons (1 mg) en continu. Grâce aux quatre jauges de contraintes placées de part et d'autre d'une lame d'acier, un bon compromis entre la sensibilité de la balance, sa répétitivité, sa simplicité et sa robustesse est ainsi trouvé permettant le test des prototypes.

6.2 Résultats

Les prototypes réalisés ont une envergure de 3 cm pour une masse totale de 22 mg (figure 26). Le mouvement des ailes doit donc fournir une force aérodynamique verticale de 215 μN pour compenser le poids. Cette force est principalement dépendante de la fréquence de battement des ailes et surtout de notre capacité à reproduire un mouvement et une déformation des ailes artificielles proches de ceux des insectes (figure 4).

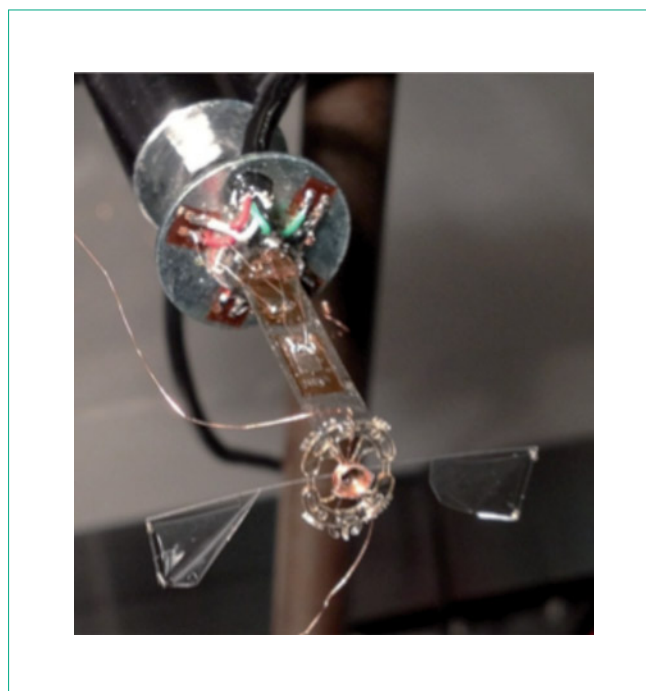


Figure 25 – Montage de l'OVMI sur la balance afin de mesurer la portance générée lors de l'actionnement des ailes

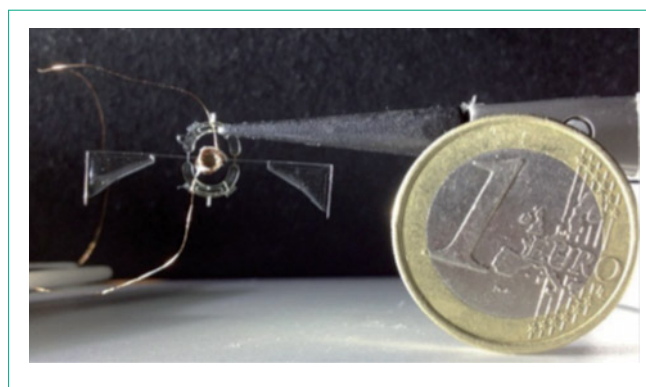


Figure 26 – Vue de face d'un prototype

Pour améliorer la cinématique, la position du centre de masse des ailes a été modifiée par l'ajout de masselottes ($\sim 500 \mu\text{g}$) en différents points de l'aile. Grâce à ces modifications, une cinématique (figure 27) proche de celle des insectes a été atteinte. Celle-ci peut être caractérisée par une fréquence de battement de 19,4 Hz, un angle de flexion important ($\sim 40^\circ$) et un angle d'attaque adéquat (torsion) de 55° . En outre, elle permet de favoriser la composante verticale de la force aérodynamique. La force verticale moyenne mesurée lors de ces essais a mis en évidence la création d'une portance de 169 μN correspondant à 75 % du poids total du prototype. Ces résultats sont essentiels dans la mesure où ils démontrent la capacité du prototype à réaliser une cinématique productive de portance.

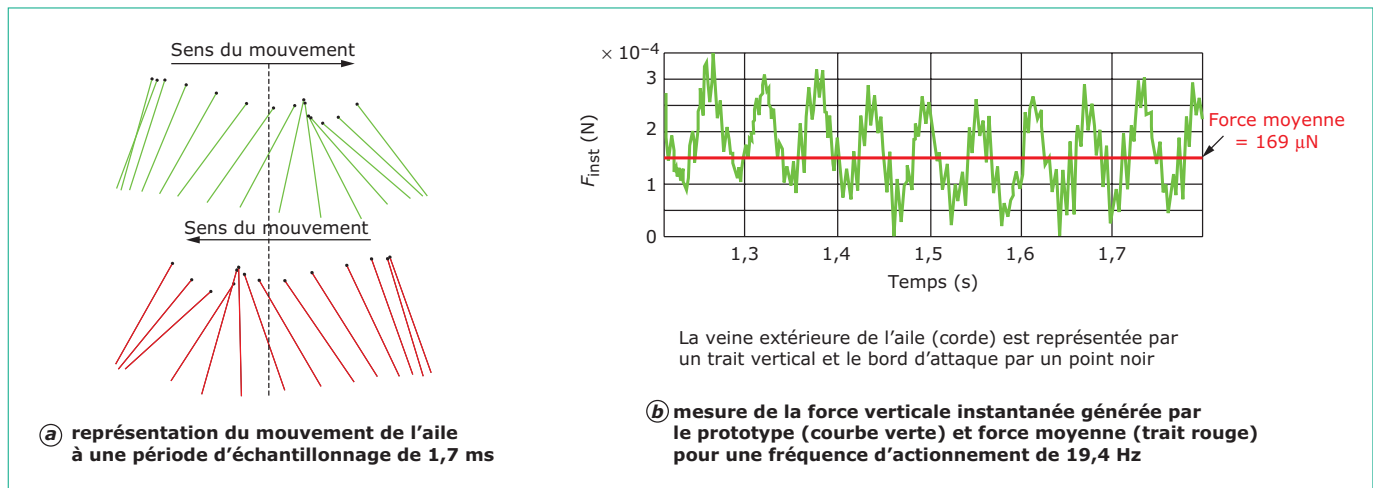


Figure 27 – Résultats obtenus avec un prototype : mouvement des ailes et portance

7. Conclusion et perspectives

Les nanodrones à ailes vibrantes ont aujourd'hui atteint une certaine maturité au niveau du processus de fabrication et de la modélisation aéroélastique. En outre, ce prototype est *a priori* le premier de la taille d'un insecte capable de créer de la portance à l'aide d'une torsion passive et ce, sans aucune articulation. Les objectifs futurs sont, d'une part, de produire des portances suffisantes pour le vol, d'autre part, de concevoir et de mettre en œuvre les fonctionnalités électroniques nécessaires pour un contrôle à distance.

Ces nouveaux travaux incluent d'abord l'utilisation des outils de modélisation et des moyens expérimentaux développés précédemment afin d'optimiser la structure et l'actionnement électromagnétique en termes de poids et de consommation d'énergie.

Puis le but sera d'obtenir la cinématique optimale nécessaire au vol de l'insecte artificiel. L'outil aéroélastique aidera à déterminer la géométrie d'aile la mieux adaptée et des expériences viendront compléter les prédictions numériques.

La recherche portera ensuite sur le choix et la minimisation des composants électroniques tels que des microcontrôleurs et des accéléromètres ou des gyroscopes afin de permettre la manœuvrabilité du nanodrone et un jour sans doute le contournement d'obstacles. Les caractéristiques électroniques telles que les commandes de vol et de détection d'altitude seront d'abord validées sur des prototypes d'échelle centimé-

trique et l'approche adoptée sera de fabriquer une puce intégrant tous ces composants. De plus, les sources d'énergie nécessaires pour alimenter ces composants seront identifiées.

Enfin, l'étude portera sur l'analyse de scénarios de communication pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles conformes aux caractéristiques et contraintes des capteurs du nanodrone : c'est-à-dire soit pour des capteurs dont la position dans l'espace peut être contrôlée, et qui peuvent potentiellement agir sur leur environnement, soit pour des capteurs avec très peu de ressource énergétique et de faible encombrement.

En conclusion, la capacité des insectes au vol stationnaire, associée à une transition rapide vers l'avant, constitue une plate-forme idéale pour la surveillance, la recherche et le sauvetage d'individus. Par ailleurs, la compréhension du vol battu et le contrôle des matériaux avec de fortes déformations peuvent avoir des retombées importantes dans les domaines des microsystèmes et en particulier en microfluidique et en électronique flexible.

Remerciements

Ces recherches ont reçu le soutien de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet CLEAR-Flight (ANR 13-ASTR-0012-01-Projet DGA CLEAR-flight), de la fondation Airbus et du réseau RENATECH.

Développement d'un insecte artificiel

Nanodrone dédié à la surveillance intra-bâtiment

par **Thomas VANNESTE**

Ingénieur, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Alexandre BONTEMPS

Ingénieur Sensefly, Cheseaux-Lausanne, Suisse

Caroline SOYER

Maître de conférences à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Jean-Bernard PAQUET

Ingénieur de recherche à l'Office national d'étude et de recherche aérospatiale, Lille, France

Olivier THOMAS

Professeur des universités au Campus de Lille d'Arts et Métiers ParisTech et au Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes (LSIS, UMR CNRS 7296), France

Eric CATTAN

Professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

et **Sébastien GRONDEL**

Professeur à l'École nationale supérieure d'ingénieurs en informatique, automatique, mécanique, énergétique électronique (ENSIAME), Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Valenciennes (IEMN, UMR CNRS 8520), France

Sources bibliographiques

- [1] GRASMEYER (J.) et KEENNON (M.). – *Development of the black widow micro air vehicle*. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, NV, États-Unis, p. 1-9 (2001).
- [2] ProxDynamics
<http://www.proxdynamics.com/products/>
Dernière consultation : 16/05/2015
- [3] BRUGGEMAN (B.). – *Improving flight performance of DelFly II in hover by improving wing design and driving mechanism*. Delft Univ. Technol. M. Sc. thesis (2010).
- [4] AeroVironement Inc.
<http://www.avinc.com/>
Dernière consultation : 16/05/2015
- [5] CHIRARATTANANON (P.), MA (K.Y.) et WOOD (R.J.). – *Adaptive control of a millimeter-scale flapping-wing robot*. Bioinspir. Biomim., 9, 025004 (2014).
- [6] KARPELSON (M.) et WOOD (R.J.). – *A review of actuation and power electronics options for flapping-wing robotic insects*. 2008 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., p. 779-786 (2008).
- [7] BOLSMAN (C.T.). – *Flapping wing actuation using resonant compliant mechanisms*. Technische Universiteit Delft (2010).
- [8] ELLINGTON (C.P.). – *The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics*. Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci., 305, p. 41-78 (1984).
- [9] ENNOS (A.R.). – *Inertial and aerodynamic torques on the wings of Diptera in flight*. J. Exp. Biol., 142, p. 87-95 (1989).
- [10] ELLINGTON (C.P.). – *The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles*. J. Exp. Biol., 202, p. 3439-3448 (1999).
- [11] FRY (S.N.), SAYAMAN (R.) et DICKINSON (M.H.). – *The aerodynamics of hovering flight in Drosophila*. J. Exp. Biol., 208, p. 2303-2318 (2005).
- [12] DARGENT (T.). – *Microsystème à ailes vibrantes: utilisation des technologies MEMS pour la réalisation d'un microdrone bioinspiré*. PhD Thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (2010).
- [13] LEHMANN (F.-O.). – *The mechanisms of lift enhancement in insect flight*. Naturwissenschaften, 91, p. 101-122 (2004).
- [14] DUDLEY (R.). – *The biomechanics of insect flight*. Princeton University Press (2002).
- [15] ETKIN (B.L.R.). – *Dynamics of flight*. Wiley, New York (1996).

- [16] OPPENHEIMER (M.), DOMAN (D.) et SIGTHORSSON (D.). – *Dynamics and control of a biomimetic vehicle using biased wingbeat forcing functions : Part 2 – Controller (postprint)*. Air Force Research Lab Wright-Patterson AFB OH Air Vehicles Directorate, États-Unis (2010).
- [17] OPPENHEIMER (M.). – *Dynamics and control of a minimally actuated biomimetic vehicle : Part II – Control*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Chicago, IL, États-Unis (2011).
- [18] WOOD (R.J.). – *The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect*. Robot. IEEE Trans., 24, p. 341-347 (2008).
- [19] HEDRICK (T.L.) et DANIEL (T.L.). – *Flight control in the hawkmoth *manduca sexta* : the inverse problem of hovering*. J. Exp. Biol., 209, p. 3114-3130 (2006).
- [20] SANE (S.P.) et DICKINSON (M.H.). – *The control of flight force by a flapping wing : lift and drag production*. J. Exp. Biol., 204, p. 2607-2626 (2001).
- [21] SANE (S.P.) et DICKINSON (M.H.). – *The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight*. J. Exp. Biol., 205, p. 1087-1096 (2002).
- [22] ORLOWSKI (C.T.) et al. – *Dynamics, stability, and control analyses of flapping wing micro-air vehicles*. Rev. Artic. Prog. Aerosp. Sci., 51, p. 18-30 (2012).
- [23] BOLENDER (M.). – *Rigid multi-body equations-of-motion for flapping wing mavs using kane's equations*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Chicago, IL, États-Unis (2009).
- [24] PÉREZ-ARANCIBIA (N.O.), MA (K.Y.), GALLOWAY (K.C.), GREENBERG (J.D.) et WOOD (R.J.). – *First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot*. Bioinspir. Biomim., 6, 036009 (2011).
- [25] KAMITANI (A.), MORISHITA (S.), KOTAKI (H.) et ARSCOTT (S.). – *Miniaturized microDMFC using silicon microsystems techniques : performances at low fuel flow rates*. J. Micro-mechanics Microengineering, 18, 125019 (2008).
- [26] KAMITANI (A.), MORISHITA (S.), KOTAKI (H.) et ARSCOTT (S.). – *Improved fuel use efficiency in microchannel direct methanol fuel cells using a hydrophilic macroporous layer*. J. Power Sources, 187, p. 148-155 (2009).
- [27] ALLRED (J.) et al. – *An airborne wireless sensor network of micro-air vehicles*. 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys (2007).
- [28] HEYI et al. – *A novel cognitive ultra wideband MAVCOM*. Microw. Millim. Wave Technol., 4 (2012).
- [29] KUSHLEYEV (A.), MELLINGER (D.), POWERS (C.) et KUMAR (V.). – *Towards a swarm of agile micro quadrotors*. Auton. Robots, 35, p. 287-300 (2013).
- [30] HILBERT (J.L.). – *RF-MEMS for wireless communications*. IEEE Commun. Mag., 46.
- [31] FOROOZESH (A.L.S.). – *Size reduction of a microstrip antenna with dielectric superstrate using meta-materials : artificial magnetic conductors versus magneto-dielectrics*. Antennas and Propagation Society International Symposium (2006).
- [32] HUNG-MIN SUN et al. – *An efficient and scalable key management protocol for secure group communications in wireless sensor networks*. Comput. Commun. (2007).
- [33] LAHIRI (K.E.) et al. – *Communication-based power management*. IEEE Des. Test Comput., 19 (2002).
- [34] SHAH (P.) et al. – *Power management using zigBee wireless sensor network*. Emerg. Trends Eng. Technol. (2008).
- [35] VANNESTE (T.), BONTEMPS (A.), SOYER (C.) et GRONDEL (S.). – <http://ovmi.iemn.univ-lille1.fr/>
- [36] BOLSMAN (C.T.), GOOSEN (J.F.L.) et Van KEULEN (F.). – *Insect-inspired wing actuation structures based on ring-type resonators*. Proc. SPIE, 6928, 69281I-69281I-12 (2008).
- [37] DARGENT (T.), GRONDEL (S.), PAQUET (J.B.), CATTAN (E.) et SOYER (C.). – *Vibrating wing analysis with passive torsion for micro flying robot*. Intelligent Robots and Systems, IROS 2008, Nice, France, p. 451-457 (2008).
- [38] TANAKA (H.) et WOOD (R.J.). – *Fabrication of corrugated artificial insect wings using laser micromachined molds*. J. Micromechanics Microengineering, 20, 075008 (2010).
- [39] Microchemical. – *SU-8 2000 Permanent epoxy negative photoresist processing guidelines* (2000).
- [40] BONTEMPS (A.), VANNESTE (T.), PAQUET (J.-B.), DIETSCH (T.), GRONDEL (S.) et CATTAN (E.). – *Design and performance of an insect-inspired nano air vehicle*. Smart Mater. Struct., 22, 014008 (2013).
- [41] BONTEMPS (A.). – *Prototypage d'un objet volant mimant l'insecte*. PhD thesis, Université de Valenciennes (2013).
- [42] SCHMID (S.) et HIEROLD (C.). – *Damping mechanisms of single-clamped and prestressed double-clamped resonant polymer microbeams*. J. Appl. Phys., 104, 093516 (2008).
- [43] MCALEAVEY (A.), COLES (G.), EDWARDS (R.L.) et SHARPE (W.N.). – *Mechanical properties of SU-8*. MRS Proc., 546, 1998 (2011).
- [44] BONTEMPS (A.), GRONDEL (S.), VANNESTE (T.), DUPONT (S.) et CATTAN (E.). – *Modeling and evaluation of power transmission of flapping wing nano air vehicle*. In Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on IEEE, p. 1-6, sept. 2014.
- [45] WEGST (U.G.K.) et ASHBY (M.F.). – *The mechanical efficiency of natural materials*. Philos. Mag., 84, p. 2167-2186 (2004).
- [46] BAO (X.Q.), VANNESTE (T.), BONTEMPS (A.), GRONDEL (S.), PAQUET (J.B.) et CATTAN (E.). – *Microfabrication of bio-inspired SU-8 wings and initial analyses of their aeroelastic behaviours for microrobotic insects*. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket, Thailand : IEEE, p. 1487-1494 (2011).
- [47] BAO (X.Q.), DARGENT (T.) et CATTAN (E.). – *Micromachining SU-8 pivot structures using AZ photoresist as direct sacrificial layers for a large wing displacement*. J. Micromechanics Microengineering, 20, 025005 (2010).
- [48] ANSARI (S.), ZBIKOWSKI (R.) et KNOWLES (K.). – *Aerodynamic modelling of insect-like flapping flight for micro air vehicles*. Prog. Aerosp. Sci., 42, p. 129-172 (2006).
- [49] SANE (S.P.). – *The aerodynamics of insect flight*. Journal of experimental biology, 206(23), p. 4191-4208 (2003).
- [50] VANNESTE (T.). – *Aeroelastic framework of insect-like apping-wing applied to the design of a resonant nano air vehicle*. PhD Thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (2013).
- [51] VANNESTE (T.), BOUREZ (J.P.), PAQUET (J.B.), GRONDEL (S.) et CATTAN (E.). – *Visualisation de l'écoulement autour d'une aile d'insecte artificielle*. Actes du 14^e Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, FLUVISU 14, Lille, France, 22-25 novembre, 2011, session 22, CD-ROM, papier 1, 9 p., ISBN 978-2-918241-07-2 (2011).

À lire également dans nos bases

DAUPHIN-TANGUY (G.). – *Les bond graphs et leur application en mécatronique*. [S 7 222] Informatique industrielle (1999).



RESSOURCES DOCUMENTAIRES FORMATION CONSEIL

Plus de 8000 articles scientifiques et techniques en français et les services associés pour aller plus loin dans vos recherches documentaires et bibliographiques.

Techniques de l'ingénieur est la base de référence des bureaux d'études et de la conception, de la R&D, de la recherche et de l'innovation industrielle.



RESSOURCES DOCUMENTAIRES FORMATION CONSEIL

Les experts de Techniques de l'Ingénieur partagent leurs savoir-faire techniques et organisationnels.

Montez en compétence grâce aux journées techniques et formations HSE ou privilégiez un parcours sur mesure développé par les conseillers formation et réalisé à vos dates et dans votre établissement.



RESSOURCES DOCUMENTAIRES FORMATION CONSEIL

Tout l'ADN de Techniques de l'Ingénieur à votre disposition.

Les experts et spécialistes scientifiques de Techniques de l'Ingénieur, praticiens expérimentés, vous accompagnent tout au long de vos projets pour vous conseiller : diagnostics, recommandations techniques et montée en capacité de votre R&D jusqu'à l'innovation.

LES THÉMATIQUES COUVERTES

Sciences fondamentales
Génie industriel
Procédés Chimie-Agro-Bio
Mesures - Analyse
Matériaux
Mécanique
Énergies

Électronique - Automatique
Technologies de l'information
Construction
Innovations
Environnement - Sécurité
Transports
Biomédical - Pharma

Accédez à l'information la plus pertinente, approuvée par plus de 300 000 utilisateurs parmi vos clients, fournisseurs ou partenaires, grâce à votre abonnement aux ressources documentaires et services inclus (1) :



SÉMINAIRES EN LIGNE : profitez, tout au long de l'année, de formations à distance sur le thème : « Optimiser sa veille scientifique et technologique avec Techniques de l'Ingénieur ». Ces séminaires vous montrent comment exploiter au mieux les ressources et fonctionnalités de techniques-ingenieur.fr et améliorer la pertinence de vos résultats de recherche.



SERVICE QUESTIONS-RÉPONSES : Besoin de compléments d'information ou de validation pour mieux prendre vos décisions ? Posez des questions techniques, scientifiques, réglementaires, juridiques ou encore économiques aux plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires, c'est compris dans votre abonnement !



DICTIONNAIRE TECHNIQUE MULTILINGUE : cet outil en ligne propose plus de 45 000 termes scientifiques et techniques relatifs aux domaines qui vous concernent. Pour 10 000 d'entre eux, retrouvez des illustrations, avec légendes, elles aussi toujours traduites en 4 langues.



ARTICLES DÉCOUVERTE : bénéficiez d'un crédit de 1 à 5 articles au choix, à consulter gratuitement, dans les bases documentaires auxquelles vous n'êtes pas abonné.



COMPLÉMENT 360 : en complément des ressources documentaires comprises dans votre abonnement, utilisez cet outil pour approfondir vos recherches en découvrant les autres publications également disponibles sur internet. Vous accédez à toutes les références bibliographiques liées au sujet qui vous concerne.



ANNUAIRE DES LABORATOIRES ET CENTRES DE RECHERCHE : pour chacune des bases documentaires, vous avez à disposition une sélection pertinente des 15 premiers centres de recherche, profils de chercheur, projets et publications parmi les données de plus de 50 000 centres de recherche privés et publics.



ARCHIVES : accédez aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.



SERVICE ACTUALITÉ : pour une vision globale et quotidienne de l'actualité et des innovations technologiques, Techniques de l'Ingénieur met à votre disposition un service de Veille & Actualités. Ce service regroupe en 11 thématiques les grands domaines de l'ingénierie pour donner au lecteur une visibilité globale des dernières innovations.



MOBILITÉ : Techniques de l'Ingénieur propose un site internet intégralement compatible mobile et tablettes (iPad).

ET AUSSI : le statut d'abonné vous donne accès à des prestations complémentaires, sur devis : **l'impression à la demande** pour obtenir un ou plusieurs ouvrages supplémentaires (versions imprimées de vos bases documentaires) ou encore **la traduction d'un article** dans la langue de votre choix.

(1) La disponibilité des services dépend du périmètre de votre abonnement.

En savoir plus ou découvrir le contenu de Techniques de l'Ingénieur ?

Les conseillers régionaux de Techniques de l'Ingénieur sont à votre écoute pour vous proposer des solutions sur mesure.

Pour recevoir, sans engagement de votre part, toute l'information sur les produits des Techniques de l'Ingénieur, complétez cette demande d'information.



A retourner à :

Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée
75925 Paris cedex 19
Tél. : 01 53 35 20 20
Fax : 01 53 26 79 18
email : infos.clients@teching.com

72/WQ/BM1201

M. Mme

Nom : Prénom :

Société/Organisme :

Adresse :

CP : [] [] [] [] Ville :

Tél. : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] Fax : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Email :

Effectif :

NAF :

