

# OPTIMISATION ET APPRENTISSAGE STATISTIQUE POUR LA RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT

Baptiste Gregorutti & Anamaria Lupu

*Safety Line*

*130 rue de Lourmel, 75015 Paris*

*prenom.nom@safety-line.fr*

**Résumé.** Nous présentons un travail portant sur l'utilisation de techniques issues de l'optimisation et de l'apprentissage statistique pour la réduction de la consommation de carburant en aéronautique. Lors de la phase de montée, plus grosse consommatrice de carburant, les avions montent à vitesse constante alors que les performances varient d'un avion à un autre et d'un vol à un autre. Le service OptiClimb proposé par Safety Line adapte le profil de montée en tenant compte des caractéristiques aérodynamiques de l'avion et ce à partir d'une modélisation fine de chaque appareil.

**Mots-clés.** consommation de carburant, contrôle optimal, apprentissage statistique

**Abstract.** The present work deals with an application of optimization techniques and statistical learning to the reduction of fuel consumption in aviation. During the climb phase which is the most fuel consuming, the aircraft has a constant speed while its performances vary from one aircraft to another and from one flight to another. The service OptiClimb proposed by Safety Line modifies the climb profile by taking into account the aerodynamic characteristics of each aircraft.

**Keywords.** Fuel consumption, optimal control, statistical learning

## 1 Introduction

La consommation de carburant représente aujourd'hui 30 % des coûts opérationnels d'une compagnie aérienne. De plus, près de 3 % des émissions de CO<sub>2</sub> planétaires proviennent du transport aérien. Au vu de l'augmentation conséquente du nombre de passagers d'ici à 2030, la réduction de la consommation de carburant devient un objectif de premier ordre pour les compagnies aériennes.

À travers son logiciel OptiClimb, la société Safety Line propose à ses clients un service d'optimisation de la consommation de carburant par l'utilisation des données issues des boîtes noires. La phase de montée étant la plus grosse consommatrice de carburant, OptiClimb propose un plan de vol plus économe par l'intermédiaire de l'optimisation du profil de montée. L'idée étant que la consommation de carburant peut être réduite en

faisant varier la vitesse de l'avion plutôt que de la maintenir constante durant toute la montée.

Dans un premier temps, l'identification des caractéristiques aérodynamiques d'un appareil spécifique est conduite en tenant compte de la configuration de l'avion (masse, ancienneté), la configuration de vol (altitude de croisière, vitesse, angle d'incidence et assiette) et les conditions météorologiques (vitesse et direction des vents, température extérieure). Ces caractéristiques sont établies à partir des données enregistrées à bord et via des modèles physiques. Dans un second temps, les modèles aérodynamiques ainsi construits sont employés dans un algorithme de contrôle optimal indiquant alors le meilleur profil de montée.

## 2 Formulation du problème d'optimisation

L'approche que nous adoptons consiste à utiliser des méthodes issues du contrôle optimal [1] et d'apprentissage statistique [2] pour la minimisation de la consommation de carburant. En particulier, nous considérons le vol d'un avion en montée comme issu d'un système dynamique. Notre objectif est de minimiser la consommation  $\mathcal{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  via la résolution du problème d'optimisation sous contraintes :

$$\min_{(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \in \mathbb{X} \times \mathbb{U}} \mathcal{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \text{ tel que } \frac{d\mathbf{x}}{dt} = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (1)$$

Le vecteur  $\mathbf{x}$  représente les variables d'état du système. Le vecteur  $\mathbf{u}$  représente les variables de contrôle dépendantes du temps, c'est-à-dire les variables qui nous permettent d'agir sur le système (voir [1]). Les contraintes données par  $\frac{d\mathbf{x}}{dt} = g(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  représentent la dynamique du vol durant la phase de montée. Cette dynamique se déduit de la mécanique du vol (Figure 1) et fait intervenir les forces de poussée ( $T$  pour *thrust*), de traînée ( $D$  pour *drag*), de portance ( $L$  pour *lift*) ainsi que le poids (produit de la masse  $m$  et de la constante de gravitation  $g$ ). Le système dynamique en phase de montée s'écrit alors :

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \equiv \begin{cases} \dot{h}(t) = & V(t) \sin \gamma(t) \\ \dot{V}(t) = & \frac{T(t) \cos \alpha(t) - D(t) - m(t)g \sin \gamma(t)}{m(t)} \\ \dot{\gamma}(t) = & \frac{T(t) \sin \alpha(t) + L(t) - m(t)g \cos \gamma(t)}{m(t)V(t)} \\ \dot{m}(t) = & -C_{sp}(t)T(t) \end{cases}$$

où  $h$  est l'altitude,  $V$  la vitesse air,  $\alpha$  l'angle d'incidence,  $\gamma$  la pente,  $m$  la masse de l'avion et  $C_{sp}$  est la consommation spécifique. Dans ce cas, les variables d'état sont

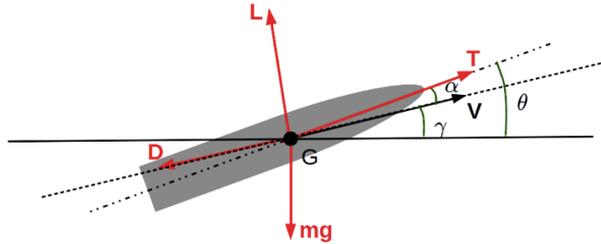


Figure 1 – Forces aérodynamiques

$\mathbf{x} = (h, V, \gamma, m)$  et les variables de contrôle sont  $\mathbf{u} = (\alpha, N_1)$ .

Finalement, les variables optimales  $\mathbf{x}^*$  et  $\mathbf{u}^*$  issues de la résolution du problème (1) nous donnent des profils de vol de consommation minimale, notamment d'altitude et de vitesse.

### 3 Estimation des paramètres aérodynamiques

Le formalisme précédant est donné en fonction des forces aérodynamiques (poussée, trainée et portance) et de la consommation spécifique qui ne sont pas directement observables. Nous devons donc les modéliser à partir des données des enregistreurs de vol (les boîtes noires). Plus précisément, nous observons l'altitude barométrique  $h$ , la vitesse Mach  $M$ , l'angle d'incidence  $\alpha$ , la masse de l'avion  $m$ , la température statique  $T_s$  et la poussée des moteurs  $N_1$ . Nous supposons alors ce qui suit :

- Modèle de poussée :  $T = f_T(N_1, M)$
- Modèle de portance :  $L = f_L(h, M, \alpha)$
- Modèle de trainée :  $D = f_D(h, M, \alpha)$

Chaque modèle aérodynamique est estimé au moyen d'un modèle de régression de la forme

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i.$$

La variable de réponse  $y_i$  représente la quantité d'intérêt observée à partir des données de vol et  $x_i$  les variables explicatives. Par ailleurs, les modèles sont supposés avoir

une structure paramétrique ce qui permet d'obtenir des formes analytiques utiles pour l'implémentation. Enfin, un critère de type moindres carrés est employé pour l'estimation des paramètres.

En conclusion, le logiciel OptiClimb dans lequel s'intègrent ces méthodes fournit des profils de montée, notamment de l'altitude et de vitesse, minimisant la consommation de carburant. Ces profils sont directement intégrés aux plans de vol. Ils sont utilisés à bord par les pilotes au moyen de consignes de vitesses à respecter à différentes altitudes. Suite à une expérimentation avec la compagnie Transavia France, les gains de consommation ont atteint 10 % d'économies en moyenne par vol.

## Bibliographie

- [1] Bonnans, F. (2015). Commande optimale, Encyclopédie des Techniques de l'Ingénieur.
- [2] Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J. (2001). The Elements of Statistical Learning, Springer New York Inc., New York, NY, USA.