

# CIGI 2021

## L'optimisation hybride multidisciplinaire pour concevoir les produits de demain

---

**Résumé** – Utilisée en aéronautique pour améliorer une bonne solution aérodynamique et structurelle (forme d'aile) par l'algorithme du gradient (méthode adjointe), l'optimisation multidisciplinaire (*MDO : Multidisciplinary Design Optimisation*) cherche à trouver les meilleurs compromis entre les divers métiers. Mais elle ne peut trouver des solutions radicalement nouvelles que par l'emploi de méthodes d'optimisation globale (algorithmes génétiques, recuit simulé...) dont les temps de calcul sont le plus souvent rédhibitoires. Cependant l'hybridation de méthodes d'optimisation globale et locale pallie cette difficulté en accélérant considérablement la vitesse de convergence. Cet article montre l'apport de méthodes d'optimisation hybride à la conception d'un drone à voilure fixe (Cabiota). Il en souligne également les limites ainsi que les caractéristiques attendues des méthodes d'optimisation multidisciplinaire pour les rendre applicables à tous les domaines d'ingénierie. Elles concernent notamment l'aéronautique civile qui doit améliorer le bilan carbone des avions de ligne, dont la configuration n'a guère évolué depuis les premiers avions à réaction (Boeing 707).

**Abstract** – Used in Aeronautics to improve a good aerodynamic and structural solution (wing shape) by the gradient algorithm (adjunct method), Multidisciplinary Design Optimisation (MDO) seeks to find the best compromises between various disciplines. However, it can only obtain radically better solutions when involving global optimisation methods (e.g. genetic algorithms, simulated annealing, etc.) for which the computation times are usually prohibitive. Some hybridisation between global and local optimisation methods can nevertheless overcome such difficulty by considerably accelerating the speed of convergence. This article shows the application of hybrid optimisation methods to the design of a fixed-wing drone (Cabiota). It also tries to highlight the advantages of such methods as well as their current limitations so that MDO can be applied to many more engineering fields. These methods can, in particular, be of interest in civil aeronautics, where carbon footprint of airliners must be reduced significantly in the near future and where aeroplane designs have not changed much since the first jets (i.e. Boeing 707).

**Mots clés** – Conception, MDO, Optimisation multidisciplinaire, Optimisation hybride, drone.

**Keywords** – Design, MDO, Multidisciplinary Design Optimisation, Hybrid optimisation, drone, UAV.

---

### 1 INTRODUCTION

L'Optimisation de Conception Multidisciplinaire (*Multidisciplinary Design Optimisation*, soit MDO en anglais) est un domaine d'ingénierie qui cherche à résoudre des problèmes de conception optimale mettant en œuvre plusieurs disciplines [Vanderplaats, 2007]. L'optimum trouvé est alors meilleur que celui obtenu en optimisant chacune des disciplines indépendamment des autres, car il prend en compte leurs interactions. Recouvrant différents métiers, cette recherche d'un optimum global entraîne cependant de la complexité et un surcoût en temps de calcul souvent rédhibitoire.

L'optimisation multidisciplinaire est déjà utilisée en aéronautique pour améliorer une bonne solution aérodynamique et structurelle (forme d'aile) par l'algorithme du gradient (calculé par la méthode adjointe). Mais une méthode d'optimisation locale ne permet pas de trouver des solutions radicalement nouvelles placées aux optima globaux, car elle reste bloquée sur l'optimum local situé au voisinage des solutions connues. Par ailleurs, les variables de nature diverse (réel, entier, alphanumérique) interdisent tout calcul de dérivée et seuls les résultats de la fonction critère et des

fonctions contraintes sont généralement accessibles, par calcul ou simulation, pour chacune des configurations de variables.

Des méthodes d'optimisation globale, telles que les algorithmes génétiques ou le recuit simulé, sont susceptibles de trouver de bonnes solutions, sans cependant garantir de leur optimalité. Mais leur vitesse de convergence est très lente. Outre leur caractère stochastique, fondé sur une recherche aléatoire de l'optimum, elles doivent effectuer un nombre d'évaluations des objectifs et des contraintes qui croît exponentiellement en fonction du nombre de variables de conception. Cependant l'hybridation de méthodes d'optimisation globale et locale pallie cette difficulté en accélérant considérablement la vitesse de convergence.

Une méthode d'optimisation hybride a ainsi été utilisée par la société Cab Innovation pour concevoir un drone à voilure fixe (Cabiota) qui présente des performances sensiblement supérieures à celles des produits existants et des caractéristiques non entièrement prévues des concepteurs eux-mêmes.

En dépit des marges de conception offertes par l'absence de personne à bord, ce type de drone n'a fait l'objet, jusqu'à présent, que de peu de recherches sur le plan scientifique et technique et sa configuration aérodynamique reste le plus

souvent semblable à celle des avions pilotés. De même, les avions de ligne n'ont guère évolué depuis les premiers avions à réaction (notamment le Boeing 707 mis en service en 1958) mais doivent désormais changer radicalement de design pour améliorer leur bilan carbone.

Cet article montre l'application de méthodes d'optimisation hybride à la conception d'un drone à voilure fixe. Il en souligne les apports mais aussi les limites afin de déterminer les caractéristiques attendues des méthodes d'optimisation hybride multidisciplinaire pour les rendre applicables à tous les domaines d'ingénierie.

Son aspect scientifique ne porte pas sur l'hybridation de méthodes d'optimisation globales et locales, connue de la littérature mais quasiment absente de l'ingénierie des systèmes, mais sur la mise en lumière d'un potentiel, largement inconnu des concepteurs, à travers une application concrète d'une certaine complexité. Cette dernière permet, par ailleurs, de souligner les insuffisances des outils de MDO existants, ce qui constitue un préalable aux projets de Recherche et Développement collaboratifs que les auteurs de cet article appellent de leurs vœux.

## 2 L'OPTIMISATION MULTIDISCIPLINAIRE

L'activité de conception des systèmes recouvre des métiers très différents (marketing, structure, aérodynamique, contrôle, fiabilité, etc.). Cependant, une question primordiale reste à résoudre : comment réaliser les meilleurs compromis entre ces diverses disciplines sachant qu'un optimum global résulte rarement de la juxtaposition des optima locaux ? L'optimisation multidisciplinaire cherche à résoudre ce problème [Cramer et al, 1994]. Illustré par la figure 1, un système multidisciplinaire comprend des variables globales (z), des variables locales propres à chacune des disciplines (x) et des variables de partage (y) qui sont des sorties des différentes disciplines.

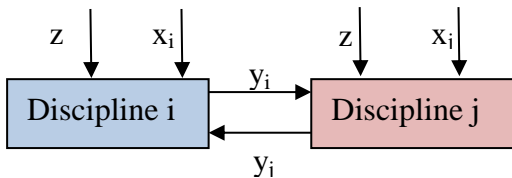


Figure 1. Système multidisciplinaire

L'optimum recherché est meilleur que la configuration trouvée en optimisant chacune des disciplines indépendamment des autres, car il prend en compte leurs interactions. En effet, quand l'optimisation s'arrête aux frontières des disciplines, la gestion des interfaces conduit à considérer des pires cas et à cumuler des marges cachées qui peuvent avoir des effets de seuil très pénalisants, tels que le changement de catégorie de satellite (nano, micro, mini, gros...) ou de lanceur (Véga, Soyouz, Ariane...) dans le domaine spatial, pour la mise en orbite d'une charge utile.

### 2.1 Méthodes mono et multiniveaux

L'optimisation multidisciplinaire fait appel à des méthodes mono ou multiniveaux telles que la méthode MDF (*Multidisciplinary Feasible Design*) ou la méthode collaborative CO (*Collaborative optimisation*) représentée à la figure 2 [Braun et al, 1996].

La Méthode MDF met en œuvre un optimiseur unique qui agit sur un système intégré comprenant un MDA (*Multidisciplinary Design Analysis*). Ce dernier détermine les sorties des disciplines à chaque itération du processus d'optimisation en

résolvant l'équation d'état que doit vérifier chacune des variables de couplage.

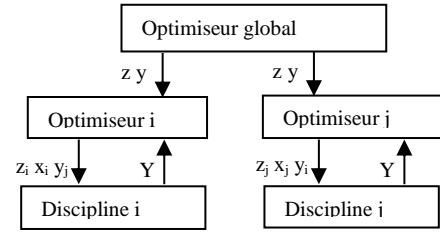


Figure 2. Méthode collaborative CO

La méthode CO met en œuvre plusieurs optimiseurs qui reproduisent le fonctionnement d'une entreprise où la direction donne des consignes que les différents services tentent de respecter. Au niveau système, un optimiseur joue sur les variables globales et de partage pour minimiser la fonction de coût tout en respectant les contraintes système ainsi que des contraintes d'égalité assurant le respect des consignes au niveau inférieur.

### 2.2 Optimisation locale par la méthode du gradient

La méthode du gradient et ses dérivées sont utilisées en optimisation multidisciplinaire pour améliorer localement une solution [Tedford et Martin, 2010]. Les dérivées de la fonction de performance n'étant généralement pas fournies par les codes de calcul, le gradient peut être estimé par le calcul des différences finies (méthode du pseudo gradient) qui s'avère très pénalisant en temps de calcul quand il porte sur un grand nombre de paramètres de conception. Le gradient peut être également estimé plus efficacement par la méthode GSE (*Global Sensitivity Equation*) qui est une méthode adjointe utilisant l'information apportée par l'équation d'état et sa dérivée dans la méthode MDF [Martins et Hwang, 2013]. La fonction à optimiser est de la forme :  $f = F(p, Y(p))$  où  $p$  désigne le vecteur des paramètres de design ( $z$  et  $x$ ) et  $Y(p)$  le vecteur des variables d'échange ( $y$ ) qui respecte les équations d'état :

$$R(p, Y(p)) = 0$$

La dérivée totale de la fonction  $f$  a pour expression :

$$\frac{df}{dp} = \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial Y} \frac{dY}{dp}$$

Le calcul de  $\frac{dY}{dp}$  est difficile car il n'y a en général pas de solution analytique de l'équation d'état  $R(p, Y(p)) = 0$ , qui est résolue grâce à des méthodes numériques.

Ce problème est contourné en considérant que la dérivée totale du résidu  $R$  est nulle :

$$\frac{dR}{dp} = \frac{\partial R}{\partial p} + \frac{\partial R}{\partial Y} \frac{dY}{dp} = 0 \text{ d'où l'expression } \frac{dY}{dp} = - \left[ \frac{\partial R}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial R}{\partial p}$$

que l'on peut remplacer dans celle de la dérivée :

$$\frac{df}{dp} = \frac{\partial f}{\partial p} - \frac{\partial f}{\partial Y} \left[ \frac{\partial R}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial R}{\partial p}$$

On introduit alors le vecteur des variables adjointes  $\Lambda$ , tel que :

$$\left[ \frac{\partial R}{\partial Y} \right]^T \Lambda = - \left[ \frac{\partial f}{\partial Y} \right]^T$$

Que l'on remplace dans l'expression de la dérivée :

$$\frac{df}{dp} = \frac{\partial f}{\partial p} - \Lambda^T \frac{\partial R}{\partial p}$$

L'algorithme résout d'abord numériquement les équations d'état  $R(p, Y(p)) = 0$  pour un vecteur  $p$  donné, puis calcule numériquement l'adjoint  $\Lambda$  avant d'obtenir la dérivée. L'algorithme d'optimisation peut ainsi sélectionner le vecteur  $p$  de l'étape suivante.

La méthode GSE est moins coûteuse en temps de calcul car elle ne nécessite pas un calcul couplé par variable de conception. Il y a un seul calcul couplé et les dérivées sont fournies par chacune des disciplines. L'équation d'état peut être résolue de manière précise afin d'obtenir un gradient de bonne précision. Cette méthode d'optimisation est notamment utilisée pour la conception aérodynamique et structurelle des ailes d'avion. [Zhoujie et al, 1994].

### 2.3 L'optimisation multidisciplinaire aujourd'hui

L'optimisation multidisciplinaire est actuellement en vogue dans la recherche en aéronautique, informatique et mathématiques appliquées. Elle permet d'améliorer localement la forme des avions, mais rencontre des freins à son développement.

Dans les différents domaines de l'ingénierie, les outils, les méthodes, les techniques voire les technologies sont souvent cloisonnées par métier ou domaine de travail, ce qui limite leur adoption par d'autres corps de métier. Ainsi, les dernières technologies de calculs massivement parallèles et distribués, introduites par le *Big Data*, sont peu utilisées en optimisation, malgré leur intérêt évident pour réduire les temps de calcul. De même, les méthodes de virtualisation, d'abstraction ou d'interfaces, communes aux domaines du *Cloud computing* et du *Web* en général, semblent inconnues des concepteurs de logiciel de MDO pourtant confrontés aux mêmes défis, à savoir l'intégration d'outils hétérogènes devant travailler de concert.

Dans les sciences des données (*Data science*), les méthodes d'optimisation globales restent confidentielles et leur hybridation à des méthodes locales semble inconnue. La plupart des bibliothèques de *machine learning* se fondent sur des méthodes simples, voire simplistes, de recherche locale sans exploiter l'état de l'art de la spécialité.

Par ailleurs, l'optimisation multidisciplinaire n'aura un véritable impact sur les produits de demain que si les outils qui la mettent en œuvre se démocratisent et deviennent accessibles, voire incontournables, pour l'ensemble des ingénieurs en conception à la manière des réseaux de neurones pour l'intelligence artificielle [Cabarbaye et al, 2016].

## 3 APPORT DE L'OPTIMISATION HYBRIDE A LA CONCEPTION D'UN DRONE

Bénéficiant de l'expérience acquise durant la réalisation du drone météorologique CABFLY de 2,5 kg dans le cadre du projet ANR NEPHELAE (CNRM, LAAS, ENAC, ENM) [Cabarbaye et al, 2019], le drone Cabiota a été développé par la société Cab Innovation au moyen d'un outil d'optimisation hybride, Gencab, également développé par la même société. Cet outil générique associe une méthode globale (algorithmes génétiques) à une méthode locale (simplexe non linéaire ou algorithme de Nelder-Mead) pour accélérer la convergence vers l'optimum global.

### 3.1 Présentation du contexte

Né depuis une dizaine d'années, le secteur des drones civils a principalement été porté par le marché des drones dits de loisir jusqu'en 2018.

A partir de cette date, en raison de la faiblesse du marché de renouvellement, l'industrie s'est repositionnée sur le segment professionnel, principalement pour la photographie et la cartographie aérienne.

Cependant, le domaine spatial offre des solutions abordables qui entrent directement en concurrence avec les drones mais avec des coûts d'utilisation plus faibles et à beaucoup plus grande échelle.

Les drones présentent toutefois les avantages suivants par rapport aux satellites :

- type de charges utiles non limitées aux seuls capteurs passifs ou à énergie dirigée,
- vol sous le couvert nuageux pour des applications en temps réel,
- altitude de vol variable,
- sites visités en dehors de la période de défilement des satellites en orbite basse.

De nouvelles applications peuvent être, par ailleurs, envisagées comme par exemple :

- le transport de marchandise à haute valeur ajoutée (en concurrence avec le transport routier ou aérien),
- l'épandage de produit phytosanitaire en simultané avec la détection (en concurrence avec les méthodes agricoles classiques),
- l'imagerie très haute résolution en volant à basse altitude (en concurrence avec l'aviation classique et les satellites haut de gamme),
- la recherche scientifique avec analyse de l'atmosphère (e.g. Météorologie, Volcanologie),
- la surveillance, etc.

Pour se faire une place sur ces nouveaux marchés, les performances en termes de vitesse de croisière et d'endurance doivent être grandement améliorées afin d'augmenter la distance franchissable (actuellement limitée à 50 kms), la surface « survolable » (actuellement limitée à 10km<sup>2</sup> pour une journée de travail), le temps de vol (actuellement de plus ou moins 2 heures) et la possibilité de voler par tout temps (actuellement le vol par fort vent est limité du fait des faibles vitesses de croisière, autour de 15 m/s).

De telles améliorations ne peuvent être obtenues par de simples optimisations locales des solutions actuellement existantes.

Par ailleurs, sur un plan juridique, les drones doivent respecter depuis le 01/01/2021 la nouvelle réglementation européenne qui instaure différentes classes dépendantes du poids du drone considéré :

- les classes de drones de moins de 0,9 kg, qui sont surtout destinées aux drones de loisir,
- la classe C2 des drones de moins de 4kg, qui est la moins contraignante et qui est susceptible d'intégrer des drones professionnels,
- la classe C3, qui limite la masse totale à 25 kg.

Compte tenu des nombreuses exigences imposées à la classe C3, le drone développé par Cab Innovation entre dans la classe C2 et a suivi le cahier des charges suivant:

- masse maximale au décollage de 4kg,
- plus grande autonomie possible,
- grande modularité

Ce dernier point implique une soute relativement grande afin d'accueillir l'ensemble de la charge utile, les batteries et une configuration propulsive afin de dégager le nez de l'appareil pour d'éventuels capteurs. Ceci a pour conséquence de figer la configuration du fuselage.

L'optimisation portait alors principalement sur les ailes et le système propulsif du drone.

Enfin une propulsion électrique est choisie en raison de sa simplicité, de son adaptabilité et des contraintes réglementaires.

### 3.2 Formalisation du problème d'optimisation

#### 3.2.1 Les paramètres

Les paramètres d'optimisation considérés sont l'envergure, la corde, l'effilement, la flèche et le calage de l'aile à l'emplanture et au saumon qui sont représentés par des variables réelles, ainsi que les choix des modèles de moteur, d'hélice et des profils d'aile à l'emplanture et au saumon qui sont représentés par des variables alphanumériques.

#### 3.2.2 Limitation due à la modélisation

Si l'optimisation hybride ouvre la plage des solutions envisageables, la formalisation du problème peut la réduire intrinsèquement. De bonnes solutions peuvent ainsi être ignorées parce qu'elles ne sont pas accessibles par la modélisation retenue.

La bio-inspiration peut aider à s'affranchir de ces limitations en vérifiant que des solutions adoptées par la nature ne sont pas omises par le modèle.

Dans le cas présent, une étude CFD des « ailes en mouette », inspirées par les oiseaux marins homonymes a montré un intérêt double de cette configuration. Elle présente une trainée induite réduite par rapport à une aile de même envergure. L'angle donné aux ailerons améliore la symétrie du vol en virage.

Enfin, dans la configuration retenue d'aile en flèche, cette cassure améliore la stabilité directionnelle. Ceci permet de ce fait de réduire la taille des stabilisateurs verticaux.

Deux paramètres supplémentaires d'optimisation (définis par des variables réelles) sont donc ajoutés : les positions verticale et horizontale de la cassure des ailes présentées figure 3.

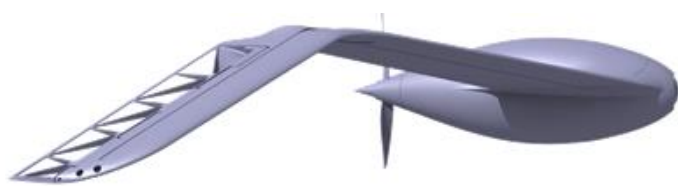


Figure 3. Configuration finale du drone Cabiota

#### 3.2.3 Les contraintes

La seule contrainte considérée est la vitesse de décrochage qui est choisie afin de pouvoir atterrir avec une marge de 10%. La vitesse de décollage est, dans un premier temps, limitée à 15m/s.

#### 3.2.4 Le critère

Le drone étant envisagé pour répondre à un grand nombre d'applications différentes, 2 critères sont considérés.

Le premier est le temps de vol maximal en croisière (endurance). En effet un grand nombre de missions consiste en survoler un objectif le plus longtemps possible en effectuant un circuit d'attente (i.e. mission de surveillance de zone).

Le deuxième est la distance « survolable » par unité de temps (vitesse de croisière). En effet, le coût d'exploitation d'un

drone étant principalement constitué par le salaire du télépilote, ce critère impacte directement la rentabilité de son exploitation (i.e. cartographie, surveillance de ligne).

La Cabiota est donc optimisée pour maximiser ces deux critères au cours de la mission présentée à la figure 4.

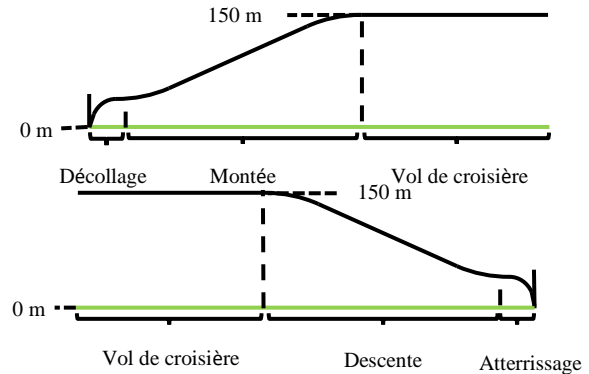


Figure 4. Mission type

Plusieurs calculs intermédiaires sont nécessaires pour estimer ce critère:

- Mécanique

Chaque élément mécanique est dimensionné pour supporter les contraintes propres à la configuration considérée. La masse de chaque élément est ensuite estimée. Ces estimations sont ensuite sommées, donnant ainsi la masse à vide de l'appareil. Cette masse permet d'estimer la masse de batterie admissible restante pour ne pas dépasser les 4 kg.

- Aérodynamique

La vitesse de décrochage de la configuration considérée est estimée afin de vérifier le respect de la contrainte.

Les performances aérodynamiques de l'avion et la puissance mécanique nécessaire résultante sont estimées pour chaque phase de vol.

- Electrique

Une analyse électrique du système motopropulseur permet d'estimer la consommation et enfin le temps de vol en croisière.

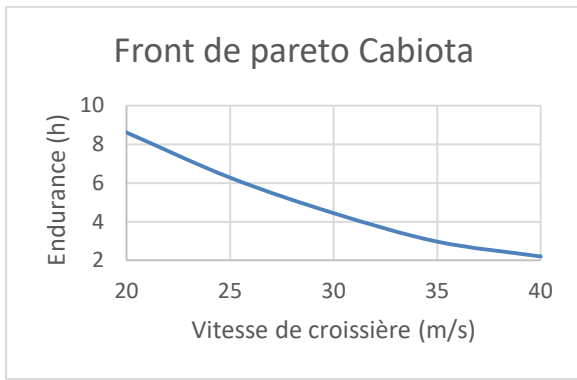
A cause des limitations du logiciel employé, ces estimations sont effectuées au moyen de formules semi empiriques et des modèles théoriques simples issues du domaine de la conception amont aéronautique.

#### 3.2.5 Tendance de design préliminaire

Les premiers résultats du calcul par l'algorithme d'optimisation ont été assez différents de ceux qu'attendaient les concepteurs.

Le front de Pareto obtenu suite à la maximisation des 2 critères considérés pour la Cabiota est présenté à la figure 5.

Il apparaît que le meilleur compromis se trouve autour de 30 m/s. Ce qui est 2 fois supérieur à la norme actuellement observée sur le marché. La vitesse de croisière est donc fixée à 30 m/s pour la suite de l'optimisation. Cette vitesse est comparable à celle du transport routier, ce qui rend la Cabiota compétitive pour la livraison de colis.



**Figure 5. Front de Pareto Cabiota**

Le système de propulsion constitué du moteur et de l'hélice donne au drone une puissance maximale près de 3 fois supérieure à sa puissance en vol de croisière. Or ce rapport tourne en général autour de 1.5.

Cette sur-motorisation permet une vitesse de montée très élevée qui réduit le temps de montée en début de mission, et par conséquent, l'énergie consommée au cours de cette phase. Il est à noter que le fort rapport poids/puissance des moteurs électriques n'impacte que peu le devis de masse et donc la capacité de batterie.

Par ailleurs, la position horizontale de la cassure de l'aile obtenue coïncide exactement avec la substitution complète du stabilisateur vertical. Ce paramètre a donc pu être supprimé et sa valeur calculée analytiquement pour alléger les calculs d'optimisation suivants.

Enfin, la contrainte de vitesse de décrochage est très rapidement atteinte au cours de l'optimisation. Une grande vitesse de décrochage est en effet induite par une charge alaire élevée qui est nécessaire pour réduire la surface d'aile mouillée et donc la traînée. Une charge alaire élevée présente, par ailleurs, l'avantage d'être moins sensible à la turbulence.

Il apparait ainsi qu'une augmentation de la vitesse de décrochage soit nécessaire pour améliorer les performances du drone. Mais un système de lancement adapté est alors nécessaire.

### 3.2.6 Décollage court et atterrissage vertical

Plusieurs systèmes d'assistance au décollage existent, principalement basés sur les principes de la catapulte ou du sandow. Or ces solutions, soit ne permettent pas de transmettre suffisamment d'énergie, soit imposent une accélération initiale beaucoup trop grande pour la centrale inertielle et éventuellement la charge utile. La solution la plus adaptée semble alors être l'utilisation de moteurs fusées (systèmes de type JATO ou RATO) qui présentent malheureusement un risque d'incendie élevé.

Un système de lancement hydropneumatique (basé sur le même principe que les fusées à eau) a donc été développé.

L'optimisation de ce système a été effectuée simultanément avec le reste du drone, en ajoutant comme paramètre supplémentaire, le volume d'air dans la fusée.

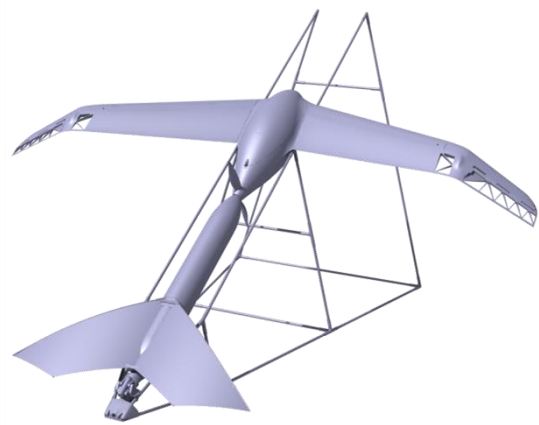
En raison des vitesses de vol atteintes, il a été décidé que l'atterrissage serait effectué sous parachute, le drone devenant ainsi de type ADAC / V (décollage court et atterrissage vertical). L'ensemble des phases de vol est présenté sur la figure 6.



**Figure 6. Phases de vol**

### 3.2.7 Résultats de l'optimisation

L'optimisation complète de l'ensemble du système drone conduit à l'architecture présentée à la figure 7 :



**Figure 7. Système Cabiota**

Une vitesse de libération de 18m/s est atteinte faisant passer la vitesse de décrochage admissible à 16.3 m/s, ce qui est plus du double que celle des drones ordinaires de la classe C2. La surface alaire est ainsi divisée par 4.

Au terme de la conception, les performances du drone CABIOTA sont comparées avec celles des principaux drones de classes C2 actuellement en service, dans le tableau 1. L'autonomie atteinte se révèle très supérieure à celle des produits concurrents. L'optimisation hybride a permis d'obtenir une solution très éloignée des configurations habituelles, correspondant à des optima locaux. Traitant l'ensemble du système de manière globale, la conception du drone a, par ailleurs, été beaucoup plus courte que celle employant des méthodes d'optimisations locales prises séparément.

Ref. produit	UX11	eBee X	Talon	X6	AVEM	Cabiota
Vitesse	15 m/s	15 m/s	15m/s	15 m/s	18 m/s	30 m/s
Masse	1.5 kg	1.4 kg	4 kg	4 kg	2 kg	4 kg
CU	0.250 kg	0.250 kg	0.7 kg	0.5 kg	0.5 kg	De 0.5 à 2.5 kg
Taille	1.1 m	1.16 m	1.72 m	1.5 m	2.14 m	1.8m
Autonomie	1h00	1h00	2h00	2h00	3h00	5h00 (0.5 kg CU) 7h00 à 21m/s

**Tableau 1. Tableau comparatif des performances**

Toutefois, les contraintes de l'outil d'optimisation utilisé, qui fonctionne dans l'environnement Excel sans réelle possibilité de couplage avec des outils de simulation, ne permettent pas d'exploiter complètement le potentiel de l'optimisation hybride. En effet, si ce calcul était basé sur l'état de l'art de chaque discipline (e.g. CFD, FEM), l'incertitude de l'estimation pourrait être grandement diminuée. Cela permettrait de prendre en compte un beaucoup plus grand nombre de paramètres dont l'impact ne peut pas être évalué par l'estimation actuelle. Ainsi, des solutions inédites pourraient être trouvées sans être basées sur une intuition initiale comme l'« aile en mouette » ou sur un choix parmi des solutions préexistantes comme les profils d'aile qui pourraient facilement être paramétrés [Nilesh et al, 2014].

A travers les difficultés et limitations rencontrées durant ce processus de conception innovant, cette application relativement complexe a toutefois permis de préciser les attentes de concepteurs vis-à-vis des outils de MDO.

#### 4 ATTENTES VIS-A-VIS DES METHODES ET OUTILS DE MDO

Pour rendre l'optimisation multidisciplinaire véritablement opérationnelle et pouvoir satisfaire les attentes qu'elle suscite, il apparaît nécessaire de préciser les besoins des concepteurs vis-à-vis des outils de MDO.

##### 4.1 Recherche d'un optimum global

Les méthodes d'optimisation locale, telles que l'algorithme du gradient calculé par la méthode adjointe, sont efficaces pour améliorer une bonne solution mais ne permettent pas d'en trouver de nouvelles en dehors de son voisinage immédiat. Les outils de MDO doivent donc se doter d'une capacité de recherche de l'optimum global pour trouver des solutions innovantes. Cependant, l'hybridation de méthodes globales et locales s'avère indispensable pour résoudre la plupart des problématiques industrielles sans que la durée de convergence devienne rédhibitoire.

##### 4.2 Simplicité et généralité

Les outils de MDO doivent être génériques, afin de pouvoir s'adapter à la diversité des problèmes rencontrés sans imposer de restrictions particulières, tout en étant simples d'utilisation pour des ingénieurs non informaticiens. La formalisation du problème et notamment l'expression des variables et des contraintes doit être suffisamment intuitive pour être facilement compréhensible par l'ensemble des personnes impliquées dans la conception d'un système. Aussi, le codage des variables doit-il être riche, naturel et souple. Il peut être binaire, réel, entier, mais aussi alphanumérique (choix d'un profil aérodynamique standard dans une liste par exemple), ou adapté au dénombrement tel que la permutation (problème du voyageur de commerce), l'arrangement (problème décisionnel) ou la combinaison (problème du sac à dos). D'autres formats plus spécifiques peuvent être également envisagés comme celui décrivant une arborescence.

##### 4.3 Facilité de couplage

Le couplage des outils d'optimisation avec n'importe quel logiciel d'analyse existant doit être aisé, même si ce dernier n'a pas été écrit pour être un jour utilisé à des fins de conception automatisée. Ainsi, le logiciel Xfoil de simulation aérodynamique ne fonctionne que sur des architectures particulières (architecture x86) avec des interfaces machine-machine assez restreintes, voire inexistantes. Aussi, les

évaluations doivent-elles pouvoir s'opérer sur des environnements propres à ces dernières, qui peuvent être différents des environnements d'exécution des algorithmes d'optimisation. Par ailleurs, il faut souligner l'importance d'un couplage efficace à la simulation de Monte-Carlo afin de pouvoir tirer tout l'avantage de la prise en compte de l'aléa dans la résolution de nombreuses problématiques (la diversité des trajets pouvant être effectués par un avion commercial par exemple) [Cabarbaye et Lautheret, 2006].

##### 4.4 Méthodes multiniveaux

Outre la simplicité apportée pour décomposer un problème complexe en problèmes plus restreints, les méthodes multiniveaux se révèlent indispensables quand l'évaluation d'une solution nécessite elle-même une optimisation.

##### 4.5 Recherche multi-objectifs

S'efforçant de trouver le meilleur compromis entre des objectifs parfois contradictoires d'une discipline à l'autre, les outils de MDO doivent avoir la faculté de mener une recherche multi-objectif.

##### 4.6 Calcul parallèle et distribué

La multiplicité des traitements rend nécessaire la parallélisation des calculs et la distribution du MDO sur plusieurs supports traitant des algorithmes d'optimisation et des opérations d'évaluation. Compte tenu de l'existence de *clouds* publics, il apparaît judicieux de n'utiliser des machines de calcul dédiées que quand cela est nécessaire et de s'assurer que les besoins en calculs trouvent des réponses adéquates et adaptatives, afin que les ressources mises à disposition soient utilisées à bon escient en évitant tout phénomène d'engorgement pouvant avoir un impact sur le temps de calcul global.

##### 4.7 Accessibilité

Les outils de MDO doivent être non seulement flexibles et adaptés à un large éventail d'usage mais aussi facilement accessibles pour pouvoir être essayés et évalués par un grand nombre d'utilisateurs différents (experts, chercheurs, concepteur, intégrateurs, etc.). A ce titre, la diffusion en open-source présente un avantage significatif.

##### 4.8 Synthèse

En résumé, l'outil attendu de MDO doit être ergonomique, générique, robuste, efficient (résultat sans effort), multi-objectif, portable (fonctionnant sur des environnements hétéroclites), interopérable, extensible, évolutif, etc. Il est à noter que la performance et la rapidité de traitement ne sont pas mentionnées dans cette liste des qualités requises. Peu importe, en effet, que d'autres outils puissent être plus performants pour un problème donné si celui-ci est traité sans effort, dans un temps raisonnable avec des solutions meilleures que celles trouvées jusqu'alors [Cabarbaye et Cabarbaye, 2019].

##### 4.9 Autres pistes favorisant la MDO

Outre l'utilisation d'outils d'optimisation performants, la mise en œuvre de la MDO peut être facilitée par diverses approches permettant de réduire la durée d'évaluation de chacune des solutions.

Les modèles représentant l'évolution des objectifs et des contraintes, en fonction des variables de conception, peuvent être plus ou moins précis au cours de la recherche. Des modèles empiriques, comme des profils standards en



aérodynamique ou des analyses régressives sur les coûts, peuvent être utilisés pour dégrossir le problème avant que des modèles théoriques plus poussés, tels que les éléments finis ou la CFD (*Computational Fluid Dynamics*), affinent les solutions trouvées.

Des modèles réduits intermédiaires peuvent être également envisagés tels que la surface de réponse polynomiale d'un plan d'expériences dont les solutions résultent d'un outil de simulation aérodynamique, par exemple. De même, des modèles de substitution peuvent être obtenus par des techniques, telles que le krigeage ou la machine à vecteurs de support, quand des variables de conception ne sont pas directement accessibles. Le choix de ces modèles est le fruit d'un compromis entre le temps d'exécution et la précision des résultats, en sachant que la prise en compte de tout détail superflu est inutilement pénalisante (le mieux étant l'ennemi du bien).

Par ailleurs, l'évaluation d'une solution peut être menée de manière plus ou moins grossière, en fonction de l'estimation courante de son potentiel. Rejetant au plus tôt les mauvaises solutions, ce principe permet de réduire d'au moins un ordre de grandeur les temps de calcul lorsque l'évaluation résulte d'une simulation de Monte-Carlo, par exemple.

## 5 CONCLUSION

Déjà utilisée pour améliorer localement la forme des avions, l'optimisation multidisciplinaire fait actuellement l'objet de recherches en aéronautique, informatique et mathématiques appliquées. Elle ne peut cependant se contenter de rechercher des optima locaux si elle veut faire émerger des solutions réellement innovantes et contribuer, par exemple, à la conception des avions respectueux de l'environnement et moins gourmands en énergie qu'attendent les usagers de l'aéronautique civile.

Comme l'illustre l'application dans le domaine des drones présentée ici, les gains apportés par l'optimisation hybride aux performances d'un avion ne se chiffrent pas en pourcents mais en dizaine de pourcents résultant notamment de la suppression de marges cachées et d'opportunités offertes par une moindre sensibilité aux effets de seuil. Outre l'aéronautique, ces techniques sont susceptibles d'apporter des gains similaires dans de nombreux domaines d'application, dont la conception automobile, navale, ferroviaire, informatique, etc.

D'importants travaux restent néanmoins à faire pour que des outils d'optimisation hybride multidisciplinaire véritablement efficaces voient le jour et contribuent à la conception des produits de demain.

Disposant d'une double compétence tant dans le domaine des algorithmes d'optimisation que de la conception de systèmes complexes, les auteurs de cet article sont prêts à s'associer à des chercheurs en mathématiques appliquées, informaticiens et

autres concepteurs, dans le cadre de projets collaboratifs de recherche et développement en MDO. Un projet d'une telle ambition peut difficilement se concevoir au sein d'une petite entreprise, même si des travaux exploratoires y ont été déjà menés jusqu'à la rédaction de la spécification préliminaire d'un nouvel outil (Gencab Indra) [Cabarbaye, 2016] [Cabarbaye, 2019].

Par ailleurs, le drone Cabiota devrait être utilisé comme démonstrateur de briques technologiques pour améliorer les performances des drones à aile fixe, dans le cadre d'un partenariat avec un laboratoire scientifique. Il pourrait, lui-même, bénéficier des fruits d'un tel projet de R&D.

## 6 REFERENCES

- Vanderplaats, G. N. (2007) Multidiscipline Design Optimization, Vanderplaat R&D, Inc.
- Cramer, E.J., Dennis Jr., J.E., Frank, P.D., Lewis, R.M., and Shubin, G.R. (1994) *Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization*, SIAM J. Optim., 4 (4): 754-776.
- Braun R., Gage P., Kroo I., and Sobieski I. (1996) *Implementation and performance issues in collaborative optimization*, Technical Report NASA-AIAA-96-4017, AIAA.
- Martins J. R. R. A., Hwang J. T., (2013) Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models. AIAA Journal, 51(11):2582–2599
- Tedford N. P., Martin J. R.R.A. (2010), *Benchmarking multidisciplinary design optimization algorithms*, Optim Eng 11: 159–183, DOI 10.1007/s11081-009-9082-6.
- Zhoujie Lyu, Gaetan K. W. Kenway, and Joaquim R. R. A. Martins (1994), *Aerodynamic Shape Optimization Investigations of the Common Research Model Wing Benchmark*, Helicopter Theory, Wayne Johnson, Courier Corporation.
- Nilesh P., Salunke, Juned Ahamad R. A., Channiwala S.A. (2014) *Airfoil Parameterization Techniques: A Review*, Science and Education Publishing.
- Cabarbaye A., Verdu T., Garcia F., Gorraz M., Bustico A., Bronz M., & Hattenberger G. (2019) Design of a high performance MAV for atmospheric research, IMAV
- Cabarbaye A., Cabarbaye A., Cabarbaye A. (2016) Une plateforme open source d'optimisation générique hautement distribuée, ROADEF.
- Cabarbaye A., Lauheret R. (2006) Couplage entre optimisation et simulation stochastique, ROADEF.
- Cabarbaye A., Cabarbaye A., (2019) L'optimisation multidisciplinaire l'autre enjeu du big data, ISBN : 979-10-97287-05-4.