



**HAL**  
open science

## Scénarii pour l'aérodrome autonome

P Gilliéron

► **To cite this version:**

P Gilliéron. Scénarii pour l'aérodrome autonome. Congrès Français de Mécanique, Association Française de Mécanique (AFM), Aug 2015, Lyon, France. hal-01198393

**HAL Id: hal-01198393**

**<https://hal.science/hal-01198393>**

Submitted on 12 Sep 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

# Scénarii pour l'aérodrome autonome

P. GILLIÉRON<sup>a</sup>

a. Chercheur indépendant, rdmfa.pgillieron@orange.fr

## Résumé :

*Des ordres de grandeur sont estimés pour les énergies nécessaires à des vols électriques d'une heure en conservant quinze minutes de sécurité. Pour des énergies massiques de batteries n'excédant pas 150 Wh/kg et un avion école monomoteur, la masse embarquée de batteries ne peut excéder 200 kg et conditionne des valeurs à ne pas dépasser pour le coefficient de traînée, la vitesse de vol et la masse de l'avion. Différentes solutions sont ensuite proposées pour recharger les batteries d'avions électriques au sein d'un aéroclub et d'un aérodrome. Les résultats montrent qu'il est possible de produire l'énergie journalière nécessaire aux besoins de dix aéroclubs disposant chacun de trois avions électriques.*

## Abstract :

*The necessary energy to an electrical flight for one hour fifteen minutes with security reserve is estimated. For a energy density equal to 150 Wh/kg and a single-engine training aircraft, the battery mass onboard cannot exceeded 200 kg and influences the drag coefficient, flight velocity and weight of the aircraft. Different solutions are then suggested to recharge the batteries of electric aircrafts of a flying club and of an aerodrome. The results shows that it is possible to produce the energy for daily needs of ten flying clubs with three electric aircraft each.*

**Mots clefs : aircraft, electrical flights, battery**

## 1 Introduction

Depuis quelques années, les progrès réalisés sur les batteries et l'allègement permettent d'imaginer des solutions électriques pour faire voler des maquettes, des drones puis des avions. En 2005, un drone aérien désigné SoLong UAV, de masse  $M=2,6$  kg et de 4,75m d'envergure, alimenté par des panneaux solaires, se maintient en vol plus de 48 heures [1]. Le premier vol électrique est effectué par l'avion Électra le 23 décembre 2007. L'appareil, développé par la société Électravia et propulsé par un moteur électrique de 19 kW, est alimenté par des batteries lithium-polymère [2]. Le vol effectué en circuit fermé dure 48 minutes et constitue une première mondiale. Ce même moteur électrique associé au même type de batteries équipe depuis 2009 le moto planeur Alatus-M Électrique 44-1AOI [3]. Le 5 septembre 2010, un bimoteur de construction amateur désigné Cri-Cri, équipé d'un moteur de la même société, atteint la vitesse de 262 km/h puis de 283 km/h le 25 juin 2011 [4].

Plus récemment, le 25 avril 2014, le bimoteur tout électrique E-Fan, développé par EADS, ACS (Aero Composites Saintonge) et l'association Green Cri-Cri, effectue un premier vol [5]. L'appareil monoplace long de 6,67 mètres et de 9,50 mètres d'envergure toujours alimenté par des batteries lithium-polymère dispose d'une heure d'autonomie [6-7]. Le développement de cet avion

principalement destiné à la formation des pilotes constitue le projet central du plan "Avion Électrique et nouvelle génération d'aéronefs" mis en place par le ministère du redressement productif. Le projet est cofinancé par la DGAC, le Fonds Européen de Développement Régional (FEDÉR), le Fonds pour les REstructurations de la Défense (FRED), la région Aquitaine et le département de Charente-Maritime. Plusieurs entreprises contribuent à ce projet dont Dassault Systems, le CEA, Zodiac Aerospace, SAFRAN, DAHER-SOCATA, l'Institut Pprime (université de Poitiers) et plusieurs écoles d'ingénieurs. Deux modèles à deux côte à côte et quatre sièges disposant d'une autonomie de 3 heures seront **produits en série dans une usine de Mérignac dès 2017 pour être proposés à l'aviation légère**. Quarante à quatre-vingts avions seront fabriqués chaque année dans un premier temps [8]. Enfin, la société Pipistrel propose depuis peu un avion école électrique développé en coopération avec la société SIEMENS. Le moteur délivre 85 kW et les batteries peuvent être retirées pour être remplacées en quelques minutes (Quick Drop) . L'appareil désigné WATTsUP est biplace [9], dispose d'une heure trente d'autonomie dont une demi-heure de sécurité et a été récemment présenté au salon ULM de Blois.

En 2003, un projet d'avion solaire alimenté par des cellules photovoltaïques est initié par l'école polytechnique fédérale de Lausanne [10]. Propulsé par quatre moteurs électriques de 7,35 kW alimentés par 11628 cellules photovoltaïques distribuées sur les ailes et un stabilisateur horizontal, l'appareil, long de 22 mètres et de 63 mètres d'envergure, effectue son premier vol d'essais le 3 décembre 2009. L'énergie électrique excédentaire est stockée dans 70 accumulateurs et les hélices bipales de 3,50 m de diamètre tournent à une vitesse de 200 à 400 tr/min. Un tour du monde a commencé le 9 mars dernier.

## 2 Perspectives

Ces avancées technologiques rendent aujourd'hui crédible la perspective de voler sur des avions propulsés par la seule énergie électrique. La localisation, les superficies et les infrastructures dédiées aux activités de l'aviation légère suggèrent alors d'imaginer des solutions pour s'affranchir des énergies fossiles. Des solutions de recharge pour les batteries sont à imaginer pour préparer l'indépendance énergétique des aéroclubs et faire baisser les coûts d'utilisation.

Ces solutions se déterminent à partir des énergies nécessaires pour atteindre la vitesse  $V_r$  de rotation, atteindre l'altitude de vol à la vitesse  $V_m$  et maintenir une vitesse  $V_c$  de croisière en palier respectivement notées  $E_{IRA}$ ,  $E_{AV}$ ,  $E_{VC}$  et données par :

$$E_{IRA} = \frac{1}{\eta} \left[ M \left[ \frac{V_r^2}{2} + g \Delta Z + g C_r V_r \frac{\Delta t_o}{2} \right] + \frac{\rho}{2} S C_x V_r^3 \frac{\Delta t_o}{4} \right] \quad (1)$$

$$E_{AV} = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{1}{2} M (V_m^2 - V_r^2) + \frac{\rho}{8} S C_x \frac{1}{\gamma} (V_m^4 - V_r^4) + M g \Delta H + \frac{\rho}{2} S C_x V_m^3 \frac{\Delta H}{\tau} \right] \quad (2)$$

$$\Delta E_{VC} = \frac{1}{\eta} \frac{\rho}{2} S C_x V_c^3 \Delta t \quad (3)$$

avec  $\eta$  le rendement du moteur thermique ou de la batterie à l'hélice,  $M$  la masse de l'avion en kg,  $g$  l'accélération de la pesanteur en  $m/s^2$ ,  $\Delta Z$  la différence d'altitude entre la fin et le début de la piste d'envol,  $C_r$  le coefficient de roulement,  $\Delta t_o$  la durée du décollage de la vitesse nulle à la vitesse de rotation en s,  $\rho$  la masse volumique de l'air en  $kg/m^3$ ,  $S$  la surface alaire en  $m^2$ ,  $C_x$  le coefficient de traînée de l'avion,  $\gamma$  l'accélération de l'avion sur sa trajectoire en  $m/s^2$ ,  $\Delta H$  le gain d'altitude (du sol à l'altitude de vol) en m,  $\tau$  le taux de montée en m/s et  $\Delta t$  la durée du vol de croisière.

À ces énergies sont associés les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée pour des vols rectilignes effectués à la vitesse stabilisée  $V$  (montée, palier ou descente) :

$$C_z = \frac{2Mg \cos \alpha}{\rho S V^2} \quad (4)$$

$$C_x = \frac{2[\sigma W_o \eta - Mg V \sin \alpha]}{\rho S V^3} \quad (5)$$

avec  $\alpha$  l'angle entre la trajectoire et le plan horizontal en radians,  $\sigma$  le rapport entre la puissance utilisée et la puissance maximale du moteur et  $W_o$  la puissance maximale délivrée par le moteur en Watt.

La relation (4) permet d'estimer les variations relatives de la masse et de la vitesse pour des valeurs identiques de la surface alaire  $S$  et du coefficient de portance  $C_z$  par la relation :

$$\frac{\Delta M}{M} = 2 \frac{\Delta V}{V} \quad (6)$$

Ces équations permettent de quantifier l'énergie consommée sur une heure de vol par un avion à moteur thermique de 86 kW disposant de 350 kilogrammes de charge utile dont 150 kg pour les occupants et 200 kg pour l'énergie embarquée, figures 1 et 2. Les valeurs obtenues sont ensuite utilisées pour identifier les évolutions à apporter sur le coefficient de traînée, la vitesse de croisière et la masse totale de l'avion afin de permettre un vol électrique sans modifier la charge utile. Les calculs s'effectuent pour des batteries conditionnées<sup>1</sup> d'énergie massique égale à 150 Wh/kg et des pertes d'énergie pour la phase d'atterrissage (vent arrière, base et finale) majorées par des pertes de vol en croisière.

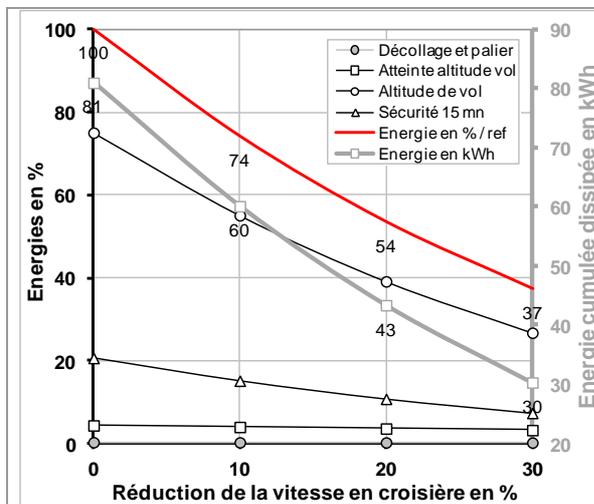


Fig. 1 – Pourcentages de réductions des énergies consommées sur le cycle (ordonnée de gauche) et énergie cumulée dissipée en kWh (ordonnée de droite) en fonction du pourcentage de réduction de la **vitesse** de l'avion en croisière.

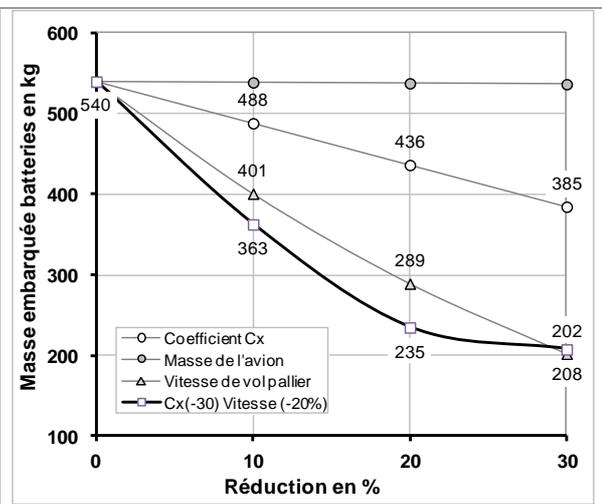


Fig. 2 – Evolutions de la masse embarquée de batteries en fonction du pourcentage de réduction pour le coefficient  $C_x$ , la vitesse de croisière et la masse de l'avion. Pour la **courbe noire**, la réduction de la vitesse de vol est limitée à 20%.

<sup>1</sup> Il est d'usage de distinguer l'énergie massique théorique de cellule, l'énergie massique de batterie et l'énergie massique de la batterie conditionnée. L'énergie massique théorique est relative aux seules espèces chimiques, l'énergie massique de batterie tient compte de la masse des espèces chimiques, de l'électrolyte, du séparateur, des connexions électriques et de l'enveloppe. L'énergie massique de la batterie conditionnée intègre la masse de la batterie et des différents composants nécessaires à son fonctionnement opérationnel (fixations, connecteurs divers, système de refroidissement....).

Les résultats montrent qu'un vol électrique d'une heure devient possible pour des vols d'entraînement effectués à proximité des aérodromes à condition de réduire la traînée aérodynamique de 30%, la vitesse de croisière de 20% et la masse totale de l'avion de 40%, voir les figures 1 et 2. Les calculs sont effectués en intégrant une réserve d'énergie de 15 minutes pour la sécurité. Les ordres de grandeur issus des calculs sont cohérents avec les caractéristiques, masse (550 kg) et vitesse (160 km/h en croisière), de l'avion électrique E-Fan développé par Airbus [5].

### 3 Les différents scénarii

Différents scénarii sont alors proposés pour recharger un ou plusieurs packs de 200 kg de batteries d'énergie massique 150 Wh/kg. Sont successivement analysées les recharges à partir de panneaux photovoltaïques, par volant d'inertie, par château d'eau puis par roue à aubes. La recharge par éolienne n'est pas envisagée, sur ou à proximité d'un aérodrome, pour des raisons de sécurité compte tenu de la couche limite terrestre et des effets de masque qui nécessitent des installations respectivement positionnées en hauteur et dispersées [11].

#### 3.1 Recharge par panneaux photovoltaïques

Les avions étant généralement rangés dans des hangars de grandes dimensions, la couverture des toits par des panneaux à cellules photovoltaïques capables de recharger des batteries peut constituer une solution intéressante. Les estimations qui suivent sont déterminées pour des hangars dont les surfaces au sol varient de 50 à 500 m<sup>2</sup>. Cette dernière surface permet de ranger au plus 9 avions.

Pour une constante solaire<sup>2</sup> égale à 1360 Watt/m<sup>2</sup>, la puissance solaire surfacique maximum reçue au sol lorsque le soleil est au zénith n'excède pas 1000 Watt/m<sup>2</sup>. Cette puissance surfacique est fonction de la nébulosité, de la position azimutale du soleil, de l'heure dans la journée et peut augmenter dans un environnement réfléchissant. Pour prendre en compte l'incidence de ces paramètres sur la puissance réellement accessible, un facteur de charge est défini à partir du ratio entre la puissance moyenne effectivement fournie et la puissance maximale, dite de crête. En France, ce facteur de charge est de 0,133 et la puissance surfacique moyenne réellement disponible<sup>3</sup> se réduit à 133 Watt/m<sup>2</sup>. Les résultats qui suivent sont établis sur la base de cette puissance moyenne.

Dans ces conditions et pour des rendements<sup>4</sup> de 0,15 (soit 20 Watt/m<sup>2</sup>), l'énergie récupérable après 6 heures d'ensoleillement en fonction de la surface de hangar couverte est reportée sur la figure 3. L'énergie issue du voltaïque permet d'alimenter 2 packs de batteries de 200 kg lorsque la surface atteint 500 m<sup>2</sup>. Cette configuration fournit l'énergie nécessaire à quatre<sup>5</sup> vols d'instruction d'une heure pour un avion disposant du plein d'autonomie et de trois packs de batteries chargées avant le premier vol. Cette solution peut convenir à des aéroclubs qui disposent d'un avion électrique volant principalement en fin de semaine.

Au niveau de l'aérodrome<sup>6</sup>, l'installation de panneaux photovoltaïques sur une partie des surfaces en

---

<sup>2</sup> Fonction de la distance au soleil, cette constante vaut 12300 Watt/m<sup>2</sup> sur Mercure, 3140 Watt/m<sup>2</sup> sur Vénus, et 600 Watt/m<sup>2</sup> sur Mars.

<sup>3</sup> Sans prendre en compte les pertes de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

<sup>4</sup> Des rendements de l'ordre de 0.25 sont obtenus à partir de silicium monocristallin mais leur coût de fabrication reste élevé. Des coûts de fabrication cinq fois moins élevés sont envisagés en utilisant la pérovskite.

<sup>5</sup> Cas d'un avion école utilisé le week-end en ayant rechargé 4 packs de batteries entre le lundi et le vendredi.

<sup>6</sup> L'ancienne base militaire de Dreux-Louvilliers (OTAN) située à 95 km à l'ouest de Paris est recouverte de 741150 panneaux photovoltaïques sur 130 ha et délivre 60 MWc (460 kWhc/ha). Elle constitue le plus grand parc photovoltaïque de France (exploitation EDF Énergies Nouvelles).

herbes inutilisées constitue une alternative plus intéressante. En admettant possible de recouvrir 10 à 50% de la surface d'un aérodrome<sup>7</sup> de 50 ha (hectare), le dégagement hors-piste en cas de perte de contrôle au décollage ou à l'atterrissage peut être résolu en choisissant de positionner les panneaux solaires dans le même plan que la piste. Il peut même être envisagé de concevoir des pistes d'envol<sup>8</sup> recouvertes de panneaux photovoltaïques assemblés sous un revêtement de verre antidérapant. L'expérimentation en cours<sup>9</sup> aux Pays-Bas constitue dans ce domaine une première mondiale [12-14].

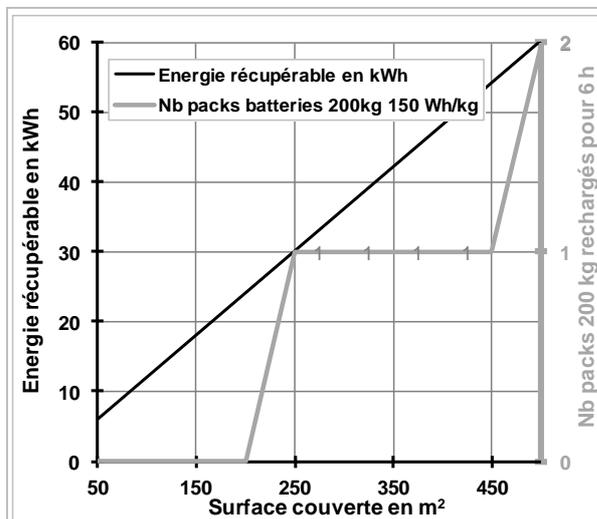


Fig. 3 – Énergie récupérable en kWh (ordonnée de gauche) et nombre de packs de batteries (ordonnée de droite) pouvant être rechargés en 6 heures d'ensoleillement en fonction de la surface de hangar couverte par des panneaux photovoltaïques.

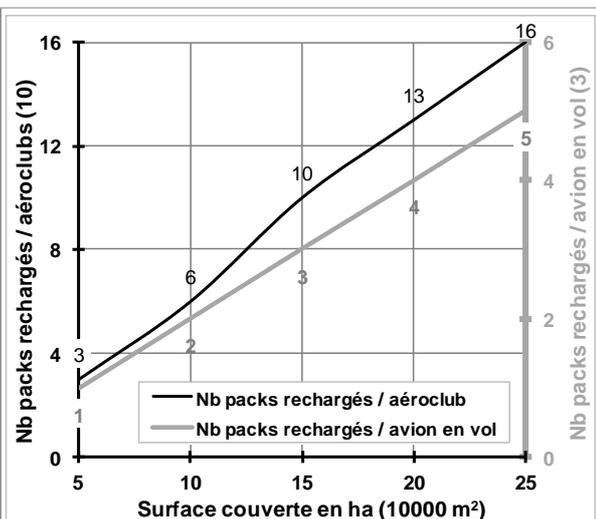


Fig. 4 – Nombre de packs de batteries rechargées (ordonnée de gauche) par aéroclub (10 aéroclubs) et par avion en vol (3 avions électriques / aéroclub, ordonnée de droite) pour 1 heure d'ensoleillement en fonction de la surface d'aérodrome couverte de panneaux photovoltaïques.

En supposant que l'aérodrome de 50 hectares puisse regrouper 10 aéroclubs et 100 avions (aérodromes de la région parisienne), les nombres de packs de batteries rechargées par aéroclub et par avion sont reportés figure 4 (resp. ordonnées de gauche et de droite). Les résultats montrent que 5 hectares, soit 10% de la surface totale, suffisent pour recharger en une heure 3 packs de batteries pour chacun des 10 aéroclubs. Cette capacité permet d'assurer la recharge d'au plus trois avions en vol. Avec 25 hectares, il devient possible de recharger 16 packs de batterie par aéroclub et par heure. La possibilité d'installer un parc de panneaux solaires en lisière ou sur les axes de pistes peut alors constituer un début de réponse écologique au développement des aérodromes autonomes. Des améliorations importantes sur le rendement des cellules photovoltaïques et sur la capacité de stockage d'énergie des batteries [15] restent cependant nécessaires pour pérenniser cette solution.

### 3.2 Recharge par volants d'inertie

Des volants d'inertie enterrés peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie mécanique de rotation qui est ensuite convertie en énergie électrique pour recharger les batteries. La mise en rotation des volants

<sup>7</sup> Exemples de superficie d'aérodromes : Orléans Saint-Denis de l'Hôtel 65 ha, Toussus-Le -Noble 167 ha, Chavenay 47 ha, Saint-Cyr l'Ecole 75 ha.

<sup>8</sup> Une piste d'envol de 1000 m sur 70 m de large offre une surface de 7 ha pour la captation d'énergie solaire.

<sup>9</sup> Projet SolaRoad, 70 mètres de piste cyclable recouverte de panneaux photovoltaïques de 2,5 m x 3,5 m sous un revêtement de verre antidérapant [12-13]. Un projet de route recouverte de panneaux photovoltaïques est en cours aux États-Unis [14].

d'inertie s'effectue à l'aide d'un moteur électrique alimenté durant les périodes tarifaires favorables et l'énergie de rotation est convertie à la demande en énergie électrique. Dans les développements qui suivent, le volant d'inertie est construit sur la base d'un cylindre plein de rayon  $R$  et de hauteur  $H=1$  m. Les calculs sont effectués en choisissant de restreindre les vitesses de rotation et le rayon extérieur afin d'éviter d'atteindre des vitesses soniques à la périphérie (340 m/s dans l'air à la température de 20°C).

Pour des rendements égaux à l'unité, le nombre de packs de batteries de 200 kg pouvant être rechargées est reporté sur la figure 5. Un volant d'inertie de rayon extérieur égal à 1 m dont la vitesse de rotation est au plus égale à 1000 tr/mn permet de recharger au mieux 6 packs de batteries de 200 kg. Les problèmes de sureté de fonctionnement, associés au besoin d'espace pour loger les volants d'inertie, aux coûts d'excavation et d'installation et à la faible capacité de recharge, rendent cette **solution peut intéressante**.

### 3.3 Recharge par château d'eau

La présence d'un château d'eau à proximité d'un aérodrome peut constituer une solution pour stocker de l'énergie et produire, à la demande et par l'intermédiaire d'un réseau de turbines Francis et d'alternateurs, l'énergie électrique nécessaire à la recharge des batteries. Comme pour le volant d'inertie, le pompage de l'eau vers le haut du château d'eau s'effectue durant les périodes tarifaires favorables et l'énergie potentielle est convertie à la demande en énergie électrique.

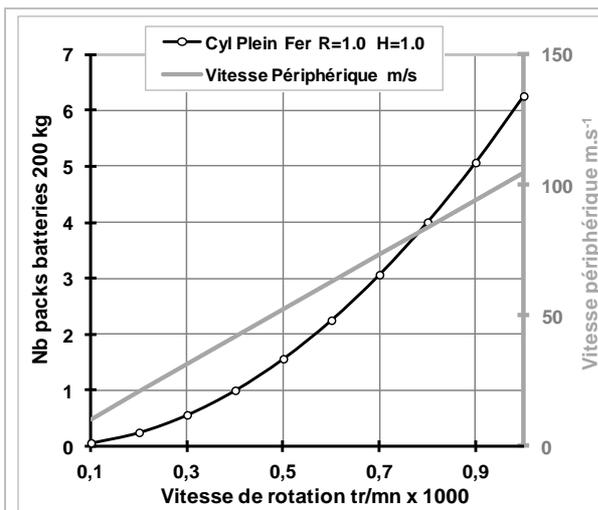


Fig. 5 – Nombre de packs de batteries (ordonnée de gauche) pouvant être rechargées par un **volant d'inertie** de rayon  $R$  et de hauteur  $H=1$  m, en fonction de la vitesse de rotation en tr/mn. Les vitesses périphériques sont reportées sur l'ordonnée de droite.

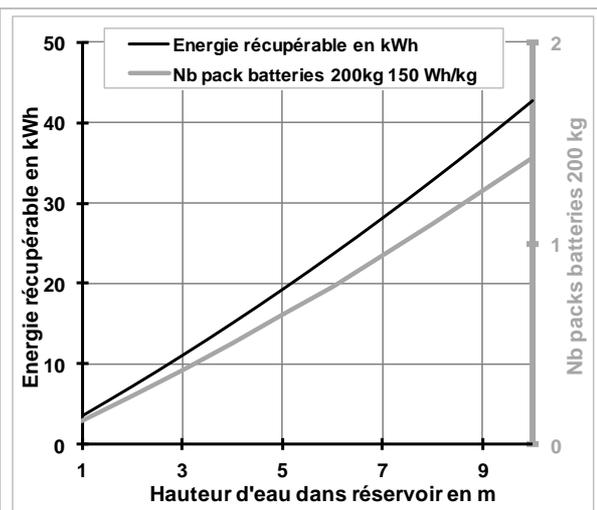


Fig. 6 – Energie récupérable (ordonnée de gauche) et équivalence en nombre de packs de batteries de 200 kg (ordonnée de droite) en fonction de la hauteur d'eau d'un **réservoir** de 10 m de diamètre situé à 20 m au dessus du sol.

Les résultats sont établis sur la base d'un réservoir cylindrique de rayon égal à 5 m. La base du réservoir est située à 20 m du sol, les pertes de charge dans le circuit fluide qui relie le réservoir à la turbine Francis sont négligées et le rendement de la turbine est fixée à 0,80 (valeur généralement comprise entre 0,80 et 0,95). Pour ces conditions, les énergies disponibles à la recharge et leurs équivalences en packs de batteries de 200 kg calculées en fonction de la hauteur d'eau du réservoir sont reportées figure 6. Les résultats montrent qu'une colonne d'eau dont le diamètre et la hauteur sont égaux à 10 m ne permet pas de recharger plus de 200 kg de batteries (ensemble standard pour un avion école électrique). Cette **solution n'est pas réaliste**.

### 3.4 Recharge par roue à aubes

La proximité d'un cours d'eau peut être utilisée pour recharger des batteries et contribuer à développer l'autonomie d'un aéroclub ou d'un aérodrome. Un modèle analytique est développé pour estimer le nombre d'heures nécessaires pour recharger au moins un pack de batteries de 200 kg. Les batteries sont reliées à un générateur de charge constitué d'une roue à aubes qui fonctionne sur son régime d'équilibre (vitesse de rotation constante). Les dimensions de la roue sont choisies pour rester cohérentes avec le budget d'un aéroclub et pour que la roue puisse être facilement démontable et transportable sur une remorque. Le rayon de la roue est ainsi fixé à 0,800 m et la demi-longueur, l'envergure et l'épaisseur de chacune des aubes sont respectivement égales à 0,300 m, 0,700 m et 0,005 m. Les calculs s'effectuent pour une vitesse<sup>10</sup> de débit du courant égale à 1 m/s en choisissant de négliger<sup>11</sup> les effets négatifs de sillage entre chacune des aubes immergées.

La puissance<sup>12</sup> fournie à la roue augmente rapidement et la vitesse de rotation de la roue croît faiblement tandis que la durée de recharge diminue avec le nombre d'aubes de la roue. Pour un nombre d'aubes égal à soixante, la durée pour recharger 200 kg de batteries est au mieux égale à 34 heures. Cette durée n'est pas compatible avec le besoin de recharge d'un avion effectuant des rotations successives d'une heure de vol mais peut constituer une solution de recharge complémentaire.

## 4 Conclusion

Les équations de la mécanique sont utilisées pour estimer les énergies consommées sur une heure de vol par un avion à moteur thermique disposant de 350 kilogrammes de charge utile dont 150 kg pour les occupants et 200 kg pour l'énergie embarquée. Ces valeurs sont utilisées pour identifier les évolutions à apporter sur le coefficient de traînée, la vitesse et la masse totale de l'avion afin de permettre un vol électrique sans modifier la charge utile. Les calculs sont effectués pour des batteries d'énergie massique limitée à 150 Wh/kg. Les résultats montrent qu'un vol électrique d'une heure devient possible pour des vols d'entraînement effectués à proximité des aérodromes à condition de réduire la traînée aérodynamique de 30%, la vitesse de croisière de 20% et la masse totale de l'avion de 40%.

Différentes solutions sont alors proposées pour la recharge de packs de 200 kg de batteries. Sont successivement analysées les recharges à l'aide de panneaux photovoltaïques, par volant d'inertie, par château d'eau puis par roue à aubes.

La recharge par panneaux photovoltaïques est étudiée en imaginant recouvrir tout ou partie d'un hangar d'avions dont la surface au sol varie de 50 à 500 m<sup>2</sup>. Pour des rendements moyens proches de 0,15, l'énergie issue du soleil permet d'alimenter deux packs de batteries de 200 kg avec 500 m<sup>2</sup>. Cette configuration fournit l'énergie nécessaire à quatre vols d'instruction d'une heure pour un avion électrique disposant du plein d'autonomie et de trois packs de batteries chargées avant le premier vol. Cette configuration, qui nécessite un investissement important au niveau batteries, peut convenir à des aéroclubs disposant de deux ou trois avions (club d'une soixantaine de membres) pour des vols d'instruction à effectuer en fin de semaine. Au niveau de l'aérodrome, l'installation de panneaux photovoltaïques sur une partie des surfaces en herbes, inutilisées ou utilisées, par les avions constitue une alternative intéressante. Pour un aérodrome de 50 hectares, 10 aéroclubs et 100 avions, 5 hectares suffisent pour recharger trois packs de batteries par aéroclub et par heure permettant ainsi d'assurer les

<sup>10</sup> Cette vitesse, égale à 3,6 km/h, est cohérente avec les valeurs des courants des grands fleuves. A titre d'exemple, la vitesse du courant de la Seine varie de 1 à 4 km/h, 4 km/h en période de crue.

<sup>11</sup> Chaque aube est parfaitement alimentée par l'écoulement incident.

<sup>12</sup> L'évolution de la puissance en fonction du nombre d'aubes est quasi linéaire.

vols successifs de 3 avions par aéroclub.

La solution par volant d'inertie permet au mieux de recharger six packs de batteries. La solution basée sur le château d'eau permet de recharger au plus un pack de 200 kg de batteries et peut difficilement s'envisager sur un aérodrome compte-tenu des risques de collision. Ces deux solutions nécessitant de recourir à des ressources extérieures d'énergie en période creuse ne peuvent pas être considérées comme des solutions capables de rendre un aérodrome autonome. La solution par roue à aubes, facilement démontable et transportable, liée à l'accès d'un cours d'eau, ne répond enfin pas au besoin.

Les résultats issus des solutions par panneaux photovoltaïques montrent clairement l'intérêt de s'intéresser au vol électrique et à la possibilité de s'affranchir du recours aux produits pétroliers pour la formation élémentaire des pilotes lors des vols de courte durée. Le développement du véhicule électrique initié par Renault/NISSAN associé aux recherches destinées à accroître l'efficacité des cellules photovoltaïques et l'énergie massique des batteries suggèrent de plus des perspectives intéressantes en terme d'autonomie qui rendent aujourd'hui crédibles les vols électriques de plusieurs heures.

## Références

- [1] <http://machinedesign.com/news/solar-powered-uav-flies-two-days-straight>
- [2] <http://www.electravia.fr/electra.php> (avion Electra).
- [3] <http://www.electravia.fr/alatus.php> (moto-planeur Alatus).
- [4] <http://www.electravia.fr/mc15e.php> (bimoteur Cri-Cri électrique).
- [5] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-E-FAN-d-EADS-un-projet-soutenu.html>.
- [6] [http://www.highflyer.airbus-group.com/04\\_2013\\_efan\\_and\\_ethrust.html](http://www.highflyer.airbus-group.com/04_2013_efan_and_ethrust.html)
- [7] <http://www.industrie-techno.com/decollage-prometteur-pour-l-avion-electrique-e-fan-d-airbus.29587>
- [8] <http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/future-of-e-aircraft.html>
- [9] [http://www.info-pilote.fr/WATTsUP-l-electrique-de-Pipistrel\\_a786.html](http://www.info-pilote.fr/WATTsUP-l-electrique-de-Pipistrel_a786.html)
- [10] <http://www.solarimpulse.com>
- [11] Le Gourières ; Les éoliennes, théorie, conception et calcul pratique, Éditions du Moulin Cadiou, diffusion EYROLLES-GEODIF/SODIS, ISBN 9-782953004106.
- [12] <http://phys.org/news/2014-11-solaroad-world-solar-path-netherlands.html>
- [13] <http://www.treehugger.com/solar-technology/solaroad-opens-first-solar-bike-path.html>
- [14] <http://www.solarroadways.com/intro.shtml>
- [15] Tarascon JM ; L'énergie : stockage électrochimique et développement durable, leçons inaugurales du Collège de France, Chimie des solides et de l'énergie, Fayard, ISBN 978.2213662459.

---

**Patrick Gilliéron** est ingénieur en aérodynamique, docteur en mécanique et habilité à diriger des recherches (HDR). Il travaille depuis plus de 35 ans sur l'analyse, la compréhension et le contrôle des écoulements et des décollements et assure plusieurs enseignements dans différents établissements. Il est successivement chargé d'enseignement puis professeur associé au Conservatoire National des Arts et Métiers de 1987 à 2001, directeur de recherche associé au CNRS de 2001 à 2004 puis enseignant chercheur associé à l'École Polytechnique d'Orléans de 2006 à 2010. Chercheur à la direction de la Recherche de Renault, il crée en 2002 et développe jusqu'en 2011 un groupe de recherche en mécanique des fluides et aérodynamique. Il collabore depuis de nombreuses années avec des équipes universitaires à Bordeaux, Orléans et Valenciennes. Il poursuit aujourd'hui ses activités en qualité de chercheur indépendant et pratique l'aviation de loisirs depuis plus de 40 ans.