

---

# **Unsteady Motions in Combustion Chambers for Propulsion Systems**

## **(RTO-AG-AVT-039)**

### **Executive Summary**

Combustion instabilities were discovered in the late 1930s as anomalies in firings of solid and liquid rockets. During World War II, experience gradually suggested that certain problems encountered in development and actual use of solid rockets were especially associated with pressure oscillations having relatively high frequencies ranging from a few hundred to several thousand Hertz. Associated problems were structural vibrations; greatly increased surface heat transfer rates; sometimes impaired performance; and, in extreme cases, failure of the combustion system and destruction of vehicles. By the 1950s, forms of combustion instabilities had been identified in all types of rockets, gas turbines, thrust augmentors and ramjets. The problem continues to the present time and will always be found in combustion systems, particularly those intended to provide high performance. Eliminating instabilities therefore becomes an important task in a development program.

This study includes a wide span of material ranging from summaries of practical examples of combustion instabilities to the present status of the field; and results of a method for analysis of the general problem. Following a summary of practical problems in Chapter 1, a lengthy discussion is given in Chapter 2 of the best known mechanisms for oscillations in the various kinds of systems. Chapters 3 and 4 summarize a widely used general method of analyzing general unsteady motions in a combustion chamber, based on expansion in normal modes and spatial averaging of the equations of motion. The result is a formulation focused on the behavior of a set of coupled nonlinear oscillators.

Chapter 5 is a summary of those parts of classical acoustics required to understand linear behavior and the elementary aspects of unsteady behavior in combustors. Chapters 6 and 7 are devoted to the theory of linear and nonlinear behavior respectively, with examples taken from experience with combustion systems. In Chapter 8 the subject of passive control is covered, giving a brief summary of experience, with several examples. The last section of the chapter describes work which has been done on some of the connections between the generation and shedding of large vortices and combustion in dump combustors.

The book ends with Chapter 9, a brief coverage of active control applied to combustors. This subject has important potential applications not yet realized. It is particularly interesting because, in an elementary way, the framework of modern active control fits naturally into the scheme formulated here in Chapters 3 and 4. Eight Appendices to the book contain treatments of special topics referred to in the text.

# Mouvements instables dans les chambres de combustion des systèmes de propulsion

## (RTO-AG-AVT-039)

### Synthèse

A la fin des années 30, on avait découvert des instabilités de combustion, qui constituaient des anomalies dans les tirs de fusées à combustible solide et liquide. Au cours de la Deuxième Guerre Mondiale, l'expérience a progressivement suggéré que certains problèmes rencontrés lors du développement et de l'exploitation des fusées à combustible solide étaient particulièrement associés à des oscillations de pression ayant des fréquences relativement élevées entre quelques centaines et plusieurs milliers de Hertz. Ces problèmes étaient accompagnés de vibrations de structure, de taux de transfert de chaleur de surface largement augmentés, de dégradation des performances dans certains cas et, dans des cas extrêmes de la défaillance du système de combustion et de la destruction des véhicules. Au cours des années 50, des formes d'instabilité de combustion ont été identifiées sur tous les types de fusées, de turbines à gaz, d'augmentateurs de poussée et de stato-réacteurs. Le problème se poursuit à l'heure actuelle et existera toujours sur les systèmes de combustion, en particulier ceux destinés à assurer des performances élevées. C'est pourquoi l'élimination des instabilités est devenue un point important des programmes de développement.

Cette étude recouvre un large éventail de sujets, allant des synthèses d'exemples pratiques d'instabilités de combustion à l'état actuel du domaine et aux résultats d'une méthode d'analyse du problème général. Le Chapitre 1 donne une synthèse des problèmes pratiques, le Chapitre 2 donne une description détaillée des mécanismes les plus connus relatifs aux oscillations sur les différents types de systèmes. Les Chapitres 3 et 4 résument une méthode générale largement utilisée pour l'analyse des mouvements instables généraux dans une chambre de combustion, en fonction de l'expansion en modes normaux et d'une moyenne spatiale des équations de mouvement. Il en résulte une formulation axée sur le comportement d'un ensemble d'oscillateurs non linéaires couplés.

Le Chapitre 5 est un résumé des domaines de l'acoustique classique nécessaires à la compréhension du comportement linéaire et des aspects élémentaires du comportement instable des chambres de combustion. Les Chapitres 6 et 7 sont consacrés à la théorie des comportements linéaires et non linéaires respectivement, avec des exemples tirés de l'expérience sur les systèmes de combustion. Le Chapitre 8 traite le sujet du contrôle passif et donne un bref aperçu de l'expérience, ainsi que différents exemples. La dernière section de ce chapitre décrit le travail réalisé sur certaines liaisons entre la génération et la chute des grands tourbillons et la combustion dans les chambres de combustion largables.

L'ouvrage se termine par le Chapitre 9, qui traite brièvement du contrôle actif appliqué aux chambres de combustion. Ce sujet comporte des applications potentielles importantes qui n'ont pas encore été réalisées. Il est particulièrement intéressant car, de manière élémentaire, le cadre du contrôle actif moderne s'adapte naturellement aux schémas formulés dans les Chapitres 3 et 4. Les huit Annexes de l'ouvrage décrivent le traitement de sujets spéciaux mentionnés dans le texte.