

VOL moteur

Le MAGAZINE du PILOTE ULM



ESSAI MULTIAXES

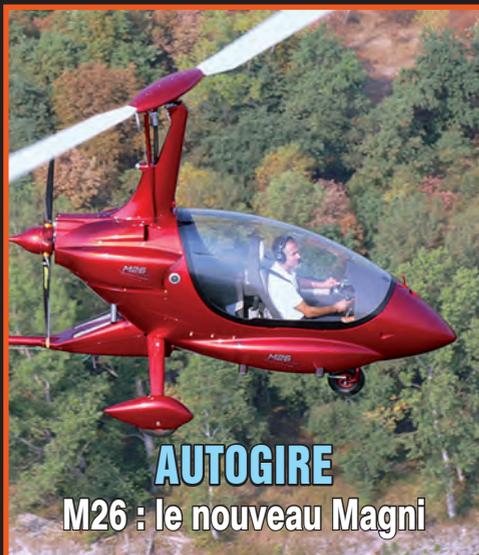
Savannah ou Ventura LEQUEL CHOISIR ?

MOTEUR
Le point sur l'électrique

PILOTAGE
Le décollage



INTERVIEW
En ULM contre les incendies !



AUTOGIRE
M26 : le nouveau Magni

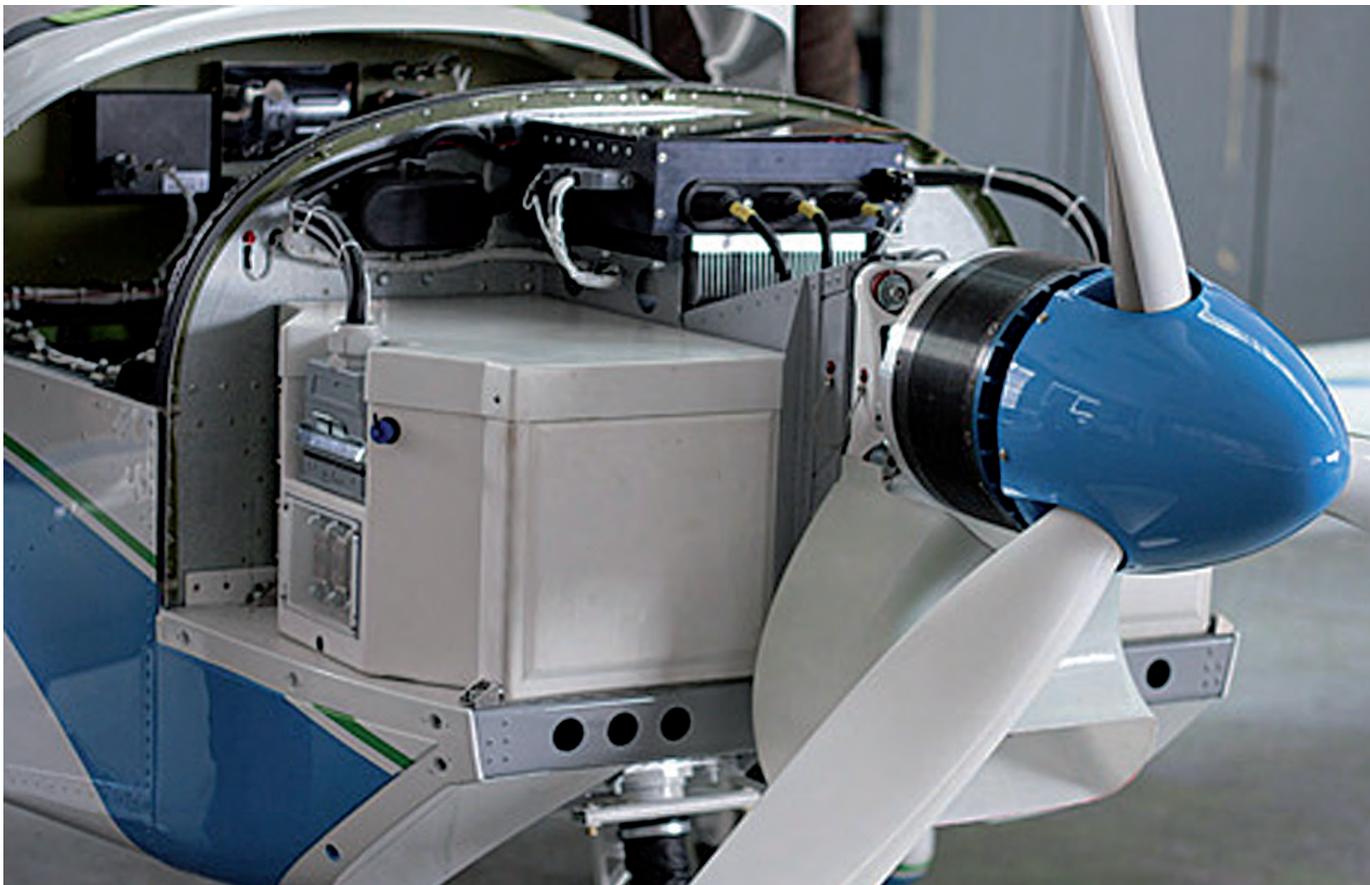


CONSTRUCTION AMATEUR
Restauration d'un ULM ancien

SALON
AirVenture 2022 à Oshkosh
J'IRAI POSER CHEZ VOUS
À Saint-Jean-d'Avelanne, en Isère



n° 439 > septembre 2022 > 7,70 €
BEL, LUX, DOM, PORT. CONT. : 8,70 € • CAN : 13,50 \$ca
TOM : 1 260 XPF



Thermique **OU** électrique ?

Cela fait (très) longtemps qu'on parle de motorisation électrique. Les sceptiques ne manquent pas d'arguments pour contester l'intérêt de la formule dans l'aérien. Pourtant, au-delà de la pléthore de projets et de prototypes, certains prometteurs, d'autres plutôt ubuesques, on trouve maintenant sur le marché des ULM électriques qui volent très bien.

Texte : Christophe Huchet

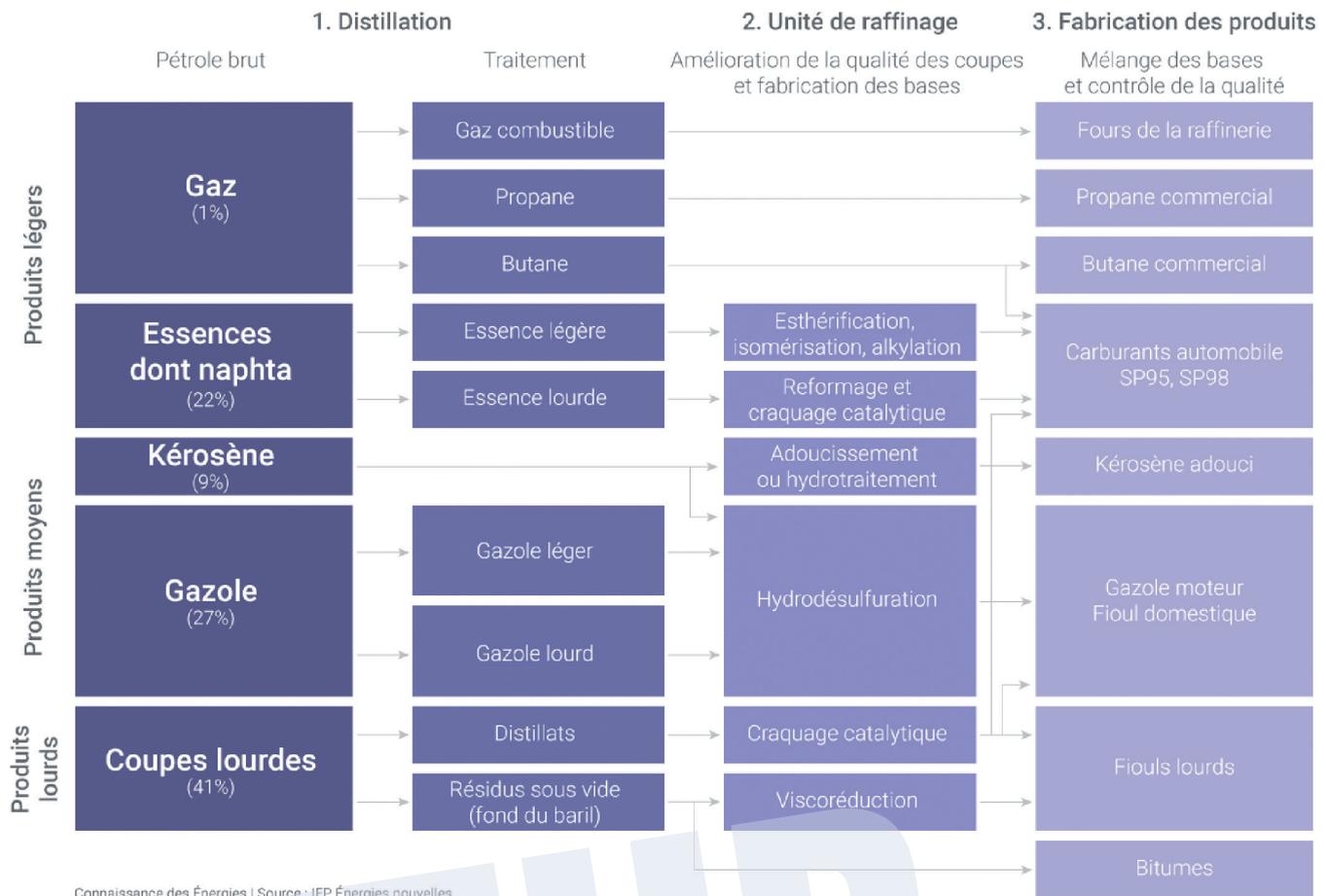
Tableaux et illustrations : Christophe Huchet, constructeurs

Un peu d'histoire

À la fin du 19^e siècle et au début du 20^e, le moteur électrique s'est très rapidement révélé comme étant la solution la plus simple permettant le déplacement autonome sur terre. Profitons-en pour préciser, une fois n'est pas coutume, que la Belgique était un des pionniers en la matière, sinon le leader : la « Jamais contente », développée par la Compagnie générale belge des transports automobiles Jenatzy, fut le premier véhicule terrestre à propulsion électrique à dépasser 100 km/h, le 29 avril 1899. En aviation, les premiers moteurs électriques ont été utilisés à la même période sur des aérostats, afin de gérer leur direction. Et pour la petite histoire, durant la Première Guerre mondiale, un hélico électrique alimenté par un câble (!) a été utilisé (très peu), avant de prendre feu.

Les faibles autonomies et les moyens limités de recharge et de stockage de l'énergie rendaient cette solution très défavorable en comparaison du pétrole, alors au début de son exploitation de masse, qui autorisait une autonomie (presque) illimitée pourvu que l'on disposât de réservoirs suffisants et de moyens de les remplir facilement.

Pétrole Principe du raffinage



Connaissance des Énergies | Source : IFP Énergies nouvelles

Tableau de synthèse de la distillation des produits pétroliers.

L'hégémonie du thermique

Il s'ensuivit un siècle de domination écrasante des moteurs thermiques, que l'industrie n'a cessé de faire évoluer, gagnant en fiabilité par l'amélioration de la métallurgie et des outillages de fabrication, réduisant les poids tout en augmentant les puissances. Ensuite (tardivement) sont arrivés d'autres carburants que l'essence, comme le gas-oil (que nous autres volants appelons Jet A1 ou kérosène). Si l'on fait un petit retour sur les productions issues du pétrole, il est intéressant de voir les volumes de carburants issus de la distillation du pétrole brut, illustrés dans le tableau ci-dessus (synthèse de la distillation des produits pétroliers).

On se rend compte que le développement des moteurs thermiques a suivi les volumes de production des produits pétroliers (étonnant, non ?). Il aura fallu 1973 et le premier choc pétrolier pour que les compagnies fassent la promotion du gas-oil en finançant le développement des moteurs diesel par les constructeurs, avec pour objectif d'utiliser les

énormes volumes de ce produit, majoritairement invendu à l'époque, et jusqu'alors détruit par des moyens qu'il est préférable de taire aujourd'hui... C'est le début de l'ère du « tout diesel » pour les moteurs terrestres.

Pourquoi l'industrie aéronautique légère n'en a pas profité ? Pour deux raisons principales :

La première, ce sont les faibles volumes de production des moteurs utilisés par ce secteur, qui ne permettaient pas aux motoristes de dépenser les mêmes budgets en R&D que ceux consacrés aux moteurs terrestres, fabriqués en des quantités infiniment plus importantes.

La seconde c'est que les constructeurs d'avions étaient limités pour ne pas dire bridés par la « certification » qui, si elle permet aux avions de ligne de voler en toute sécurité, était et demeure un carcan s'opposant à toute velléité de modernisation ou d'évolution de solutions techniques gravées dans le marbre, et exploitant le surpuissant levier de la sécurité pour faire admettre par le plus grand nombre qu'il n'y a pas d'autres solutions...

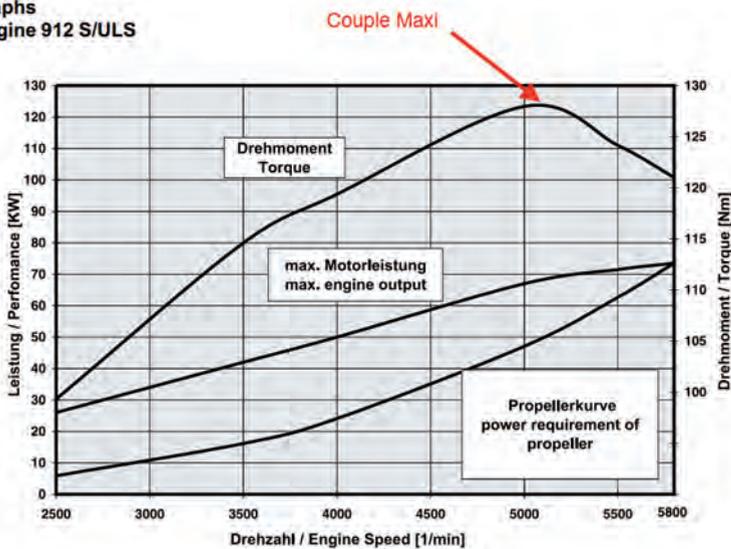
| Source/Type | Réaction | Énergie spécifique (kWh/kg) | Énergie spécifique (MJ/kg) | Densité d'énergie (MJ/l) | Utilisations |
|--|-----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---|
| Essence | Chimique | 13,1 | 47,2 | 34 | Moteurs de véhicules |
| Fioul/carburant diesel | Chimique | 12,6 | 45,4 | 36,4 | Moteurs de véhicules, chauffage domestique |
| Kérosène | Chimique | 11,9 | 43 | 33 | Moteurs d'avions |
| Accumulateur lithium-air | Électrochimique | 2,5 | 9 | | Appareils électroniques portables, véhicules électriques (en développement) |
| Accumulateur lithium-ion | Électrochimique | 0,2 | 0,72 | 0,9-2,23 | Appareils électroniques portables, véhicules électriques |
| Accumulateur nickel-hydrure métallique | Électrochimique | 0,08 | 0,288 | 0,504-1,08 | Appareils électroniques portables, lampes de poche |
| Batterie au plomb | Électrochimique | 0,0277 | 0,1 | | Démarrage de moteurs de véhicules |

Densité énergétique des différents carburants et accumulateurs électriques.

Pour ces raisons, les moteurs utilisés en aviation légère, conçus pendant la Deuxième Guerre mondiale et juste après celle-ci, sont toujours d'actualité de nos jours, imposant des technologies obsolètes depuis des générations (magnéto, vis platinées...), ainsi que l'emploi d'essence aviation 100LL contenant du plomb, pourtant interdite pour les véhicules terrestres (depuis plus de 22 ans en Europe). Ça, ce sera le sujet d'un autre article, promis.

« C'est des solutions techniques éprouvées, ça marche, pourquoi changer ? » vous dira Régis (du bar de l'aéroclub), passant sous silence les multiples pannes, les consommations gargantuesques ou les échappements libres, et se faisant ainsi le relais des motoristes traditionnels, dont les (très) faibles investissements en R&D pour améliorer leurs productions ou les renouveler leur a permis, durant des décennies, de s'enrichir et de verser des royalties faramineuses à leurs actionnaires.

graphs Engine 912 S/ULS



Courbes de couple et de puissance d'un moteur thermique Rotax 912 S.

Nouvelle génération de moteurs

Dans ce paysage, et peut-être grâce à lui, sont apparus des industriels qui se sont spécialisés dans les motorisations destinées aux aéronefs légers, voire ultralégers. Et c'est tant mieux pour nous (merci Rotax) car, sans eux, l'ULM n'existerait pas, ou du moins l'on n'assisterait pas à l'essor que connaît l'aviation très légère à travers le monde, sous divers régimes réglementaires (ULM, LSA, CS-23, Experimental, Ultralight, Microlight...). Ces « nouveaux » moteurs, apparus dans les années 90, sont tous conçus pour s'abreuver d'essence automobile (mogas), produite en plus grand volume, moins chère et moins polluante que la très controversée (à juste titre) essence aviation (avgas). Ils font la part belle à des métaux plus modernes (aluminium au lieu de fonte, traitements de surface...) qui ont permis l'allègement des groupes motopropulseurs (GMP), et à l'électronique, qui a remplacé les systèmes électromécaniques capricieux par des champs magnétiques, sans pièces en mouvement, beaucoup plus fiables (attention sur ce sujet Régis risque de vous expliquer que rien ne vaut la magnéto...).

Remarquez au passage l'ironie de l'histoire qui fait qu'aujourd'hui, après avoir décrié (doux euphémisme) les motorisations issues de l'ultraléger, les constructeurs d'avion s'empressent de les implanter sous les capots de leurs appareils, sous couvert de modernisme et d'évolution, mais en réalité par crainte (réelle et fondée) de la disparition définitive à court ou moyen terme de l'avgas, seul carburant admis par la majorité des moteurs d'avion traditionnels.

Rendement

Le rendement, c'est le ratio entre l'énergie produite et celle qu'il a fallu consommer pour la produire. Si l'on fait une comparaison brute, le moteur électrique, avec un rendement tournant autour de 90 %, enterre le moteur thermique qui, lui, revendique autour de 25 % : l'énergie qu'il consomme est principalement transformée en chaleur, plus qu'en force motrice. Sans oublier que moins l'air est dense, moins bon est le rendement d'un moteur, donnée d'importance dans l'aérien, à la différence du terrestre où elle a peu d'impact.

Ainsi, en se basant sur l'énergie contenue dans 1 litre d'essence, des chercheurs canadiens ont établi que si l'on savait stocker l'énergie de 50 litres d'essence dans la batterie d'une voiture électrique, celle-ci parcourrait 2 300 km avec cette recharge :

Énergie dans 1 litre d'essence = 33,6 mégajoules

Énergie dans 1 kWh = 3,6 mégajoules

Consommation d'énergie d'un véhicule électrique moyen : 20 kWh/100 km

→ $50 \times 33,6 / 3,6 / 20 \times 100 = 2\,333$ km parcourus

(source : <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>)

Évaluons le besoin en stockage de l'électricité que cela représente :

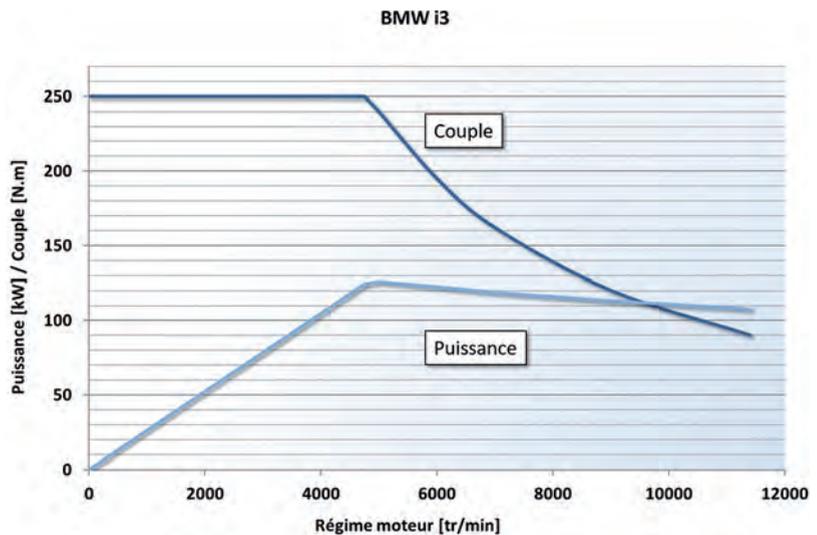
→ $50 \times 33,6 = 1\,680$ mégajoules = 466,66 kWh soit 466 660 Wh

Les tensions retenues pour les motorisations électriques de transport sont généralement comprises entre 250 et 600 V, avec une tension courante utilisée dans les calculs de 400 volts. Il faudrait donc une batterie d'une capacité de :

→ $466\,660 / 400 = 1\,166,55$ Ah

Pour mémoire, la plus grosse batterie disponible pour une Tesla Model S, de type LiNiCoAlO₂ (la technologie offrant à ce jour la plus haute densité d'énergie (exploitable industriellement), a une capacité de 100 kWh (250 Ah), pèse 600 kg, et vaut plus de 20 000 euros. Bien sûr, il s'agit ici de la projection d'une solution improbable, d'une caricature, mais qui en partant d'un volume de 50 litres de notre bonne vieille essence, illustre bien le fossé à combler avant qu'une concurrence directe soit possible : le chemin à parcourir pour procéder au remplacement du thermique par l'électrique risque d'être encore très long.

Cette batterie de Tesla Model S, d'une capacité de 100 kWh (250 Ah), pèse 600 kg et vaut plus de 20 000 euros : difficile à emporter sur un ULM !



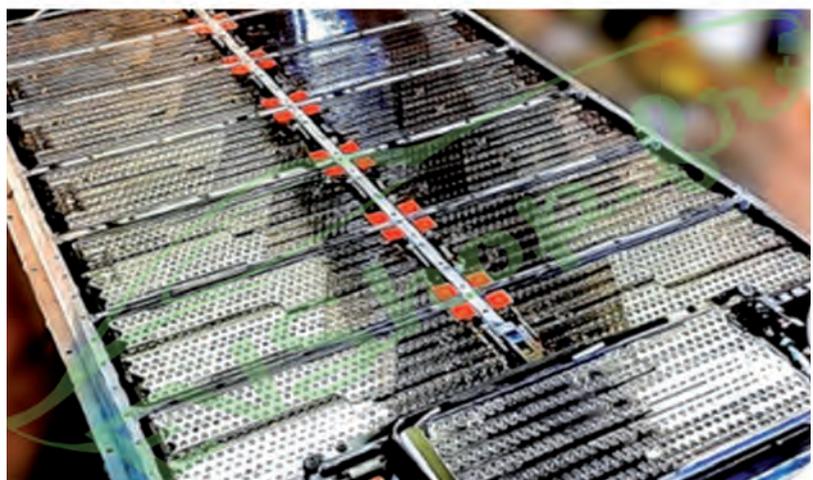
Courbes de couple et de puissance du moteur électrique de la BMW i3.

Caractéristiques des moteurs thermiques

Pour mettre en œuvre un moteur thermique, il est indispensable de disposer de multiples composants périphériques. Cela nécessite un réservoir pour le carburant, un démarreur et une batterie pour le démarrage, un système d'allumage, une pompe à essence pour l'alimentation en carburant, des carburateurs ou un système d'injection pour doser la puissance. Et, du fait des pièces mécaniques en mouvement, il faut disposer d'un circuit de lubrification complexe et refroidi, plus un autre refroidissement pour l'ensemble du moteur. La limite de la vitesse maximale admissible en bout de pale d'hélice impose en outre, dans le cas d'un moteur de faible cylindrée tournant vite comme les Rotax série 9, une démultiplication via un réducteur (qui a également pour effet d'augmenter le couple disponible à l'hélice). Tout cela pèse lourd ! Ajoutons que le principe même de ce moteur à combustion interne le rend à la fois bruyant et polluant.

Le carburant contenu dans le réservoir est une masse indispensable mais modulable en fonction des besoins (distance, chargement, devis de masse).

La puissance d'un moteur thermique est le produit du couple par le régime. Dans le cas d'un moteur atmosphérique, le couple est plus ou moins proportionnel au volume aspiré, donc à la cylindrée. La particularité d'un tel moteur est que le couple n'est pas constant, il croît avec le régime, puis atteint un point culminant, pour décroître ensuite, bien que le régime continue à augmenter.





Le petit monoplace e-Swan d'Avi Aircraft est commercialisé depuis plusieurs années.

Caractéristiques des moteurs électriques

Le moteur électrique, lui, est quasiment autonome si l'on excepte l'inverter AC/DC ou contrôleur, qui regroupe les fonctions d'alimentation, de transformation du courant stocké dans les batteries (qui selon les technologies embarquent ou non un BMS - Battery Management System), et de gestion du régime moteur, on parle de « chaîne de traction électrique ». Les solutions de réduction interne du régime (trains épicycloïdaux ou planétaires), lorsqu'elles sont nécessaires, n'ont pas un encombrement important et n'imposent pas de système complexe de lubrification. Il ne sera dès lors souvent nécessaire que d'un circuit de refroidissement pour maintenir la bonne température du moteur et également des batteries. Cette simplicité fonctionnelle est un net avantage en termes d'intégration de masse du GMP électrique, et d'encombrement, ce qui n'est pas négligeable dans l'aérien léger !



Le dernier-né d'Air Création : le monoplace E-Pixel à moteur électrique Geiger.

Par ailleurs, avec un moteur électrique, on dispose immédiatement de la totalité du couple, qui reste constant sur toute la plage de régime. Ce qui permet une variation parfaitement linéaire de la puissance en fonction du régime (sans « creux » et sans à-coups), pour une capacité de traction optimale et presque sans vibration.

Le « carburant » électrique n'a pas de poids physique, mais il impose des dispositifs de stockage solides, les batteries, qui malgré les avancées technologiques de ces 15 dernières années et la fiabilisation des technologies tel que le lithium ion, restent très lourdes. De plus, cette masse est difficilement modulable dans son implantation et demeure pleine et entière du début à la fin du vol, que la batterie soit chargée ou non. Un moteur électrique est beaucoup plus léger qu'un moteur thermique : à peine 43 kg pour le E-811 de 77 ch de Pipistrel, avec son contrôleur, faisceaux électriques compris, contre environ 80 kg pour un Rotax 912. Il est en théorie possible de transformer cet avantage de poids du GMP en batteries. Mais le centrage des masses ne laisse pas la liberté que l'on a sur un engin terrestre, et les batteries sont « solides », par opposition à l'essence « liquide », ce qui complexifie encore leur conditionnement et leur positionnement sur un aéronef. Le morcellement des batteries (dans les ailes, le fuselage, les plans fixes...) imposerait des cheminements de câbles de grosse section et des canalisations de circulation de liquide pour assurer le maintien en température...

S'il était possible d'emporter l'équivalent du volume de carburant en énergie électrique avec le même poids, alors nous disposerions d'un système de propulsion fiable et léger, non polluant, et qui, de plus, serait silencieux ! Hélas les faits sont là, et le stockage de l'électricité dans les batteries, en l'état de la technologie actuelle, rend difficile l'utilisation de cette énergie pour le vol de nos ULM dans leur grande majorité.

Monoplaces électriques

Cependant, si l'on se concentre sur les machines les plus légères, on se rend compte qu'avec des monoplaces basiques, il est possible de disposer de petits aéronefs ludiques, propulsés par un moteur électrique disposant d'une autonomie de 45 à 90 minutes, en adéquation avec leur programme d'utilisation. Pour n'en citer que quelques-uns, ceux que l'on devrait voir au Mondial de l'ULM à Blois, par exemple, il y a le pendulaire ANT de chez Aéros, et le tout nouveau E-Pixel d'Air Création. Ou encore le multiaxes e-Swan d'Avi Aircraft.

Que ce soit pour des tours de pistes en mûrissement, ou pour des sauts de puce sur les plateformes proches, ces machines élargissent le champ des possibles de par leurs faibles besoins (longueur de piste,

| | Velis Club | Velis Electro | | Alfa Trainer | Alfa Electro | |
|---------------------------------|-------------|---------------|-------|--------------|--------------|------|
| Moteur | Rotax 912 S | E-811 | | Rotax 912 | PEM60 MVLC | |
| Puissance maxi (kW) | 73,5 | 57,6 | -15,9 | 58,8 | 60 | +1,2 |
| Puissance croisière (kW) | 55 | 50 | -5 | 44 | 50 | +6 |
| Masse à vide (kg) | 321 | 428 | +107 | 287 | 368 | +81 |
| Charge utile (kg) | 279 | 172 | -107 | 185 | 182 | -3 |
| Autonomie maxi (h) | 5,5 | 1,5 | -4 | 4 | 1 | -3 |
| Temps de recharge | - | 1,5 à 2 h | | - | 1,5 à 2 h | |

Comparaisons entre le Velis Club et le Velis Electro d'une part (certifiés), ainsi qu'entre l'Alpha Trainer (ULM) et l'Alpha Electro (LSA) d'autre part.

place de stockage, infrastructures...) et leur silence de fonctionnement (adieu le chant du pot de détente, que les pilotes comparent à une abeille et la maire de Poitiers à un nuisible !). La possibilité de voler en respectant le voisinage, et dans une certaine mesure l'écologie, est une perspective intéressante et importante, en cette période de « bashing » de l'aérien.

Personnellement, je trouve cette perspective enthousiasmante. On se prend à rêver d'une évolution de notre réglementation qui autoriserait l'élève pilote, après un nombre d'heures déterminé et fonction de ses aptitudes, à effectuer des vols supervisés autour de sa base, à partir du moment où il serait lâché par son instructeur, transformant ainsi le coût de ces heures de vol en un investissement dans sa propre machine jusqu'au jour où, après quelques heures sur un appareil en double avec son instructeur, il obtiendrait son brevet. Il lui serait alors possible de voler en toute autonomie sur SA machine avant que la confiance en lui et l'envie de se charger d'âme lui fasse passer sa qualification d'emport de passager... Ok, je me pose !

Le cas Pipistrel

La marque, synonyme de finesse dans l'esprit des ulmistes, a été la première à industrialiser la propulsion électrique pour des aéronefs. Ce n'est pas une mince performance, d'autant qu'elle propose un avion certifié, le Velis, et un ULM, l'Alpha Trainer, en versions thermiques et électriques. Ce qui permet une comparaison immédiate et pertinente (voir tableau ci-dessus), la certification apportant toutefois son lot de contraintes techniques comme la redondance : le pack de batteries n'y échappe pas, sans pour autant doubler l'autonomie.

Une trentaine de Velis Electro et deux Alpha Electro sont en exploitation en France. Christian Stuck, de Finesse Max, importateur de la marque, affirme que les aéroclubs qui exploitent ces machines sont satisfaits, tout en précisant qu'elles répondent à un programme spécifique, et ne peuvent être utilisées comme des couteaux suisses permettant l'écologie du tour de piste à la navigation, comme d'autres appareils. Il souligne que sur certaines plateformes, l'adoption d'appareils électriques permet de concilier les besoins d'atterrissages répétitifs pour la formation des élèves pilotes, et le désir de tranquillité des riverains...

En constatant l'importante supériorité numérique des avions (pourtant 50 % plus chers que l'ULM, au coquet tarif de 158 000 euros) dans ce parc électrique, on s'aperçoit que le budget n'est pas le critère premier dans la décision d'achat, contrairement à la réduction des nuisances et impacts écologiques, chapitres sur lesquels l'ULM a beaucoup d'avance.

Le kit Aeromarine pour l'électrification d'appareils hyper-légers (réglementation Part 103 américaine).





Le dispositif DEPOD d'Aeromarine permet de fournir une puissance additionnelle pendant de courtes périodes, au décollage par exemple.

Solutions complètes

Fort de son expérience et de ses développements, Pipistrel s'est également positionné en tant que fournisseur de chaînes de traction électrique, et des systèmes de charge indispensables à l'exploitation, qui sont commercialisés afin d'être intégrés sur d'autres machines. À lire les articles dans les magazines aéronautiques d'outre-Atlantique, cette longueur d'avance dans la maîtrise et l'industrialisation de la motorisation électrique aurait pesé favorablement dans la balance lors du rachat de la marque au début de cette année par Textron (groupe propriétaire, entre autres, de Beechcraft, Cessna et Gulfstream).

MGM-Compro, l'entreprise tchèque qui a participé au projet e-Fan d'Airbus, à celui de l'Extra 300 LE électrifié par Siemens, et au développement du Rover Perseverance de la Nasa, propose aussi des chaînes de traction électrique de 30 à 80 kW parfaitement adaptées à l'ULM, ainsi que l'ensemble des auxiliaires indispensables à leur exploitation (station de recharge...).

Citons encore l'Américain Aeromarine, qui vend des kits électriques complets pour des machines type « Part 103 » (monoplaces de moins de 115 kg à vide). J'en profite pour évoquer au passage l'intéressant dispositif DEPOD (Distributed Electric Power On Demand) proposé par ce fabricant, qui consiste en de petits moteurs électriques intégrés aux extrémités des ailes, destinés à fournir une puissance additionnelle sur une courte durée, afin de décoller et de se poser (très) court ou de franchir un obstacle.

Il est donc aujourd'hui possible de trouver des solutions « presque » packagées pour concevoir des machines à propulsion électrique, ou pour remplacer des motorisations existantes. Ces opportunités sont séduisantes car, avec notre réglementation assez libérale, le vol électrique est envisageable dans des conditions de sécurité et de coûts réalistes, si l'on accepte le faible rayon d'action que cela induit. Attention à ne pas se prendre pour autant pour ce que les pilotes ne sont pas tous... des concepteurs. C'est un vrai métier. (Régis aurait commandé sur Internet un moteur électrique pour son Sky, affaire à suivre...).

Des packs de batteries amovibles ?

Un pack sur l'aéronef, pendant que l'autre est en charge, à l'instar de ce qui existe dans l'outillage électro-portatif... Cela paraît être une solution séduisante. Mais elle se heurte à de nombreux obstacles. Les connecteurs électriques et hydrauliques (pour le circuit de refroidissement) devront être de qualité militaire « heavy duty » pour supporter des connexions et déconnexions à répétition, ce qui en plus de charger le devis de masse alourdira notablement la facture finale. Et dans le cas de l'aviation certifiée, il faudra prévoir l'intervention d'un mécanicien titulaire d'une licence Part 66, avec habilitation électrique, à chaque changement de pack de batteries ! Les quelques gros aéroclubs qui disposent de ces personnels devront en plus les faire travailler le dimanche et les jours fériés, lorsque la demande de vols est forte. Ça paraît déjà moins pertinent, le coup des packs amovibles...

Perspectives

Dans un contexte où l'opinion publique favorise « l'écologie immédiate » (qui ne tient pas compte de la production, ni des infrastructures, ni du recyclage) est née une volonté de remplacement du moteur thermique par le moteur électrique qui tend à vouloir les opposer. L'aérien n'y échappe pas, ce qui est selon moi contre-productif, car même si je suis un produit du moteur thermique, j'ai de tout temps prêté une oreille attentive au développement de l'électrique, auquel j'ai modestement contribué avec le développement de formations de techniciens véhicules électriques à destination des constructeurs d'automobiles, et en participant avec l'Ademe à une étude sur la seconde vie des batteries.

J'ai la conviction que l'électrique a sa place dans le paysage aérien. Mais quelle est-elle exactement ? Seules les évolutions technologiques à venir (qui, soyons réalistes, ne laissent pas présager de révolution dans la prochaine décennie) et les décisions politiques, influencées ou non par des lobbies industriels et/ou écologiques, permettront (ou pas) le développement durable d'une aviation « décarbonée ». Dans l'état actuel des connaissances, l'aéronef électrique, s'il n'est plus une chimère, reste pénalisé par un ratio de densité énergétique de ses batteries qui le cantonne à un programme de tours de piste et de sauts de puce pour encore de très longues années. N'en déplaise aux virtuoses de l'animation 3D qui nous gratifient sur les réseaux sociaux de « projets » plus irréalistes les uns que les autres, très appréciés des politiques de l'ère du « green-washing »... Je reste néanmoins persuadé que nous allons assister à un foisonnement de projets, souvent appuyés par les instances locales (pas toujours très réalistes), qui permettront au plus grand nombre si ce n'est de découvrir les joies du vol, au moins d'en rêver... ●



Pour des batteries de forte capacité, une solution de charge dédiée s'impose : ici, la station Skycharge de Pipistrel.

