



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

Axel Vincent-Randonnier

Propulsion aéronautique : études expérimentales de la combustion

Volume 352, Numéro spécial S1 (2024), p. 55-59

En ligne depuis le 15 novembre 2024

Numéro publié le 15 novembre 2024

Numéro spécial : Hommage à Denis Papin

Rédacteur en chef invité : Bruno Chanetz (Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.263>



Cet article est publié sous la licence

CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de recherche / *Research article*

Hommage à Denis Papin / *A tribute to Denis Papin*

Propulsion aéronautique : études expérimentales de la combustion

Aeronautical propulsion: experimental combustion studies

Axel Vincent-Randonnier^{©, a}

^a ONERA, Département de Multi-Physique pour l'Énergétique, Toulouse, France
Courriel : axel.vincent@onera.fr

Résumé. Hors aviation légère, l'essentiel de la propulsion aéronautique repose sur la mise en œuvre des turbomachines dont les performances énergétiques et environnementales ne cessent de s'améliorer. Après avoir rappelé les principes et domaine de fonctionnement de ce type de moteur ainsi que les problématiques rencontrées dans l'étude de la combustion, nous évoquerons les moyens déployés à l'Office National d'Études et de Recherche Aéronautique (ONERA) pour accompagner les efforts de développement et d'optimisation des motoristes. Les essais récemment réalisés avec un nouveau concept d'injecteur fonctionnant à l'hydrogène ont ainsi permis une réduction drastique des niveaux d'émissions d'oxydes d'azote par rapport à un moteur fonctionnant au kérosène.

Abstract. Apart from light aviation, the majority of aeronautical propulsion relies on the implementation of turbomachinery, whose energy and environmental performances are continuously improving. After recalling the principles and operational scope of this type of engine, as well as the issues encountered in the study of combustion, we will discuss the resources deployed at the National Office for Aerospace Studies and Research (ONERA) to support the development and optimization efforts of engine manufacturers. Recent tests conducted with a new hydrogen-powered injector concept have drastically reduced nitrogen oxide emissions compared to a kerosene-powered engine.

Mots-clés. Propulsion aéronautique, Combustion aérobie, Turbomachines, Moteurs, Émissions polluantes.

Keywords. Aeronautical propulsion, Air breathing combustion, Turbomachinery, Engines, Pollutant emissions.

Manuscrit reçu le 5 avril 2024, révisé le 11 juillet 2024, accepté le 4 juillet 2024.

La machine à vapeur inventée par Denis Papin est une machine qui convertit une source d'énergie (originellement chimique) en énergie thermique, et transfère la chaleur produite à un fluide, l'eau, qui passe alors de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état s'accompagne d'une forte expansion du fluide conduisant, dans un espace confiné, à une augmentation de pression (conversion d'énergie thermique en énergie mécanique).

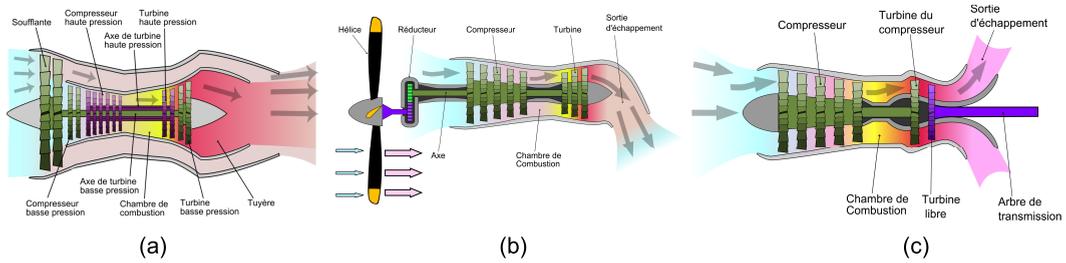


FIGURE 1. Schémas de principe des turboréacteur (a), turbopropulseur (b) et turbomoteur (c), d'après wikipedia.

À l'instar de la machine à vapeur, un moteur d'aéronef convertit une source d'énergie chimique en énergie thermique par combustion puis en énergie mécanique (quantité de mouvement), les gaz émis à très haute température étant soit accélérés au moyen d'une tuyère pour propulser directement l'aéronef, soit utilisés pour actionner une hélice (ou un rotor dans le cas des hélicoptères).

Parmi les différences notables entre ces deux machines, on remarque que dans le cas de la machine à vapeur, les fonctions de conversion chimique/thermique et thermique/mécanique ont lieu dans des espaces séparés alors que dans le moteur d'aéronef, elles sont réunies en un même lieu : la chambre de combustion. En outre, la montée en pression dans la machine à vapeur est essentiellement due au changement d'état de l'eau tandis que dans le moteur d'aéronef, elle est le fait de l'expansion des gaz par chauffage à des températures généralement supérieures.

À titre de comparaison, pour une pression de chambre/réservoir de 1 MPa et en négligeant les pertes, il faudra une puissance d'environ 170 kW afin de vaporiser environ $66 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ d'eau dans la machine à vapeur (température d'ébullition autour de 450 K) et générer une poussée m-v de $100 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dans le moteur d'aéronef, la même poussée peut être obtenue en brûlant $1,7 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ d'hydrogène, $4,1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ de méthane ou $4,9 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ de kérosène dans $136 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ d'air.

Les moteurs d'aéronefs les plus répandus aujourd'hui sont le turboréacteur (avions de ligne moyen ou long courrier), le turbopropulseur (avions régionaux) et le turbomoteur (hélicoptères) dont les schémas de principe sont représentés en figure 1.

Tous trois reposent sur le concept de la turbine à gaz pour lequel l'air qui alimente le moteur est comprimé au moyen d'un compresseur avant d'entrer dans la chambre de combustion où l'on injecte le combustible qui, une fois qu'il a brûlé avec l'air entraîne la turbine avant que le mélange de gaz brûlés ne soit libéré dans l'atmosphère. On notera que, contrairement aux moteurs thermiques automobiles présentant des cycles (remplissage de la chambre de combustion avec de l'air et du carburant, fermeture de la chambre et compression, allumage/explosion du mélange, détente et évacuation des gaz brûlés), ces moteurs d'aéronef, une fois allumés, fonctionnent continuellement, l'air et le carburant alimentant une flamme stable qui ne s'éteindra qu'à la fermeture de l'arrivée de carburant, lors de l'arrêt du moteur.

Dans les turboréacteurs modernes, le taux de compression peut atteindre un facteur 40 ou 50, ce qui signifie que, pour de l'air ingéré à une pression de 0,1 MPa et 288 K (condition de décollage avec une atmosphère standard), la pression dans la chambre de combustion atteint 4 à 5 MPa. La phase de compression de l'air s'accompagne de sa montée en température (autour de 923 K pour un taux de compression de 40). À l'altitude de croisière des avions de lignes (environ 10 ou 11 km d'altitude), la pression ambiante chute à 25 kPa et la température à 217 K, ce qui amène la pression et la température de l'air en entrée de chambre de combustion autour de 1,2 MPa et 700 K.

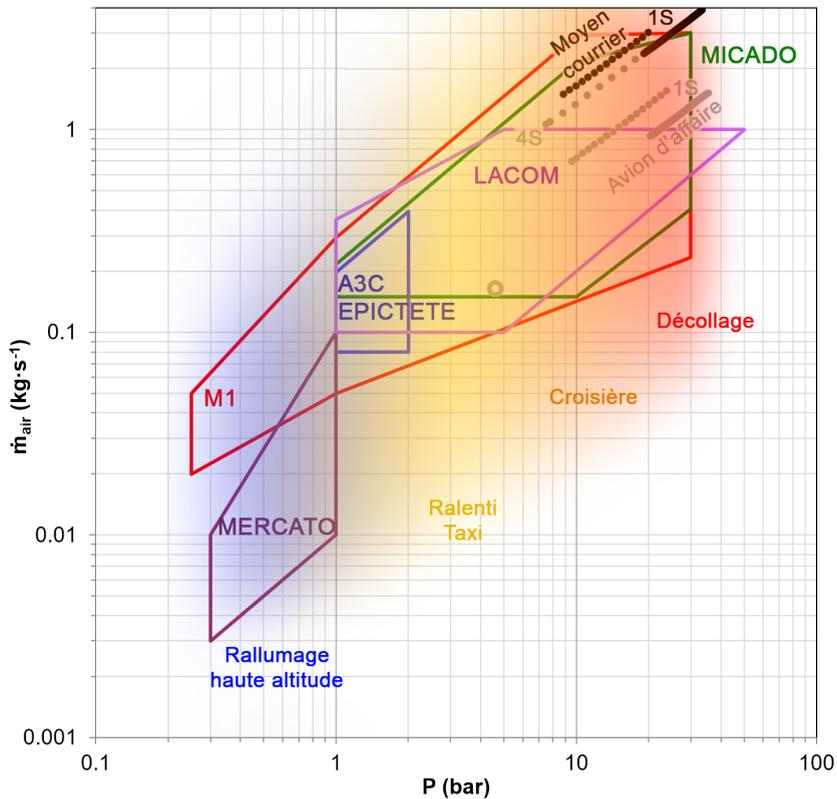


FIGURE 2. Domaine de fonctionnement des principaux moyens d'essais dédiés à l'étude de la combustion dans les foyers de turbomachines.

Ce sont ces conditions de fonctionnement que l'on doit pouvoir reproduire dans nos foyers d'essais pour étudier la combustion dans des conditions représentatives du fonctionnement des moteurs réels. Pour cela, l'ONERA dispose de plusieurs moyens d'essais [1] sur les sites de Palaiseau en Île-de-France et du Fauga-Mauzac près de Toulouse.

Ils permettent de couvrir l'ensemble du domaine de vol des avions, du ralenti au plein gaz (décollage) en passant par le régime de croisière et le cas particulier du rallumage en haute altitude, lorsque le carburant, très froid, peine à se pulvériser et à se vaporiser. Ces bancs d'essais sont pour la plupart équipés d'accès optiques permettant ainsi la mise en œuvre de nombreux diagnostics. La figure 2 présente les domaines de fonctionnement des principaux bancs d'essais de l'ONERA utilisés pour l'étude de la combustion aérobie dans les foyers de turbomachines.

Les études qui sont menées au sein de ces installations ont pour objet de caractériser/mesurer les écoulements (vitesse, température), la pulvérisation du carburant par les injecteurs, la stabilité de la combustion ou l'efficacité des techniques de refroidissement des parois internes de la chambre, sans oublier le contrôle des niveaux d'émissions polluantes. C'est en effet dans la chambre de combustion que le combustible réagit avec l'oxygène de l'air pour produire des gaz brûlés, essentiellement du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O), mais aussi des espèces minoritaires polluantes comme les oxydes d'azote (essentiellement NO et NO_2 , couramment réunis sous le vocable NO_x), le monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils (COV) et des particules de suies que l'on trouve souvent mentionnées PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1 ou

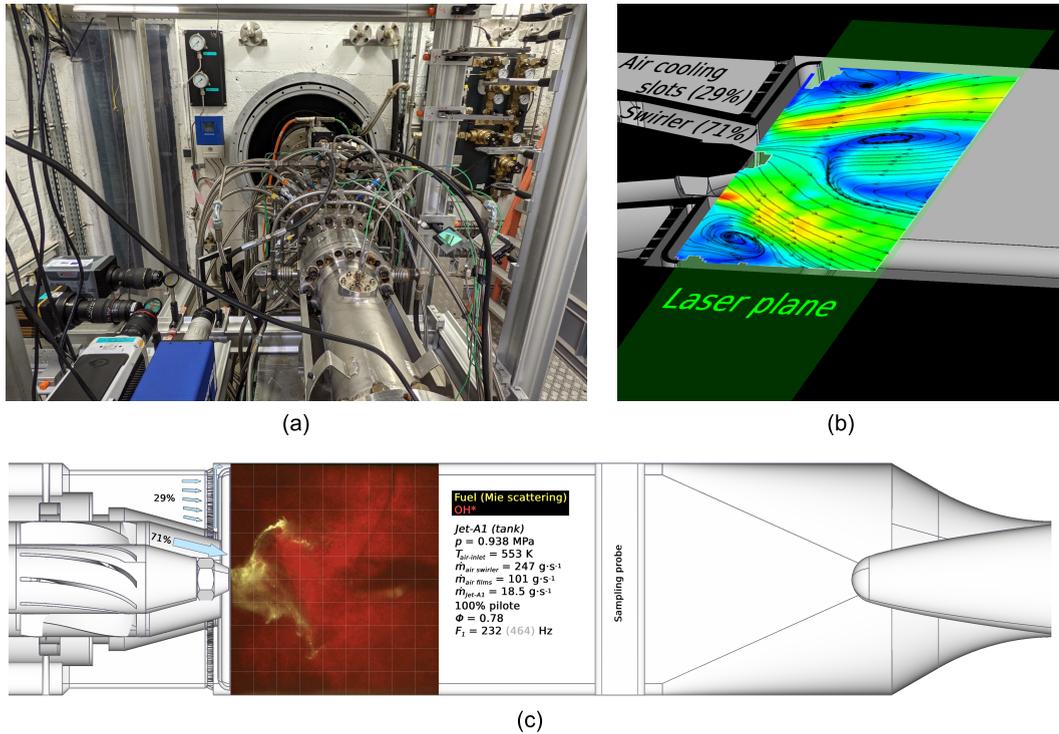


FIGURE 3. Banc MICADO (a) équipé de plusieurs diagnostics optiques (on note la présence de 4 caméras en bas à gauche), mesure de champ de vitesse par imagerie de particules (b) et vue du foyer en fonctionnement montrant en fausses couleurs le spray de kérosène (en jaune) et la flamme (en rouge) (c).

$\text{PM}_{0,1}$ (PM est l'acronyme anglais de *particulate matter* et le chiffre qui suit désigne le diamètre maximal en μm des particules considérées).

Ces particules de suie sont des agrégats issus d'hydrocarbures imbrûlés majoritairement constitués d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (ou HAP), molécules comportant plusieurs cycles benzéniques (les molécules dérivées du benzène sont appelées composés aromatiques).

Les particules de suies sont surtout produites lorsque le moteur fonctionne à pleine puissance, de même que les NO_x , alors que le CO, fruit d'une combustion incomplète, se forme plutôt à bas régime. L'art des motoristes consiste donc à trouver le meilleur compromis entre efficacité, sobriété, minimisation de l'empreinte environnementale, sans évidemment sacrifier la sécurité. L'ONERA les épaula dans cette tâche grâce à ses équipes mettant en œuvre des moyens d'essais, de diagnostic et de simulation numérique avancés.

La figure 3 présente une vue d'un banc d'essais, le banc MICADO (acronyme de « Moyen d'Investigation en Combustion Aérobie à l'aide de Diagnostics Optiques »), accompagnée d'exemples de diagnostics.

Récemment, dans le cadre d'un projet national portant sur la décarbonation du transport aérien par substitution de l'hydrogène aux carburants fossiles, l'ONERA a mis en œuvre l'ensemble de ces compétences et moyens pour concevoir, optimiser, réaliser un nouveau système d'injection à très faibles émissions. Celui-ci a été testé avec succès et caractérisé au banc MICADO fin 2022 [2]. La figure 4 présente des visualisations de la combustion aux différents régimes de

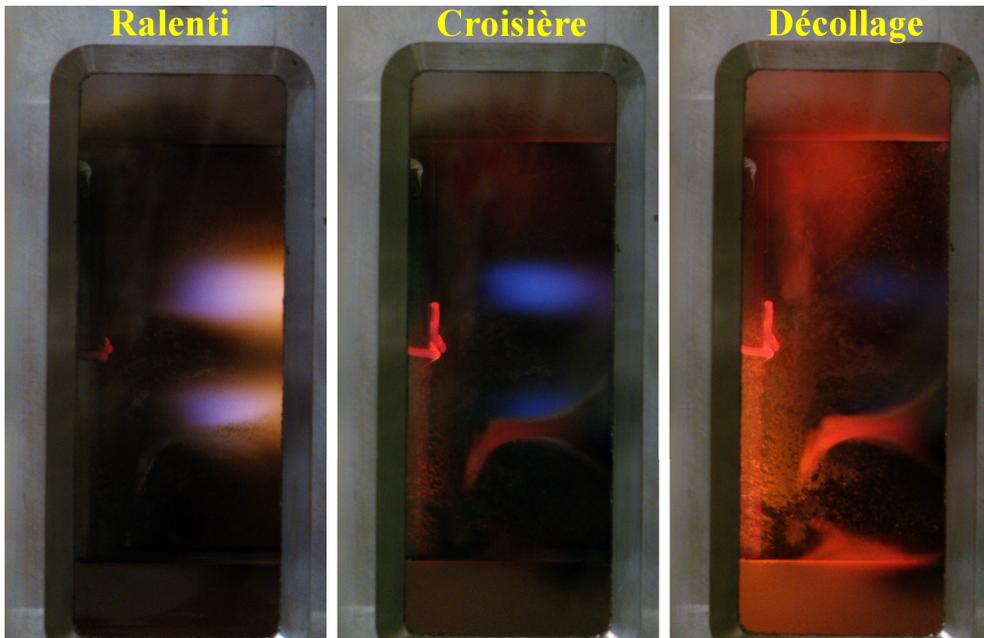


FIGURE 4. Visualisation d'une flamme d'hydrogène générée par un injecteur à très faible niveau d'émissions.

fonctionnement. Ces essais ont permis de démontrer la validité du concept proposé en mesurant des niveaux d'émission d'oxydes d'azote inférieurs à 10 ppm sur un large domaine de fonctionnement moteur. Ce concept a en outre fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet international conjointe avec le partenaire industriel.

Références

- [1] A. Cochet, V. Bodoc, C. Brossard, O. Dessornes, C. Guin, R. Lecourt, M. Orain, A. Vincent-Randonnier, « ONERA test facilities for combustion in aero gas turbine engines, and associated optical diagnostics », *AerospaceLab J.* (2016), n° 11, article no. 1.
- [2] J. L. Ruan, A. Vincent-Randonnier, G. Pilla, C. Irimiea, « Development of innovative low NOx hydrogen-fueled burner for aeronautic applications », in *TurboExpo 2023*, American Society of Mechanical Engineers, Boston, 2023, GT2023-100453.