LES TYPES DE BATTERIES – ADAPTATION AUX AVIONS LÉGERS

DÉFINITION ET RÔLE D'UNE BATTERIE

Une batterie est un dispositif électrochimique permettant de stocker de l'énergie sous forme chimique pour la restituer sous forme électrique. Elle se compose d'une ou plusieurs cellules, chacune constituée d'une anode, d'une cathode et d'un électrolyte. Les batteries sont essentielles dans de nombreux domaines, de l'électronique portable à l'aéronautique, en passant par le stockage d'énergie renouvelable.

Principaux Critères de Choix

- Énergie massique (Wh/kg) : quantité d'énergie stockée par unité de masse.
- Puissance massique (W/kg) : capacité à délivrer une forte puissance instantanée.
- Durée de vie (cycles) : nombre de cycles charge/décharge avant perte significative de capacité.
- Coût (€/kWh) : coût par unité d'énergie stockée.
  Sécurité : résistance aux chocs, à la surchauffe, risque d'incendie ou d'explosion.
- Recyclabilité : facilité de recyclage des matériaux, impact environnemental.

ÉVOLUTION HISTORIQUE ET ENJEUX ACTUELS

Les batteries ont évolué des piles Volta (1800) aux batteries lithium-ion (1991), puis aux technologies émergentes comme le lithium-soufre ou le sodium-ion. Les enjeux actuels incluent l'augmentation de l'énergie massique, la réduction des coûts, l'amélioration de la sécurité et le développement de filières de recyclage efficaces.

CLASSIFICATION GÉNÉRALE DES BATTERIES

Batteries Primaires (non rechargeables)

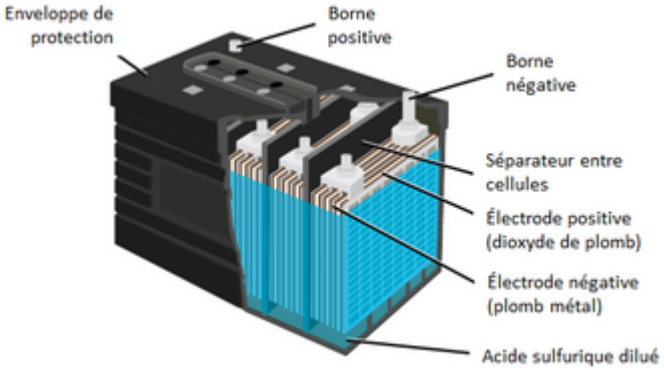
- **Piles Alcalines**
  - Composition : anode en zinc, cathode en dioxyde de manganèse, électrolyte alcalin (hydroxyde de potassium).
  - Avantages : faible coût, disponibilité, bonne densité d'énergie pour les applications grand public.
  - Inconvénients : non rechargeables, impact environnemental si non recyclées.
  - Applications : appareils électroniques portables, télécommandes, jouets.

- **Piles Lithium (Li-SOCl2, Li-MnO2)**
  - Composition : anode en lithium métallique, cathode en dioxyde de soufre ou dioxyde de manganèse.
  - Avantages : très haute énergie massique (jusqu'à 500 Wh/kg), longue durée de vie en stockage.
  - Inconvénients : coût élevé, non rechargeables, risques de sécurité en cas de court-circuit.
  - Applications : dispositifs médicaux, militaires, capteurs sans fil.

- **Piles Zinc-Air**
  - Principe : utilisation de l'oxygène de l'air comme oxydant.
  - Avantages : haute énergie massique, faible coût.
  - Inconvénients : non rechargeables (sauf versions expérimentales), sensibilité à l'humidité.
  - Applications : appareils auditifs, systèmes de secours.

Batteries Secondaires (rechargeables)

- **Plomb-Acide**



  - Technologie : anode en plomb, cathode en dioxyde de plomb, électrolyte acide sulfurique.
  - Avantages : faible coût, recyclabilité élevée, robustesse.
  - Inconvénients : faible énergie massique (30-50 Wh/kg), durée de vie limitée (200-500 cycles), entretien nécessaire.
  - Applications : démarrage de véhicules, stockage stationnaire, systèmes de secours.



- **Nickel-Cadmium (NiCd)**
  - Technologie : anode en cadmium, cathode en hydroxyde de nickel.
  - Avantages : robustesse, bonne puissance massique, fonctionnement à basse température.
  - Inconvénients : effet mémoire, toxicité du cadmium, réglementation environnementale stricte.
  - Applications : outils électriques, aéronautique (anciennes générations).

- **Nickel-Métal Hydrure (NiMH)**



- Technologie : anode en alliage absorbant l’hydrogène, cathode en hydroxyde de nickel.
- Avantages : meilleure énergie massique que le NiCd (60-120 Wh/kg), moins toxique.
- Inconvénients : autodécharge élevée, sensibilité à la surcharge.
- Applications : véhicules hybrides (Toyota Prius), appareils électroniques.

- **Lithium-Ion (Li-ion)**



- Chimies :
  - LCO (Lithium-Cobalt Oxyde) : haute énergie, mais sécurité limitée.
  - LFP (Lithium Fer Phosphate) : sécurité élevée, durée de vie longue.
  - NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) : compromis énergie/sécurité.
  - NCA (Nickel-Cobalt-Aluminium) : haute énergie, utilisée par Tesla.
- Avantages : haute énergie massique (150-250 Wh/kg), faible autodécharge.
- Inconvénients : coût, gestion thermique nécessaire, risques d’emballement thermique.
- Applications : téléphones, ordinateurs, véhicules électriques, aéronautique.



- **Lithium-Polymère (LiPo)**
  - Technologie : électrolyte polymère solide ou gélifié.

- Avantages : légèreté, forme flexible, haute puissance massique.
- Inconvénients : risque d’incendie, durée de vie limitée (300-1000 cycles).
- Applications : drones, modélisme, appareils portables.



- **Lithium Fer Phosphate (LiFePO4)**
  - Technologie : cathode en phosphate de fer et lithium.
  - Avantages : sécurité élevée, durée de vie longue (2000-5000 cycles), stabilité thermique.
  - Inconvénients : énergie massique inférieure aux autres Li-ion (90-160 Wh/kg).
  - Applications : véhicules électriques, stockage stationnaire, aéronautique légère.



- **Lithium-Soufre (Li-S)**
  - Technologie : anode en lithium, cathode en soufre.
  - Avantages : énergie massique théorique très élevée (350-600 Wh/kg).
  - Inconvénients : durée de vie limitée, problèmes de dissolution du soufre.
  - Applications : recherche, prototypes.



- **Sodium-Ion (Na-ion)**
  - Technologie : similaire au Li-ion, mais avec du sodium.
  - Avantages : abondance du sodium, coût réduit.
  - Inconvénients : énergie massique inférieure au Li-ion.
  - Applications : stockage stationnaire, véhicules électriques (en développement).



- **Batteries à Flux Redox**
  - Principe : stockage de l’énergie dans des électrolytes liquides.
  - Avantages : durée de vie longue, scalabilité.
  - Inconvénients : faible énergie massique, complexité.
  - Applications : stockage stationnaire à grande échelle.



- **Batteries à État Solide**
  - Technologie : électrolyte solide (céramique, polymère).

- Avantages : sécurité accrue, énergie massique potentielle élevée.
- Inconvénients : coût, défis de fabrication.
- Applications : véhicules électriques (Toyota, QuantumScape).

Batteries à Haute Température

- **Nickel-Sodium (ZEBRA)**
  - Technologie : anode en sodium, cathode en chlorure de nickel, électrolyte céramique.
  - Avantages : durée de vie longue, sécurité.
  - Inconvénients : fonctionnement à haute température (270-350°C).
  - Applications : stockage stationnaire, véhicules industriels.

- **Sodium-Soufre (NaS)**
  - Technologie : anode en sodium liquide, cathode en soufre.
  - Avantages : haute énergie, durée de vie longue.
  - Inconvénients : température de fonctionnement élevée (300-350°C).
  - Applications : stockage d'énergie à grande échelle.

Batteries Métal-Air

- **Zinc-Air Rechargeable**
  - Principe : utilisation de l'oxygène de l'air, anode en zinc.
  - Avantages : haute énergie massique, faible coût.
  - Inconvénients : durée de vie limitée, problèmes de recharge.
  - Applications : prototypes, recherche.

- **Aluminium-Air**
  - Principe : anode en aluminium, cathode à air.
  - Avantages : énergie massique théorique très élevée.
  - Inconvénients : corrosion, non rechargeable.
  - Applications : applications militaires, prototypes.

Batteries Expérimentales et Futures

- **Lithium-Air**
  - Potentiel : énergie massique théorique proche de celle de l'essence.
  - Défis : stabilité, efficacité, durée de vie.

- **Magnésium-Ion**
  - Avantages : abondance du magnésium, sécurité.
  - Défis : développement des électrolytes et cathodes.

- **Graphène et Nanotechnologies**
  - Améliorations : conductivité, durée de vie, énergie massique.

COMPARATIF TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE

Type de batterie	Énergie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Durée de vie (cycles)	Coût (€/kWh)	Sécurité	Recyclabilité
Plomb-acide	30-50	180-300	200-500	50-150	Moyenne	Très bonne
NiCd	40-60	150-300	500-1000	300-800	Bonne	Moyenne
NiMH	60-120	250-1000	500-1500	200-600	Bonne	Bonne
Li-ion (NMC)	150-250	250-3400	500-2000	150-300	Moyenne	Bonne
LiFePO4	90-160	200-3000	2000-5000	200-400	Excellente	Bonne
LiPo	100-265	200-3000	300-1000	200-500	Moyenne	Moyenne
Li-S	350-600 (théorique)	-	<500	-	Faible	Difficile
Na-ion	100-160	100-500	1000-5000	100-200	Bonne	Bonne

Critères de Sélection selon l'Application

- Automobile électrique : énergie massique, puissance, recharge rapide.
- Stockage stationnaire : durée de vie, coût, recyclabilité.
- Aéronautique : énergie massique, sécurité, résistance aux vibrations et températures extrêmes.
- Électronique portable : compacité, légèreté, sécurité.

ADAPTATION DES BATTERIES À L'ALIMENTATION DES ÉQUIPEMENTS DANS LES AVIONS LÉGERS

- **Exigences Spécifiques à l'Alimentation Électrique en Aéronautique Légère**
  - Réglementation et Normes Applicables
    - Normes générales :
      - EASA CS-23 (Europe) et FAA Part 23 (États-Unis) : exigences pour les systèmes électriques des avions légers.
      - ASTM F2506 : standard pour les systèmes électriques des petits avions.
      - RTCA DO-160 : normes environnementales pour les équipements aéronautiques (vibrations, température, humidité).

    • Exigences spécifiques

      - Sécurité électrique : protection contre les courts-circuits, les surintensités, les inversions de polarité.
      - Redondance : alimentation de secours pour les équipements critiques (radio, instruments de vol).
      - Compatibilité électromagnétique (CEM) : éviter les perturbations entre équipements.

  - Contraintes Techniques
    - Poids et encombrement :
      - Les batteries doivent être légères et compactes pour ne pas pénaliser la charge utile.
      - Exemple : une batterie de 12V/10Ah en LiFePO4 pèse environ 1,2 kg, contre 3 kg pour une plomb-acide équivalente.
      - Tension et puissance : La plupart des avions légers utilisent du 12V ou 24V pour l'avionique et les équipements. Puissance typique : 50W à 500W selon la complexité de l'avionique.
      - Résistance aux vibrations et chocs : Les batteries doivent supporter des vibrations continues (moteur, turbulence) et des chocs (atterrissage dur).
        • Plage de température : Fonctionnement de -20°C à +50°C (voire +70°C en cockpit

non climatisé). Certaines chimies (Li-ion) nécessitent un chauffage ou une isolation en cas de grand froid.
- Altitude : Pas d'impact majeur pour les batteries scellées, mais les batteries à électrolyte liquide (plomb-acide ouvert) peuvent fuir à haute altitude.

- Sécurité et Fiabilité
  - Risque d'incendie : Les batteries Li-ion/LiPo doivent être protégées par un boîtier ignifuge et un BMS (Battery Management System). Les batteries plomb-acide sont moins sensibles mais peuvent dégager de l'hydrogène en cas de surcharge.
  - Protection électrique : Fusibles, disjoncteurs, relais de coupure en cas de surintensité ou de décharge profonde. Diode de protection contre l'inversion de polarité.
  - Redondance : Deux batteries en parallèle (une principale, une de secours) pour les équipements critiques. Possibilité d'utiliser une batterie de démarrage du moteur thermique comme source de secours.

- Autonomie et Recharge
  - Autonomie requise : Généralement 1 à 3 heures pour les vols de tourisme, avec une marge de sécurité. Exemple : une radio + GPS + éclairage consomme environ 20W → batterie 12V/20Ah = 2h d'autonomie.
  - Recharge : En vol : via un alternateur ou une dynamo entraînée par le moteur thermique. Au sol : chargeur dédié, compatible avec la chimie de la batterie.

- **Technologies de Batteries Adaptées**
  - Plomb-Acide (Scellées AGM ou Gel)
    - Avantages :
      - Coût faible,
      - Technologie mature,
      - Recyclage facile.
      - Bonne résistance aux chocs et vibrations.
      - Pas de risque d'emballement thermique.
    - Inconvénients :
      - Poids élevé (30-50 Wh/kg).
      - Durée de vie limitée (200-500 cycles).
      - Sensible à la décharge profonde et à la surcharge.
    - Applications typiques :Alimentation de base pour avionique simple (radio, instruments analogiques). Batterie de secours.
    - Exemple :Batterie 12V/18Ah (AGM) pour un avion ultra-léger (ULM) : poids 6 kg, autonomie 3h pour 20W de consommation.
  - Nickel-Cadmium (NiCd)
    - Avantages :
      - Robustesse, bonne résistance aux températures extrêmes.
      - Durée de vie longue (1000 cycles).
    - Inconvénients :
      - Effet mémoire, toxicité du cadmium (réglementation stricte).
      - Coût élevé.
    - Applications typiques :
      - Avions militaires ou anciens modèles civils. Peu utilisé dans les constructions amateurs modernes.
  - Nickel-Métal Hydrure (NiMH)
    - Avantages :
      - Meilleure énergie massique que le NiCd (60-120 Wh/kg).
      - Moins toxique.
    - Inconvénients :
      - Autodécharge élevée, sensibilité à la surcharge.
      - Coût supérieur au plomb-acide.
    - Applications typiques :
      - Remplacement du NiCd dans les avions récents.

        - Peu courant en amateur en raison du coût.
    - Lithium-Ion (LiFePO4, NMC)
        - Avantages :
            - Énergie massique élevée (90-160 Wh/kg pour le LiFePO4, 150-250 Wh/kg pour le NMC).
            - Durée de vie longue (2000-5000 cycles pour le LiFePO4).
            - Pas d'effet mémoire, faible autodécharge.
        - Inconvénients :
            - Coût élevé, nécessité d'un BMS.
            - Sensibilité à la température et aux chocs.
        - Applications typiques :
            - Avionique moderne (GPS, EFIS, radio numérique).
            - Batterie principale pour les avions avec forte consommation électrique.
        - Exemple : Batterie LiFePO4 12V/10Ah : poids 1,2 kg, autonomie 5h pour 20W. Utilisée dans les avions expérimentaux avec avionique avancée (ex. : Dynon SkyView).
    - Lithium-Polymère (LiPo)
        - Avantages :
            - Légèreté, forme adaptable.
            - Haute puissance massique.
        - Inconvénients :
            - Risque d'incendie en cas de mauvaise utilisation.
            - Durée de vie limitée (300-1000 cycles).
        - Applications typiques :
            - Projets expérimentaux, drones.
            - Peu recommandé pour les avions habités en raison des risques.

- **Intégration Mécanique et Électrique**
    - Positionnement et Fixation
        - Emplacement :
            - Sert souvent de masse de réglage du Centre de Gravité
            - Accessible pour la maintenance et le remplacement.
        - Fixation :
            - Supports anti-vibration (caoutchouc, silentblocs).
            - Sangle ou étrier métallique pour les batteries lourdes (plomb-acide).
        - Câblage et Protection
            - Section des câbles : Calculée en fonction de l'intensité maximale (ex. : 16A → câble 2,5 mm^2).
            - Protection :
                - Fusibles ou disjoncteurs près de la batterie.
                - Diode anti-retour pour éviter la décharge de la batterie vers l'alternateur à l'arrêt.
            - Connectique :
                - Connecteurs étanches et verrouillables (ex. : Dean, XT60).
                - Bornes protégées contre les courts-circuits.
            - Système de Gestion (BMS)
                - Fonctions :
                    - Équilibrage des cellules (pour Li-ion/LiPo).
                    - Protection contre la surcharge, la décharge profonde, la surintensité.
                    - Surveillance de la température.
                - Exemple :BMS pour batterie LiFePO4 12V/20Ah avec coupure à 10V et 15V.

- **Recharge et Alternateur**
    - Alternateur :
        - Puissance adaptée à la consommation (ex. : 500W pour une avionique complète).
        - Régulateur de tension pour éviter la surcharge.
    - Chargeur externe :◦ Compatible avec la chimie de la batterie (ex. : chargeur LiFePO4 avec équilibrage).

- **Choix de la Technologie**

Critère	Plomb-Acide	NiCd	NiMH	LiFePO4	Li-ion NMC
Coût	Faible	Élevé	Moyen	Moyen	Élevé
Poids	Élevé	Moyen	Moyen	Faible	Faible
Durée de vie	Moyenne	Longue	Longue	Longue	Moyenne
Sécurité	Bonne	Bonne	Bonne	Excellente	Moyenne
Maintenance	Nécessaire	Faible	Faible	Aucune	Faible

    - Meilleurs compromis
        - Pour un avion simple : Plomb-acide AGM (coût, simplicité).
        - Pour une avionique moderne : LiFePO4 (poids, durée de vie).
        - Pour un projet expérimental : Li-ion NMC (performances, mais gestion complexe).

- **Tests**
    - Résistance aux vibrations
    - Comportement en température (-20°C/+50°C).
    - Test de décharge profonde et de surcharge.

- **Documentation**
    - Fiche technique de la batterie.
    - Schéma électrique validé par un expert.

- **Maintenance et Sécurité**
    - Plomb-acide :
        - Vérifier le niveau d'électrolyte (si non scellé).
        - Nettoyer les bornes (corrosion).
    - Li-ion/LiFePO4 :
        - Vérifier l'état du BMS.
        - Stocker à 40-60% de charge si inutilisé longtemps.
    - Sécurité :
        - Boîtier ignifuge pour les Li-ion.
        - Extincteur adapté à bord.

Perspectives et Innovations

- Batteries à semi-conducteurs : sécurité et énergie massique accrues (en développement).
- Supercondensateurs : pour les pics de puissance (démarrage, secours).
- Intégration solaire : panneaux souples sur les ailes pour recharger la batterie en vol.

En résumé : Pour l'alimentation électrique des équipements dans un avion de tourisme amateur, le LiFePO4 offre le meilleur compromis entre poids, durée de vie et sécurité, tandis que le plomb-acide AGM reste une solution économique et fiable pour les projets simples. La certification et la sécurité (fixation, protection électrique, BMS) sont essentielles, quel que soit le choix technologique.