

Préface

L'avenir de la planète ne peut laisser personne indifférent. Les problèmes d'environnement et plus particulièrement celui du réchauffement climatique nous concernent tous et demandent une mobilisation générale. L'industrie doit être particulièrement active pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre et trouver les solutions innovantes qui permettront une croissance durable, respectueuse de l'environnement.

Les industries de l'automobile et de l'aéronautique ont pleinement pris conscience de ces enjeux. Les véhicules modernes ont déjà fait beaucoup de progrès pour réduire leur consommation. La nouvelle réglementation CAFE (*Corporate Average Fuel Efficiency*) fixe des objectifs de réduction des émissions extrêmement ambitieux aux constructeurs automobiles, associés à de possibles sanctions financières. Pour l'aviation, les États se sont engagés auprès de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) à stabiliser les émissions du secteur à partir de 2020 et même à aller au-delà dans le cadre de l'accord de Paris, avec l'objectif de réduire de moitié les émissions de CO₂ d'ici 2050.

Les constructeurs appréhendent aujourd'hui ces sujets comme une exceptionnelle opportunité de proposer des technologies innovantes, tant au niveau de l'architecture des véhicules que des systèmes propulsifs. Toutes les nouvelles sources potentielles d'énergie sont explorées : biocarburants ou carburants synthétiques, moteurs électriques ou hybrides, moteurs à hydrogène, etc.

Au moins trois défis majeurs sont à relever dans cette recherche pour ces deux mondes de l'automobile et de l'aéronautique : l'optimisation du rendement propulsif, incluant la technologie moteur et la génération de la poussée ou de la traction, la réduction de la masse et la réduction de la résistance à l'avancement, que ce soit la traînée aérodynamique ou les frottements au sol.

Tout au long du XX^e siècle, les deux industries automobile et aéronautique se sont mutuellement inspirées, tant au niveau des composants et des matériaux que des moyens de production. Le même type de moteur thermique, à pistons, a notamment été utilisé dans l'application automobile et aéronautique pour certains petits avions. Le pilotage automatique a été introduit d'abord dans le domaine aéronautique et on peut observer désormais son intégration progressive dans les voitures modernes avec de nouvelles fonctions de conduite autonome. Un autre exemple de similitude entre les deux industries est le recours de plus en plus systématique aux matériaux composites.

Cet ouvrage dresse une comparaison détaillée des défis énergétiques, en mettant notamment l'accent sur la question du stockage de l'énergie, qu'elle soit électrique ou sous forme d'hydrogène, qui constitue à ce jour l'un des principaux enjeux pour les deux industries.

Il montre le défi majeur que constitue l'objectif d'une automobile, d'un hélicoptère et d'un avion à zéro émission. Mais il donne aussi espoir dans la capacité de ces industries extrêmement innovantes à maîtriser les technologies nécessaires et à s'enrichir mutuellement des expériences et progrès réalisés par chacun pour aller vers ce but, réveillant ainsi l'esprit des pionniers qui ont toujours su relever les défis qui se présentaient à eux et permettant à ces deux modes de transport, qui font définitivement partie de nos vies modernes, de se construire un avenir, au profit des générations futures, et dans le respect de la planète et de son environnement.

Guillaume FAURY
Directeur général d'Airbus

Avant-propos

« Never believe in any theory until it's confirmed by experimentation
in various conditions and scales. »¹

Pr. Alexander A. Nikolsky,
Université de Princeton,
département d'ingénierie aéronautique

Le secteur du transport représente une part importante de la consommation énergétique dans le monde. Les technologies employées ont un impact sur l'épuisement des ressources non renouvelables et sur l'environnement, que ce soit la qualité de l'air (CO₂, particules fines, NO_x, etc.) ou les nuisances sonores.

Au-delà des solutions organisationnelles et comportementales, l'amélioration des technologies existantes ou le développement de nouvelles technologies est un enjeu majeur pour les années qui viennent. Après des décennies d'utilisation pratiquement exclusive d'énergie fossile, il est acté de la nécessité d'une transition énergétique. Plusieurs solutions, pas forcément nouvelles, sont développées ou envisagées pour l'automobile ou l'aéronautique : c'est le cas de l'électrique ou de l'hydrogène. Il apparaît qu'aucune solution n'est susceptible à court ou moyen terme d'offrir à elle seule un potentiel suffisant pour répondre en même temps au problème de la transition énergétique et du développement durable, et à la problématique de la mobilité, enjeu majeur pour le développement de la société de demain (social, économique). Il doit être envisagé que chaque solution devra être utilisée dans les décennies à venir de façon complémentaire.

1. « Ne jamais croire en une théorie avant qu'elle ne soit confirmée par l'expérimentation dans diverses conditions et à diverses échelles. »

Dans ce contexte et sur la base de leur expérience professionnelle et de leur culture, les auteurs ont décidé d'écrire cet ouvrage portant sur l'énergie et la motorisation des systèmes de transport du secteur de l'automobile et de l'aéronautique en faisant le lien entre la science et la technologie dans un contexte industriel.

Ce livre est destiné aux étudiants d'écoles d'ingénieurs, aux étudiants de facultés des disciplines de la mécanique, aux jeunes ingénieurs intégrant les entreprises du secteur de l'automobile ou de l'aéronautique et aux personnes souhaitant avoir une vision plus globale sur le thème proposé.

Un grand nombre d'ouvrages ont été écrits sur le domaine des énergies, chacun dans le domaine spécifique qui lui est propre. De même, il existe un certain nombre d'ouvrages dédiés à l'automobile ou à l'aéronautique. Les auteurs ont souhaité proposer un ouvrage permettant de mettre en perspective l'automobile et l'aéronautique, dont le besoin est quelquefois proche et quelquefois opposé et dont les solutions techniques peuvent être similaires, voire communes, ou au contraire très différentes. L'objectif a été de présenter l'ensemble de la chaîne de propulsion en partant du besoin énergétique du produit jusqu'au stockage de l'énergie en intégrant le(s) moteur(s) et les éléments de transmission de puissance.

La rédaction de cet ouvrage a été faite dans l'esprit de transmettre une culture technique et des savoir-faire afin d'accompagner les prochaines générations dans le développement des solutions futures. Il est le fruit d'une longue collaboration entre industrie et université.

Introduction. Elle décrit dans un premier temps une synthèse historique des principaux bonds technologiques dans le domaine des énergies ayant permis de faire évoluer l'automobile, l'avion ou l'hélicoptère ces dernières décennies. Cette synthèse permet d'amener l'idée que, dans les années qui viennent, des transformations similaires telles que l'électrification ou le développement de la mobilité urbaine constituent les nouveaux défis des industriels du domaine de l'aéronautique ou de l'automobile. Une seconde partie, à travers une approche fonctionnelle, introduit la formulation de Breguet-Leduc qui en première approche lie les caractéristiques de la structure (aérodynamisme et masse) et de l'énergie de propulsion (électrique ou énergie fossile) à la distance qui peut être parcourue par le produit (avion, hélicoptère ou, par extension, la voiture). Cette introduction apporte une première réflexion sur l'architecture du produit quant à sa consommation énergétique ou sur la productivité du produit en fonction de son usage.

Chapitre 1 : motorisation. Ce chapitre synthétise les méthodes pour obtenir l'ordre de grandeur de la puissance de la motorisation associée au produit et à sa

mission. Une première partie présente la théorie de Froude, nécessaire au dimensionnement de la puissance utile en vol stationnaire des voilures tournantes, puis justifie l'évolution de la puissance utile en vol d'avancement. Une deuxième partie détaille le cas de l'avion en distinguant la puissance nécessaire au décollage puis au vol d'avancement. La troisième partie introduit le cas de la voiture. Ce chapitre définit une sorte de moteur idéal pour répondre au besoin de puissance de chaque produit.

Chapitre 2 : technologies des moteurs. Suite logique du chapitre précédent, ce chapitre a pour objectif de décrire les différentes technologies des moteurs utilisés pour l'aéronautique ou l'automobile. Une première partie décrit le principe de fonctionnement des turbines à gaz et leur application aux turbopropulseurs ou aux turbomoteurs qui équipent les avions ou les hélicoptères. Dans ce cadre sont rappelés leurs cycles thermodynamiques et l'expression de leurs rendements en lien avec les éléments constructifs. Sont ensuite décrites les améliorations possibles de ces moteurs par le biais d'échangeurs permettant de récupérer les gaz d'échappement ou par l'hybridation électrique d'un turbomoteur. Une deuxième partie est consacrée aux moteurs électriques. Après avoir décrit les différentes technologies utilisées, plusieurs exemples d'utilisation sur la voiture, l'avion ou les aéronefs à voilures tournantes sont proposés. Une troisième partie concerne les moteurs à combustion interne à pistons. Sont rappelés les cycles thermodynamiques de ces différents types de moteurs (diesel ou essence) et une comparaison des performances de ces technologies ainsi qu'une introduction aux différents moyens techniques d'amélioration possible.

Chapitre 3 : transmission. Ce chapitre justifie la nécessité d'introduire une réduction de rapport fixe ou variable entre le moteur et l'élément de propulsion (rotor, hélice ou roues). Une première partie traite du cas des hélicoptères conventionnels puis des autres cas tels que les systèmes multirotors. Une deuxième partie présente le cas des avions à hélice puis à turboréacteur. Une troisième partie introduit le cas de l'automobile. Pour les moteurs thermiques, les technologies des boîtes de vitesses et leurs règles d'étagement sont décrites. Le cas des voitures à énergie électrique est aussi abordé.

Chapitre 4 : stockage. Ce chapitre décrit les technologies de stockage d'énergie pour les systèmes de transport tels que l'automobile ou l'aéronautique. Une première partie rappelle les différentes sources d'énergie disponibles et introduit la notion de vecteur d'énergie. Dans une seconde partie, sont décrites les formes de stockage utilisées ou potentiellement utilisables sur les voitures, les avions ou les hélicoptères. Le stockage électrochimique (batterie), les supercondensateurs, le stockage sous forme d'hydrogène liquide ou gazeux, le stockage sous forme de gaz comprimé, le

stockage mécanique inertiel ou le stockage d'énergie sous forme thermique sont ainsi détaillés.

Chapitre 5 : hybridation. Ce chapitre a pour objectif de montrer l'intérêt de l'hybridation et les différentes formules existantes. Une première partie traite de l'utilisation de l'hybridation pour augmenter l'autonomie de l'énergie initiale de propulsion (*Range Extender*). Il est proposé des exemples associés à l'automobile ou à l'aéronautique. Une deuxième partie traite de l'hybridation des moteurs thermiques pour l'automobile ou l'aéronautique. Plusieurs cas spécifiques comme l'hybridation parallèle ou mixte sont développés et donnés en exemple. Une réflexion sur les architectures d'hybridation est proposée pour conclure ce chapitre.

Les auteurs tiennent à remercier :

– la société Airbus Helicopters d'avoir bien voulu les autoriser à utiliser aux fins de réalisation de cet ouvrage les connaissances, l'expérience et le savoir-faire développés par ses salariés ;

– l'équipe du service d'innovation d'Airbus Helicopters qui a prêté son concours efficace à certaines études faites ;

– la direction de l'École nationale supérieure des arts et métiers et sa filiale de valorisation AMVALOR, pour leur collaboration ;

– les enseignants et étudiants de l'École nationale des arts et métiers d'Aix-en-Provence qui ont pu participer à certaines de ces études ;

Pierre Rougier, ingénieur navigant de l'hélicoptère Tigre Eurocopter, Christian Mercier, ingénieur en chef chaîne de la propulsion hybride d'hélicoptères Airbus Helicopters, Jan Kryszynski, professeur des universités à la Technologie Université de Lodz, et Philippe Malburet, enseignant de mathématique du secondaire, pour leur effort de relecture attentive et leurs conseils pertinents quant à la rédaction de cet ouvrage.