

Les accus [Troisième partie]

Nous voici à l'avant-dernier volet de cette saga sur les motorisations, les accus. Contrairement aux deux précédents articles, nous allons moins rentrer dans les détails techniques, l'idée sera cette fois de donner des repères d'utilisation et des ordres de grandeur. En effet, le comportement de nos accus est particulièrement fluctuant en fonction de nombreux paramètres, ce qui ne permet pas de développer des outils de modélisation détaillés comme nous l'avons fait pour les hélices et les moteurs.

Quelques généralités sur les accus

En modélisme, plusieurs technologies sont en concurrence, aujourd'hui toutes basées sur la chimie du lithium sous forme ionique. Ce qui les distingue de prime abord est le mode de réalisation : en sandwich plan (nos accus les plus classiques à enveloppe souple, dits lithium-ion-polymère ou LiPo) ou en sandwich enroulé sur lui-même (éléments cylindriques à enveloppe métallique, dits lithium-ion ou LiIon). Dans le détail, les choses se corsent un peu, car ces deux appellations ont recouru à différentes formulations



Différentes technologies d'accu utilisés en modélisme



mais dont la surface va du dépôt en couche simple jusqu'aux motifs nanométriques (batteries nano, graphène, etc.) augmentant

la surface d'échange avec l'électrolyte (et donc le courant admissible par l'accu). Cette composition chimique est rarement détaillée par les fabricants, et pourtant elle détermine à la fois les performances des accus mais aussi leur durée de vie, ainsi que leur dangerosité en cas de surcharge ou d'endommagement mécanique. Par exemple, en étant bien traités (voir paragraphe « améliorer la durée de vie »),



certains accus comme les déjà anciens (mais révolutionnaires à leur sortie) Hyperion G3 CX peuvent endurer plus de 10 ans et des centaines de cycles (1 cycle = 1 charge et une décharge), alors que d'autres accus sont bons pour la poubelle après 2-3 ans et quelques dizaines de cycles. Côté sécurité, les LiFe sont les plus sûrs, les LiCo sont les plus instables (et inflammables) et les LiMn se situent à mi-chemin.

On peut aussi évoquer la facilité d'utilisation : les LiFe supportent une charge à forte intensité et à chaud (directement après le vol) tandis que les LiCo nécessitent d'être parfaitement refroidi avant la charge sous peine de les abîmer de manière irréversible. Les LiFe sont aussi les plus tolérants aux tensions trop basses ou trop élevées, alors que les LiPo classiques supportent très mal d'être trop déchargés (dégradation rapide) et encore moins d'être surchargés (inflammation).

Cette photo a été prise en octobre 2009. Plus de 11 ans après, les 450, 2500 et 3300 mA.h sont toujours parfaitement opérationnels, tandis que les 850 et 1300 mA.h ont été retiré du service suite à un crash, après respectivement 7 et 8 ans de service. Seul le 240 mA.h, dépourvu de prise d'équilibre, a lâché prématurément.

chimiques, suivant le métal avec lequel le lithium est mélangé sous sa forme solide (cathode) : oxyde de cobalt pour beaucoup d'accus Lipo et LiIon (LiCo, ICR, etc.), mais aussi oxyde de manganèse (LiPo type Hyperion G3, LiMn, IMR) ou phosphate de fer (A123, LiFe, IFR). Dans une moindre mesure, on trouve aussi du nickel, ainsi que des mélanges de ces différents oxydes. Plus récemment, on trouve aussi du silicium, ce sont les accus LiHV (HV pour « high voltage »). Il en est de même pour l'anode, toujours à base de carbone,



Quelques unités et calculs simples

La tension d'un accu s'exprime en volts (V), et varie entre deux extrêmes : la tension mini, pour laquelle l'accu ne contient quasiment plus d'énergie, et la tension maxi, pour laquelle l'accu est plein. Avec les accus lithium, ces tensions sont critiques, l'accu pouvant s'altérer de manière irréversible, voire dangereuse, quand la tension dépasse ces bornes (0.05 V au-delà de la tension maxi peut suffire à déclencher un incendie).

La tension nominale d'un accu n'est pas sa tension d'utilisation (voir ci-après) mais une moyenne de sa plage de tension pendant la décharge. Par exemple, pour un accu LiIon classique, cette plage va de 3V à 4.2V, soit une tension nominale de $(3 + 4.2) / 2 = 3.6$ V. Même si la plage de tension d'un accu LiPo est théoriquement identique (car même chimie), sa tension nominale est [commerciallement] fixée à 3.7 V, car la résistance interne plus faible de cette technologie lui confère une tension moyenne en décharge un peu plus élevée. Quant aux LiHV, leur tension maxi est réellement plus élevée (4.4 V), ce qui explique leur tension nominale (3.85 V).

La capacité de l'accu s'exprime en A.h (ampère heure) ou mA.h (milli-ampère heure). Concrètement, un accu de 2.3 A.h que l'on décharge avec un courant de 15 A (ampère) aura une autonomie d'environ $2.3/15 = 0.15$ h = 9 min. Le courant de décharge peut être aussi être expérimenté en C, qui est un facteur appliqué à la capacité. Par exemple, un 2200 mA.h badgé 5C/25C est supporte normalement $25 * 2.2 = 55$ A en décharge et $5 * 2.2 = 11$ A en charge. Les fabricants distinguent parfois les courants de décharge en pointe (quelques secondes) et en continu, c'est évidemment la seconde valeur qui importe. Cette unité reflète directement le temps de vol : par exemple, une autonomie moteur de 6 min indique qu'on utilise l'accu à 60 min / 6 min = 10C. L'énergie contenu dans l'accu

s'exprime en Watt heures (Wh), et est le produit de sa capacité par sa tension nominale. Par exemple, un LiFe 2300 mA.h de 3.3 V de tension nominale contient, à pleine charge, une énergie de $2.3 * 3.3 = 7.6$ Wh. Pour finir, le nombre d'éléments : il est noté S pour des éléments en série (les tension s'additionnent) et P pour les éléments en parallèle (les capacités s'additionnent). Par exemple, un LiHV 4S2P 1600 mA.h a une capacité totale de $1.6 * 2 = 3.2$ A.h et une tension nominale de $3.85 * 4 = 15.4$ V.

Evaluation des performances des accus

Le premier critère de sélection d'un accu est son ratio énergie sur masse (E/m). En voici trois exemples assez représentatifs (le câblage est inclus dans la masse) :

- LiFe A123 2300 mA.h 4S : m = 280 g, E = 30.4 Wh, donc E/m = 108 Wh/kg

- LiPo Zippy Compact 2200 mA.h 3S : m = 163 g, E = 24.4 Wh, donc E/m = 150 Wh/kg

- LiIon Samsung INR18650-30Q 3000 mA.h 3S : m = 160 g, E = 32.4 Wh, donc E/m = 203 Wh/kg

Vu sous cet angle, le choix semble très vite fait, une batterie basée sur les cellules Samsung 30Q (ou d'autres cellules équivalentes) est de loin la plus intéressante, en plus d'être sécurisante grâce à l'enveloppe métallique de chaque élément... mais ce n'est pas si simple ! En effet, ce sont généralement les accus qui présentent les plus fortes énergies massiques qui sont aussi ceux dont la résistance interne est la plus importante et donc ceux dont les courants de charge et de décharge admissibles sont les plus faibles. Cela n'est pas forcément rédhibitoire, mais c'est à considérer au cas par cas suivant le besoin.

Pour les exemples précédents, nous avons les valeurs constructeur suivantes de courants de décharge :

- LiFe A123 : 30C en continu, 52C en pointe

- LiPo Zippy : 25C en continu, 35C en pointe

- LiIon Samsung : 5C en continu, 8C en pointe

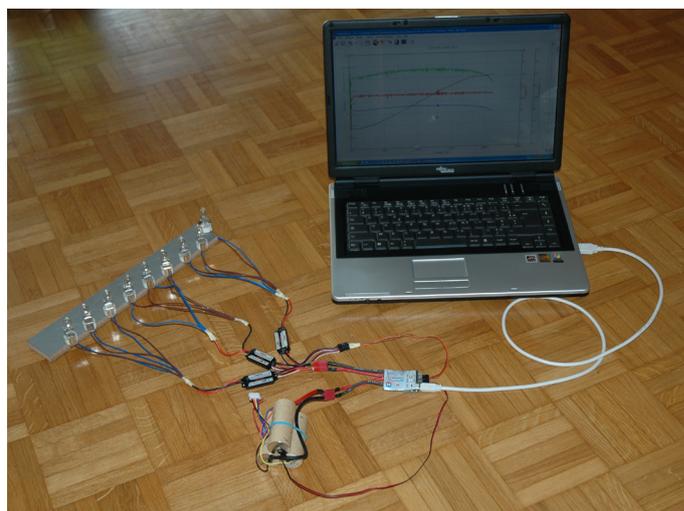
Hormis certaines utilisations très spécifiques, comme le F5B, les durées de vol de loisir tournent plutôt autour de 10 à 15 min, soit 6C à 4C. Ce qui rend l'utilisation des accus LiIon tout à fait intéressante pour ces applications « dominicales », d'autant plus que leur coût est raisonnable. Par contre, pour des applications plus gourmandes (jet edf, hélico, racer, etc.), que ce soit en pointe ou en continu, des accus capables supportant des intensités plus élevées sont indispensables.

Pour aller plus loin dans la connaissance de nos accu, un banc d'essai est indispensable. Cela consiste en un système de décharge, type variateur avec charge résistive (ampoules ou résistances de puissance), doté d'un enregistrement en continu de la tension aux bornes de l'accu. L'intensité est asservie pour suivre une consigne : généralement il s'agit d'une intensité constante, avec autant d'essais que d'intensités à tester, mais cela peut être aussi un profil d'utilisation à diverses intensités pour couvrir en un seul essai toute la plage de fonctionnement de l'accu.

Analyseur de batterie SkyRC BD200 (30A – 200W)



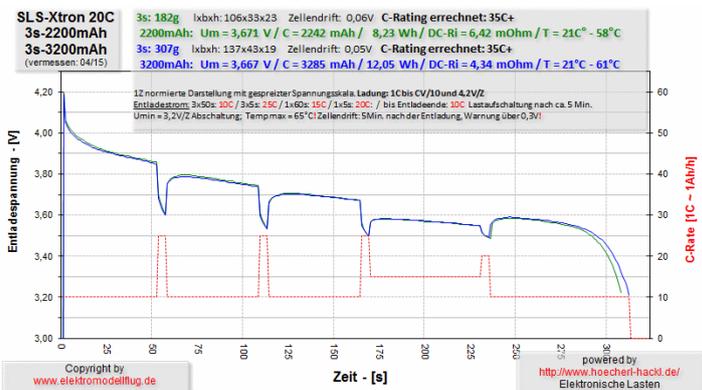
Banc de décharge perso à ampoules et data logger MilesHighWings (60A – 1000 W)



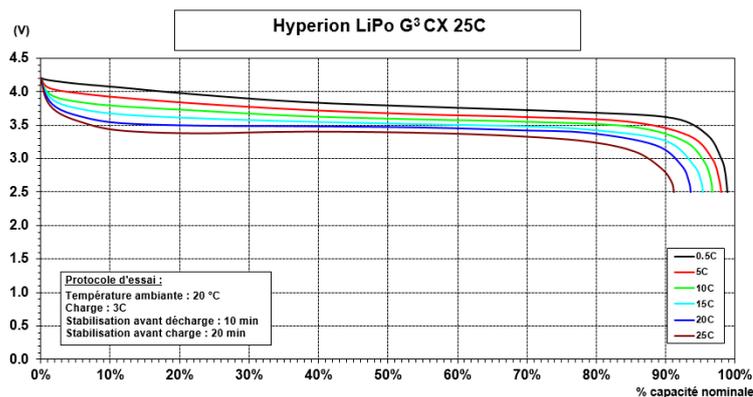
Les courbes de décharge

Voici quelques exemples de courbes de décharge. L'abscisse peut être le temps écoulé (essais orientés sur l'autonomie pratique) ou la capacité déchargée (plus orienté analyse perfo de la batterie).

Essai LiPo à profil d'intensités (crédit Gerd Giese, voir son site pour les détails du protocole) :



Essai LiPo à intensités constantes (travaux de l'auteur) :



Interprétation des courbes de décharge

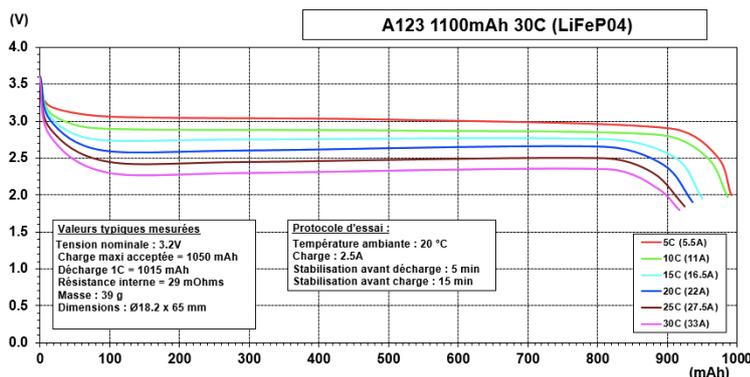
Ces courbes mettent en évidence trois comportements bien identifiables :

- pour une intensité donnée, la tension chute au fur et à mesure que l'accu se vide, avec un plateau plus ou moins marqué en milieu de décharge.
- plus l'intensité est importante et plus la tension et la capacité restituée sont basses, et inversement, à cause de la résistance interne de l'accu ($U = U_{ref} - R.I$).
- plus la température de l'accu est basse et plus la tension et la capacité restituée sont basses, car moins sa chimie est réactive (ce qui augmente sa résistance interne), et inversement.

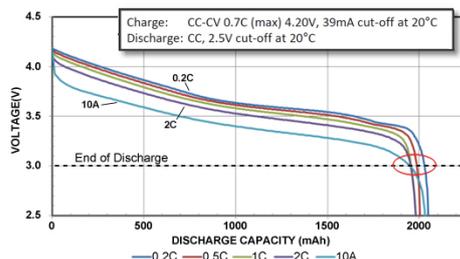
La sensibilité de la chimie de l'accu à la température a aussi une influence significative sur son vieillissement car, même au repos, l'accu n'est jamais inerte sauf à très basse température (voir encarté « comment bien traiter nos accus »).

Les effets conjoints de l'intensité de décharge et de la température sur les performances de l'accu dépendent tant de l'accu lui-même (en particulier son type de chimie, sa capacité, sa résistance interne et son état de vieillissement) que de son environnement (température ambiante et refroidissement dans l'avion). Sachant que, suivant l'intensité, la conformation du pack et son mode de refroidissement, les températures des différents éléments peuvent sensiblement différer, avec par ex. les éléments centraux (mal refroidis) bien plus chauds que les éléments

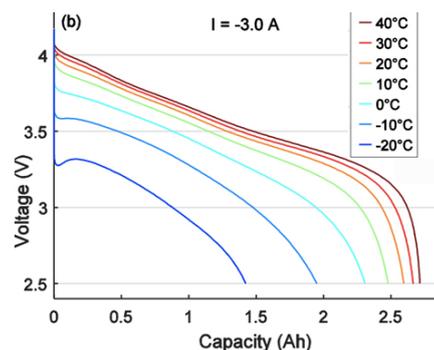
Essai LiFe à intensités constantes (travaux de l'auteur) :



Essai Lilon (Panasonic 18650 2000 mA.h) à intensités constantes (crédit Battery University) :



Essais Lilon (Panasonic 18650 2800 mA.h) à intensité constante et température variable (crédit Battery University) :



périphériques (potentiellement bien mieux refroidis).

Tous ces paramètres jouent sur la résistance interne moyenne de l'accu, et donc in fine sur la tension à ses bornes. Pour ne rien simplifier, la tension de la batterie est interdépendante du couple moteur – hélice ; l'intensité qui traverse l'ensemble résulte donc d'un équilibre entre ces trois composantes, équilibre lui-même évoluant fortement en fonction du chargement de l'hélice (dépendant de la consigne du manche de gaz et de la vitesse de vol) et du niveau de décharge de l'accu. Au final, la tension aux bornes d'un accu est tellement variable, et cela en fonction de tellement de paramètres sur lesquels on n'a pas forcément la main, qu'il est illusoire de vouloir la définir finement quand on dimensionne une chaîne de motorisation. Les

choses sont évidemment différentes pour un vol de record ou en compétition, ou bien en automobile grandeur où par exemple l'accu est régulé thermiquement ; mais, pour le vol de loisir, autant aller au plus simple et raisonner avec une valeur de tension représentative au mieux de la moyenne des vols, située entre deux extrêmes :

- un accu neuf, pleinement chargé et utilisé en condition chaude et à faible intensité => tension élevée
- un accu en fin de vie, en fin de décharge et utilisé en condition froide et à forte intensité => tension faible

Pour nos applications courantes, en choisissant la capacité des accus pour qu'ils fonctionnent à une intensité raisonnable (autour de 5 à 15C, soit 3 à 10 min d'autonomie plein gaz à 75% de capacité dé-

chargée), on peut retenir les valeurs moyennes suivantes :

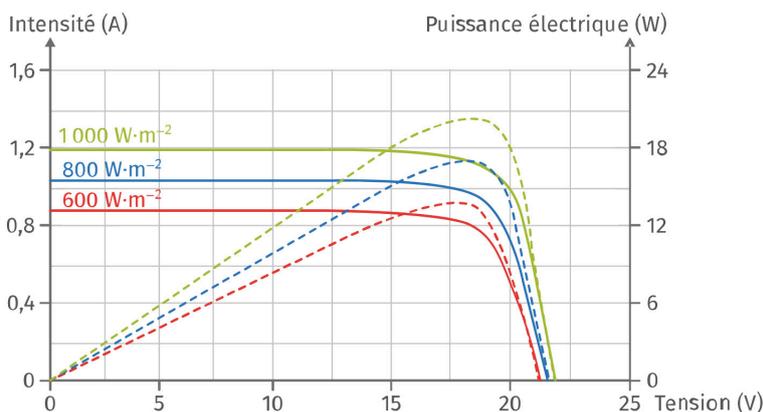
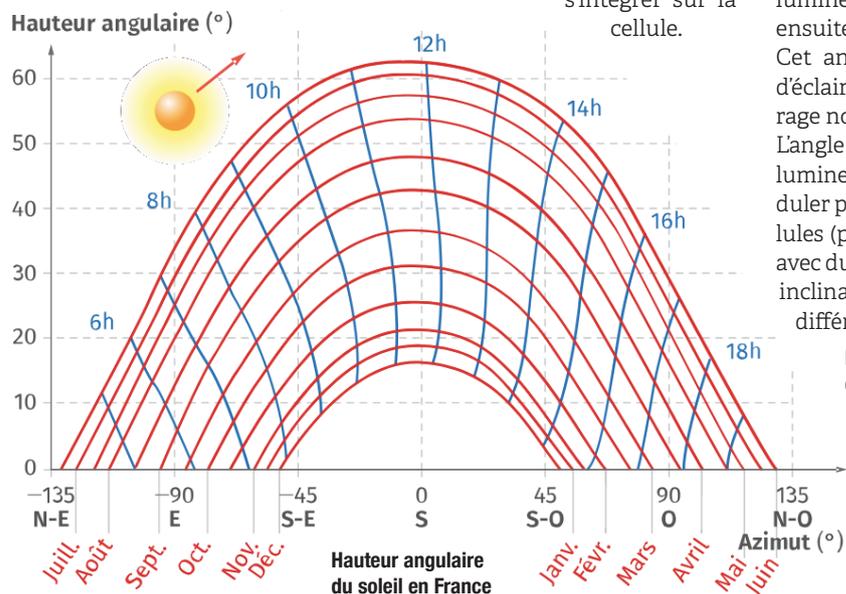
- accu LiPo et Li-Ion : 3.5 V par élément
 - accu LiFe : 2.8 V par élément
- Ces valeurs peuvent sembler un peu simplistes, comparé à la plupart des calculateurs classiquent qui utilisent un modèle mathématique d'accu (basiquement : $U = U_{ref} - R.I$). Mais, comme on vient de le voir, cette approche est facilement prise en défaut car la valeur de R fluctue énormément suivant le cas de figure. Donc, quitte à ne pas pouvoir représenter correctement la réalité, autant choisir la solution la plus simple pour les simulations et garder en tête qu'il pourra y avoir un écart avec la réalité suivant les conditions d'utilisation du moment. De plus, ces valeurs ont l'avantage de grandement faciliter la comparaison entre calculs et essais au banc d'une chaîne de motorisation. En corollaire, un essai moteur correct – en particulier dans le cadre d'une publication – se mène donc avec une alimentation régulée en tension et non

avec un accu, car c'est le seul moyen d'avoir des résultats reproductibles et donc comparables entre eux.

Un mot sur les cellules solaires

En complément de ce volet sur les accus, je vous propose un rapide tour d'horizon sur les cellules solaires, qui sont aujourd'hui suffisamment abouties pour être démocratisables dans notre loisir, que ce soit en complément d'accu ou en source d'énergie principale. A lire par exemple un excellent [article de Laurent Berlivet](#) publié sur son site JivaroModels, basé sur la [conception originale](#) de Serger Ancaoua.

Une fois définies les caractéristiques du modèles (ce que nous ferons dans le dernier article), et donc la puissance motrice nécessaire au vol, la première chose à faire est de récupérer la fiche technique des cellules qui peuvent potentiellement s'intégrer sur la cellule.



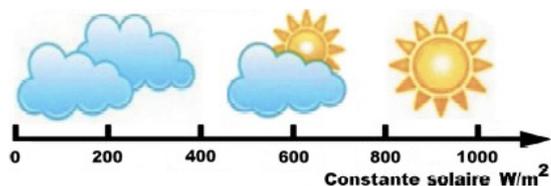
En voici un exemple classique, ici pour un panneau solaire composé de plusieurs cellules (ci-dessus) :

On peut noter que la plage de meilleure utilisation est assez étroite, en dehors d'un certain couple tension – intensité, la puissance disponible, qui dépend de la luminosité, diminue rapidement.

Reste à définir la luminosité utilisable, ce qui n'est pas si compliqué. Pour cela, on se base sur les abaques d'ensoleillement, qui donnent la hauteur angulaire du soleil (en fait l'angle entre l'horizontale au sol et l'axe suivi pas les rayons lumineux), que l'on applique ensuite à la constante solaire. Cet angle va donc de 0° (pas d'éclairage au sol) à 90° (éclairage normal au sol).

L'angle incident réel des rayons lumineux sur l'avion sera à moduler par l'implantation des cellules (par exemple sur des ailes avec du dièdre) ainsi que de leur inclinaison potentielle dans les différentes phases du vol.

Rayonnement solaire en fonction de la nébulosité



L'exploitation de ces deux courbes nécessite le petit calcul de trigonométrie suivant :

rayonnement capté par la cellule = sinus (hauteur angulaire) * rayonnement solaire

Exemples partiques de puissance solaire disponible par unité de surface :

- Vol en avril à 10 h du matin (heure solaire) par temps légèrement nuageux :
rayonnement capté = $\sin(43^\circ) * 600 = 409 \text{ W/m}^2$
- Vol en juin à midi (heure solaire) par temps clair :
rayonnement capté = $\sin(62^\circ) * 1000 = 883 \text{ W/m}^2$

Soit un facteur 2 entre ces deux conditions d'ensoleillement pourtant a priori pas si différentes. Si on applique ces valeurs au diagramme de fonctionnement du panneau, on dispose donc respectivement d'environ 10 W et 20 W électrique maxi pour alimenter le moteur. Suivant la tension d'alimentation nécessaire au moteur, les cellules pourront être reliées en parallèles (les intensités s'ajoutent) ou en série (les tensions s'ajoutent).

Encarté

« comment bien traiter nos accus »

On l'a vu précédemment, la chimie d'un accu au lithium devient de plus en plus réactive avec la température. Si c'est l'idéal pour ses performances, cela devient par contre néfaste pour sa durée de vie, car il se

dégrade aussi plus vite.

C'est ce qu'on appelle le vieillissement, dont voici les principaux facteurs (voir bibliographie) :

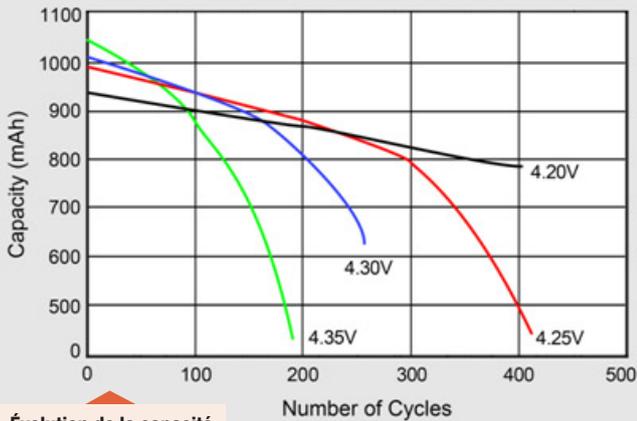
- la tension de fin de charge
- la profondeur de décharge
- l'intensité de décharge
- la température de stockage
- la tension de stockage

Les trois premiers sont clairement liés à la performance

attendue de l'accu à chaque cycle d'utilisation : moins on le sollicite et mieux il se porte, mais plus l'autonomie est faible (ou plus l'accu pèse lourd pour une autonomie donnée). Inversement, plus on demande à l'accu de fournir le maximum de sa capacité et moins il durera longtemps. Chacun composera ici en fonction de ses be-

soins et du budget à consacrer. Les deux autres facteurs sont liés à toute la durée que l'accu passe hors utilisation, appelé « stockage », autrement dit la quasi-totalité du temps. En effet, même pour un cas extrême d'utilisation, mettons 1 h chaque jour tout au long de l'année, le stockage représente encore 96% de la vie de l'accu.

Voici quelques extraits du site Battery University qui donnent les grands ordres d'idées :



Évolution de la capacité en fonction du nombre de cycles et de la tension de fin de charge

Potentiel de cycles d'utilisation en fonction de la profondeur de décharge

Évolution de la capacité en fonction de la température et de la charge de stockage

| Depth of discharge | Discharge cycles | |
|--------------------|------------------|---------|
| | LiPo | LiFe |
| 100% DoD | ~300 | ~600 |
| 80% DoD | ~400 | ~900 |
| 60% DoD | ~600 | ~1,500 |
| 40% DoD | ~1,000 | ~3,000 |
| 20% DoD | ~2,000 | ~9,000 |
| 10% DoD | ~6,000 | ~15,000 |

| Temperature | 40% charge | 100% charge |
|-------------|--------------------|----------------------|
| 0°C | 98% (after 1 year) | 94% (after 1 year) |
| 25°C | 96% (after 1 year) | 80% (after 1 year) |
| 40°C | 85% (after 1 year) | 65% (after 1 year) |
| 60°C | 75% (after 1 year) | 60% (after 3 months) |

Il découle de tous ces éléments que l'un des meilleurs scénarios d'utilisation de nos accus, pour leur assurer une durée de vie optimale sans s'infliger des contraintes logistiques trop importantes, consiste à :

- les charger au dernier moment, ce qui est peu contraignant avec un chargeur puissant et une charge à 2-3 C ;
- utiliser une tension de fin de charge légèrement inférieure à la tension maxi admissible, par ex. 4.1 V pour des LiPo au lieu de 4.2 V ;

- arrêter le vol quand il reste environ 40% de capacité ;
- puis ensuite les remettre au froid (ou du moins au frais) de retour à la maison.

Tous les accus étant remis à une tension identique, il devient possible de charger plusieurs accus simultanément en les connectant en parallèles sur la prise de puissance et la prise d'équilibrage (sur une plaquette de répartition par ex.), ce qui simplifie grandement la gestion de la charge au dernier moment. Bien évidemment, on ne pourra

charger de cette manière que des accus de même nombre d'éléments, mais par contre on peut mettre en parallèle des accus de capacités très différentes. En cas de décharge plus profonde si on souhaite voler un peu plus longtemps, il est impératif de rapidement (dès qu'il a refroidi) recharger à l'accu à sa tension de stockage (autour de 3.8 à 3.85V). De même, un accu complètement chargé sera au plus tôt ramené à sa tension de stockage, le laisser en l'état pour attendre le prochain WE de vol étant le plus sûr moyen d'écourter sa durée de vie.

Depuis l'avènement des accus « nano », un rodage lors des premières utilisations (une dizaine de cycles à intensités de charge et décharge raisonnables) améliore tant les performances que la durée de vie. D'expérience aussi, tous les accus badgés « charge 5C » supportent des charges à 2-3C sans perte de performance au fil des années. A noter aussi que ces accus supportent mal d'être chargés trop lentement, 0.5 C étant un minimum en dessous duquel ils peuvent s'altérer.

La qualité du chargeur est aussi un élément important de la durée de vie des accus. Certains ne jurent que par la charge en parallèle, via le cordon d'équilibrage, mais ce n'est pas forcément adapté aux accus de grosse capacité et à charge rapide. En effet, les connecteurs d'équilibrage sont généralement conçus pour des courants faibles, autour de 1 à 2 A, ce qui est très insuffisant pour des accus de plus de 2000 mA.h. La mesure des tensions est faussée, d'autant plus que le courant est élevé, par la résistance du connecteur et du câble

d'équilibrage. La durée de fin de charge en est donc augmentée, en particulier si certaines cosses du connecteur d'équilibrage sont altérées (fréquent au fil des utilisations, les contacts de qualité, type dorés, sont très rares à ce niveau). Plus embêtant, ce système masque un éventuel déséquilibre de tensions dans l'accu, alors que 0.01 V de disparité en fin de charge est déjà le signe d'un ou plusieurs éléments fatigués et potentiellement dangereux, même si l'accu semble en parfait état extérieur. A contrario, un chargeur dissociant les circuits de puissance (charge / décharge) et de contrôle (équilibrage, mesure de tension et mesure de résistance interne des éléments pour les chargeurs récents, dits « smart ») offre un meilleur suivi de l'état de santé d'un accu : si, en fin de charge, un déséquilibre est constaté malgré le système d'équilibrage (généralement capable de 300 mA), c'est que l'accu n'est plus utilisable, vouloir à tout prix l'équilibrer revient à prendre un risque certain. Sachant qu'un chargeur « intelligent », comme les excellents ISDT et dérivés type Spektrum, arrêtera la charge sur la tension la plus élevée des éléments, et non sur la tension globale du pack (ce qui serait évidemment très dangereux). On pourra terminer cet encart par un rappel civique : un accu en fin de vie ne se jette pas dans la poubelle ni ne « s'inerte » dans un bain d'eau salé jeté dans l'évier (hum... boiriez-vous ensuite cette mixture ?), mais doit être simplement complètement déchargé (mise hors énergie) et jeté dans le bac de recyclage pour piles et accumulateurs que l'on trouve dans toutes les grandes surfaces et autres.

Bibliographie

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion
- https://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li
- https://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures
- https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
- https://batteryuniversity.com/learn/article/confusion_with Voltages
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01668529/document> (étude du vieillissement des accus)
- <https://www.gensace.de/blog/temperature-affect-lipo-battery-performance>
- <http://www.lipobench.com/index.php?page=thelab>
- <https://culturefpv.fr/comprendre-les-lipo-20171007/>
- <https://www.elektromodellflug.de/index.html>

Conclusion

Toujours en espérant que vous avez appris des choses sans toutefois que cela vous ait semblé trop rébarbatif, je vous donne rendez-vous au prochain et dernier épisode pour la mise en oeuvre pratique de tous les éléments théoriques abordés lors des trois premiers volets.

Franck Aguerre
<http://rcaerolab.eklablog.com/>