

Stockage de l'énergie électrique et les batteries d'accumulateurs.

Francis JOFFRE

Retraité CEA en 2020

Spécialités professionnelles :

**contrôle non destructif sur réacteurs nucléaires
électronique durcie à la dose de radiations gamma**

Spécialités personnelles :

**autonomie énergétique, photovoltaïque, accumulateurs,
alarme, électronique et électrotechnique...**

Stockage de l'énergie électrique et les batteries d'accumulateurs. (résumé)

A/ Solutions nombreuses mais souvent difficiles d'accès :

1/ Divers principes de stockage envisageables :

Gravité	→	souvent avec l'eau (barrages),
Inertiel	→	volant d'inertie en béton avec cerclage métallique,
Thermique	→	briques réfractaires ou procédés à changement de phase, récupération avec stirling / modules peltier / machine à vapeur,
Pression	→	récupération simple par moteur à air comprimé,
Chimique	→	celle qui nous intéresse ici.

2/ Solution la plus accessible au niveau individuel :

Les batteries d'accumulateurs classiques, récentes et futures,
expansion à suivre pour les sodium/ions, piles à combustible, batteries à flux...

B/ Paramètres techniques spécifiques aux accumulateurs :

1/ Grandeurs physiques et unités :

tension en volt, intensité en ampère, capacité en Ah, énergie en Joule ou en Wh.

2/ Paramètres critiques et association de cellules :

résistance interne et autodécharge / montage série ou parallèle,
Instruments de mesure / appareillages de charge , de décharge et de sécurité.

C/ Récapitulatif des principaux accumulateurs :

1/ Les classiques : Plomb, Cadmium/Nickel, Ni/Mh,

2/ Les récentes : Lithium/ions sous de nombreuses versions LiFePO4, LCO (LiCoO2), LiMn2O4, NMC (LiNiMnCoO2), NCA,(LiNiCoAlO2), LTO (Li4Ti5O12) et Lipo.

D/ Optimisation de l'exploitation des accumulateurs :

1/ Sélectionner la technologie en fonction de l'application :

stockage dans la durée ou disposer de fortes puissances instantanées.

2/ Électronique de surveillance : BMS (Battery Management System)

Le BMS protège les accumulateurs montés en batterie et évite certains risques.

E/ Risques associés à l'utilisation des diverses technologies :

1/ Toxicité et corrosivité de certains produits :

Plomb, Cadmium, acide sulfurique, acide fluorhydrique, lithine, potasse...
pollution, danger par inhalation ou ingestion, liquides, gaz ou vapeurs corrosives.

2/ Risques associés à la température ou aux mélanges :

Lithium, hydrogène, oxygène de l'air : combustion violente voire même explosive.

F/ Réparation et recyclage des blocs batteries :

1/ Diagnostic des pannes et actions possibles :

défauts cellules ou électroniques : remplacement, rééquilibrage et régénération.

2/ Recyclage de certains éléments des blocs batteries :

récupération de bonnes cellules et de certaines parties électroniques.

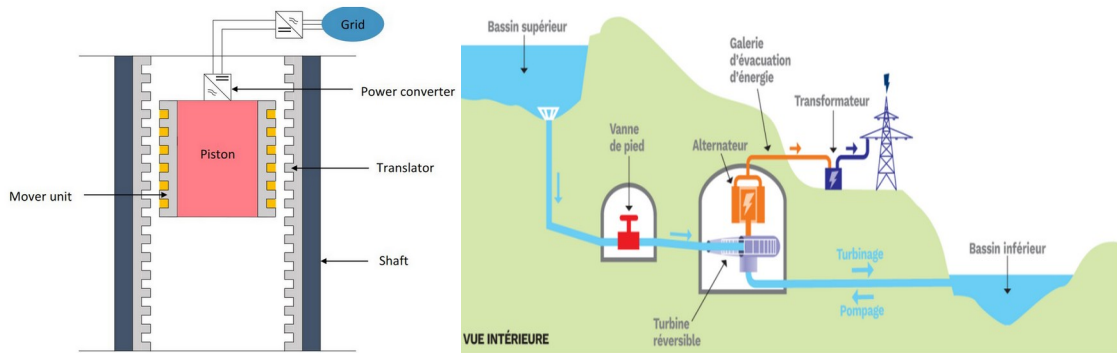
A/ Solutions nombreuses mais souvent difficiles d'accès :

Peu importe le mode de stockage, ce qui compte est de pouvoir effectuer la récupération sous la forme d'énergie électrique, état dans lequel l'utilisation est la plus pratique.

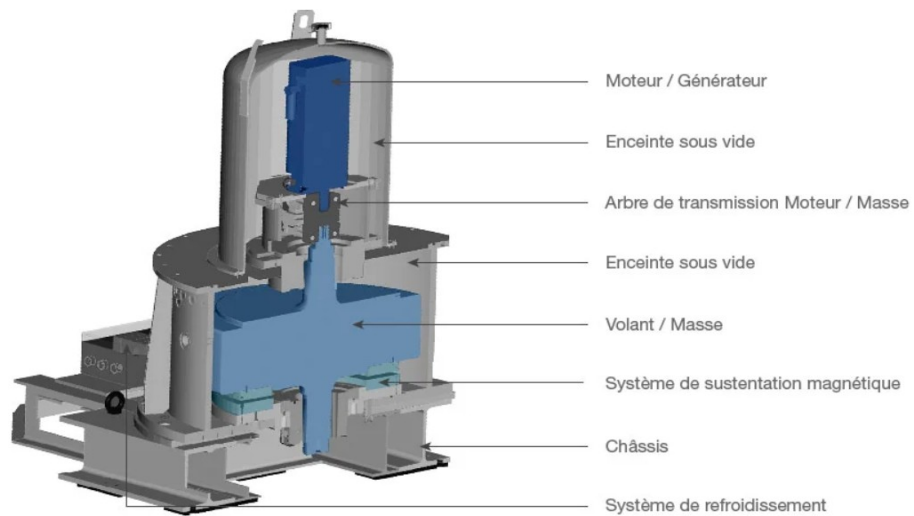
1/ Divers principes de stockage envisageables :

Gravité → souvent avec l'eau (barrages),

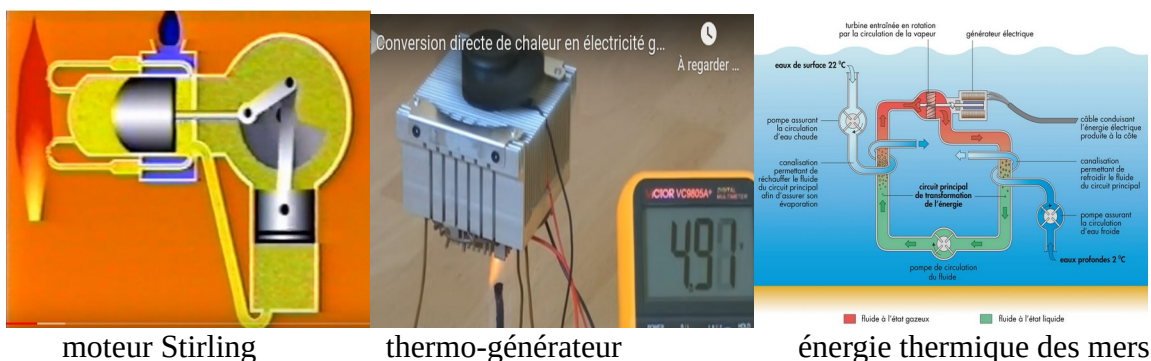
« gravité par masse solide » « Station de Transfert d'Energie par Pompage : STEP »



Inertiel → volant d'inertie en béton avec cerclage métallique,



Thermique → briques réfractaires ou procédés à changement de phase, L'énergie est stockée sous forme d'une différence de température et de nombreuses solutions existent pour la récupérer :



L'utilisation d'une différence de température impose un rendement limite imposé par la formule suivante :
 rendement inférieur à : $(1 - \text{Température froide} / \text{Température chaude})$.
 Les températures sont en Kelvin (soit $273 + \text{température en Celcius}$)
 Cela explique le faible rendement des réacteurs nucléaires REP ou EPR dont pratiquement 70 % de l'énergie thermique produite sont perdus.

Pression → récupération simple par moteur à air comprimé,

Le moteur peut être à pistons, à palettes ou à turbine. Le moteur est en général réversible et sert aussi à comprimer l'air à stocker.

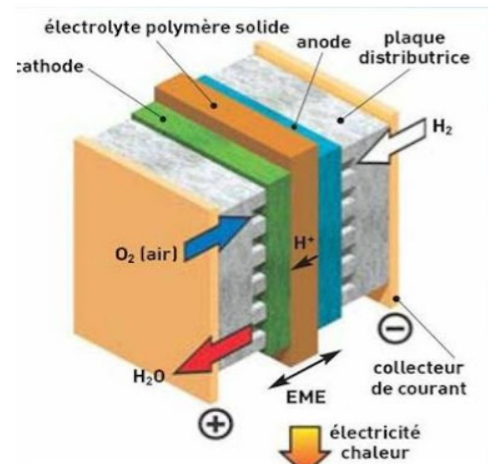
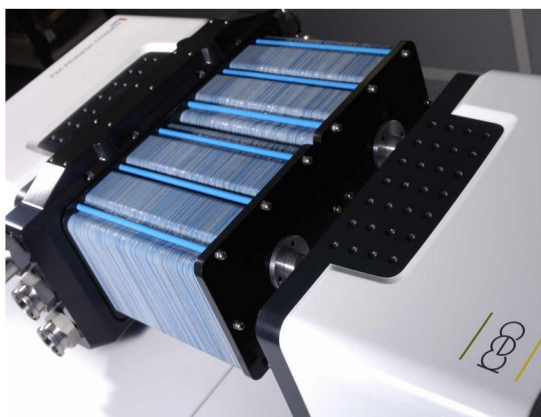
Chimique → cette solution est celle qui nous intéresse ici.

2/ Solution la plus accessible au niveau individuel :

Les batteries d'accumulateurs classiques, récentes et futures, expansion à suivre pour les sodium/ions et **3 Cas particuliers importants à connaître :**

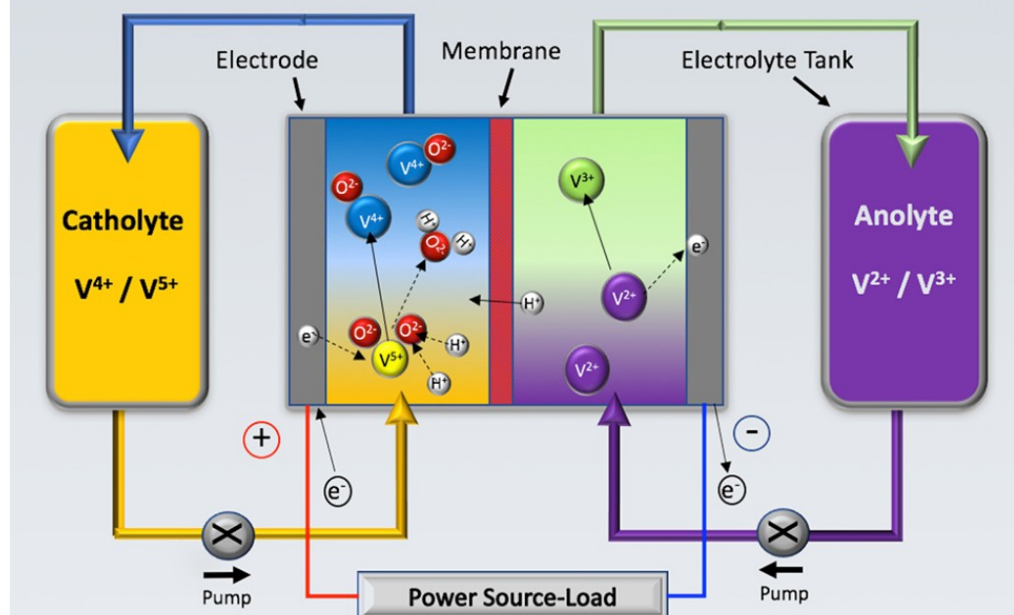
1°/ Les supercapacités plusieurs milliers de farad mais limitées à 2,7V

2°/ Piles à combustible avec hydrogène



3°/

Comment fonctionne une batterie à flux?



B/ Paramètres techniques spécifiques aux accumulateurs :

1/ Grandeurs physiques et unités :

Tension en V (volt) : *en décharge* $U=E-rI$ et *en charge* $U=E+rI$

- U est la tension aux bornes de la batterie et E étant la tension à vide ($I=0$).
- la tension d'une batterie est la somme des tensions des cellules montées en série.
- la tension cellule peut permettre d'identifier la technologie de l'accumulateur.
- la valeur de la tension est un reflet approximatif de l'état de charge.

Intensité en A (ampère) : courant, d'électrons, généré par la batterie

- Les pertes dans la batterie augmentent avec l'intensité, d'où échauffement.
- Valeur limite donnée en fonction de la capacité de l'accumulateur (ex : 70C)
- Batterie plomb de démarrage voiture : 400A (essence) et 800A (diesel)

Résistance interne en ohm : dépend du vieillissement et de la technologie.

- La résistance interne diminue avec la température.

Puissance en W (watts) : $P = U \times I$ **1 cheval au repos : 735W**

Capacité en Ah (ampères x heures) : caractéristique des cellules ou batteries

- La capacité est directement liée à la taille des cellules

Energie en Joule ou en Wh (watts x heures) : correspond à tension x capacité

- **Joule** (système international) = $P \times \text{temps}$ 1 cal = 4,18J **1wh = 3600J**
- Smartphone : 15wh, ordi portable : 50wh, voiture électrique : 50 à 100 kwh

Densité Massique (Wh/kg) :

Indique la quantité d'énergie stockée par kilogramme de batterie. Une densité massique élevée est essentielle pour des applications où le poids est un facteur critique, comme les véhicules électriques et les appareils portables.

Densité Volumique (Wh/m³) :

Mesure l'énergie stockée par unité de volume. Une densité volumique élevée est importante pour des applications où l'espace est limité, comme les systèmes de stockage d'énergie stationnaires et les dispositifs électroniques compacts.

2/ Paramètres critiques et association de cellules :

- Les tensions min et max de chaque cellule, spécifiques à chaque technologie, doivent être respectées sous peine de dégradation irréversible.
- La température est une contrainte à respecter sous peine de dégradation et d'incendie, T_{min} pour la charge et T_{max} pour la charge et la décharge.
- La résistance interne est critique pour maîtriser le rendement charge/décharge.
- Choisir une tension de batterie élevée pour optimiser le rendement.
- Cellules en série : résistance interne, capacité et historique similaire.
charger au préalable toutes les cellules câblées en parallèle.
- Cellules en parallèle : autodécharge similaire (les capacités en Ah s'ajoutent).
- Les chargeurs électroniques surveillent tension, intensité et température.
- Des appareils spéciaux permettent de mesurer la capacité des cellules.
- Les appareils pour la mesure des résistances internes sont moins efficaces,
il est préférable de la faire soit même avec la formule $U-U_n = r \times (I-I_n)$
les mesures U_n et I_n correspondent aux conditions nominales,
avec U et I qui correspondent à un écart d'environ 10 % du nominal.

C/ Récapitulatif des principaux accumulateurs :

Structure cylindrique ou prismatique : la première résiste mieux à la pression et la seconde est plus avantageuse pour les grosses capacités, au niveau de la densité volumique.

1/ Les classiques : Plomb, Cadmium/Nickel, Ni/Mh,

Technologies	Densité énergétique	Densité volumique	Tension/maintien 10°C / 40°C	Nb de cycles	décharge/charge
Plomb ouvert	35Wh/kg	80 Wh/l	2,22V/2,36V	400 à 1200	10C/0,1C
Plomb fermé	35Wh/kg	80 Wh/l	2,17V/2,32V	400 à 1200	10C/0,1C
Plomb/AGM	35Wh/kg	80 Wh/l	2,17V/2,32V	400 à 1200	3C/0,1C
Plomb/gel	35Wh/kg	80 Wh/l	2,14V/2,29V	400 à 1200	2C/0,1C
Ni/cd	60 Wh/kg	150 Wh/l	1,36volt	2000	8C/0,1C
Ni/Mh	90 Wh/kg	200 Wh/l	1,4volt	1500	5C/0,1C

(AGM : absorbed glass material)

2/ Les récentes : Lithium/ions sous de nombreuses versions LiFePO₄, LCO (LiCoO₂), LiMn₂O₄, NMC (LiNiMnCoO₂), NCA,(LiNiCoAlO₂), LTO (Li₄Ti₅O₁₂) et Lipo.

Technologies	Densité énergétique	Densité volumique	Composition chimique	Nb de cycles	décharge/charge/V
LTO	70Wh/kg	177Wh/l	Li titanate	20000	15C/10C/2,4volts
LMO	150Wh/kg	350Wh/l	Li manganese	300 à 700	10C/1C/3,7volts
LCO	200Wh/kg	400Wh/l	Li cobalt	500 à 1000	1C/ /3,6volts
NMC	220Wh/kg	500Wh/l	Li Ni Mn Co	2000	3C/ /3,6volts
NCA	250Wh/kg	500Wh/l	Li Ni Co Al	1000	3C/ /3,6volts
Lipo	155Wh/kg	340Wh/l	Li polymère	200 à 500	1 à 60C/ /3,6volts
LFP	170Wh/kg	350Wh/l	Li Fe Phosphate	>4000	3C/1C/3,2volts
Na/ions	150Wh/kg		Sodium / ions	1500	10C/4C/3,1volts

Il existe plusieurs types de chimie NMC : (application dans l'automobile)

- **NMC 111** (Nickel 33,3 % – Manganèse 33,3 % – Cobalt 33,3 %)
- **NMC 622** (Nickel 60 % – Manganèse 20 % – Cobalt 20 %)
- **NMC 811** (Nickel 80 % – Manganèse 10 % – Cobalt 10 %)

Les NMC 811 sont les plus récentes : elles ont une forte concentration en nickel et une très faible teneur en manganèse et en cobalt. Il en résulte une densité d'énergie plus élevée à un coût moindre. Plus courantes, en revanche, sont les cellules NMC 622 et les anciennes 111 sont désormais peu utilisées.

D/ Optimisation de l'exploitation des accumulateurs :

Large panoplie de technologies d'accumulateurs disponibles sur le marché mais rien de parfait : il faut donc rechercher le meilleur compromis pour une application visée.

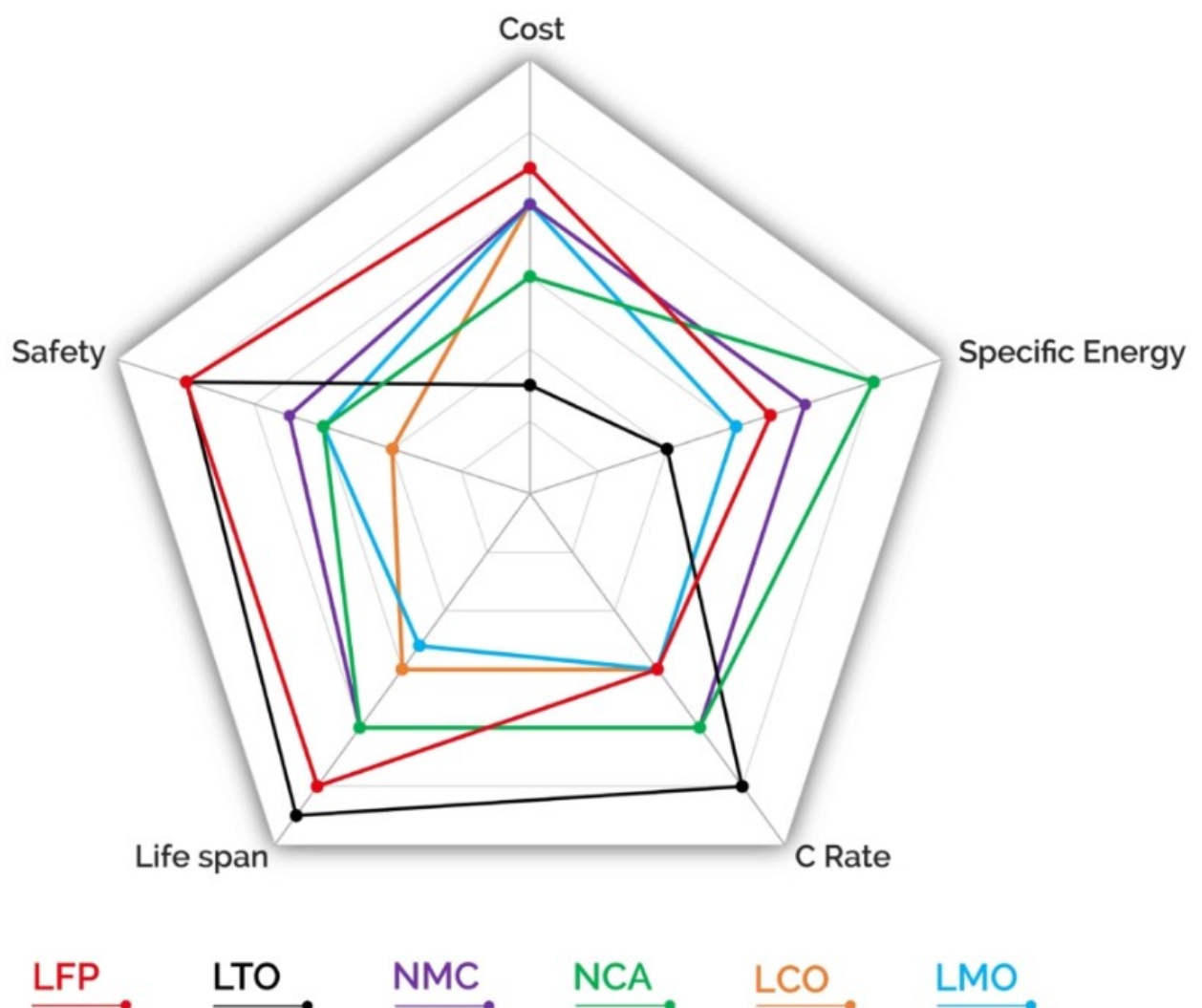
1/ Sélectionner la technologie en fonction de l'application :

Les spécificités des diverses applications qui exploitent les batteries imposent de nombreuses contraintes à prendre en considération :

- ➡ Faible autodécharge (pour le stockage de longue durée)
- ➡ Capacité élevée en minimisant poids ou volume.
- ➡ Durée de vie élevée en nombre de cycles ou en temps.
- ➡ Fortes puissances instantanées.
- ➡ Recharge rapide (demandé dans l'automobile : attente et freinage).
- ➡ Fiabilité et sécurité (panne, pollution, incendie).
- ➡ Stabilité de la tension.
- ➡ Valeur de la tension de cellule pour minimiser son nombre.
- ➡ Facilité de recyclage (actuellement très valable avec le plomb).
- ➡ Coût.

Le diagramme suivant :

qui prend en compte les principales contraintes en comparant les diverses technologies permet d'aider à choisir en fonction de l'utilisation :



- **Energie spécifique ou Densité gravimétrique** [Wh/Kg] : c'est le rapport entre la quantité d'énergie contenue ($Wh = V \times Ah$) et le poids de la batterie.
- **Sécurité**: elle va de pair avec la stabilité thermique, car la sécurité intrinsèque dépend beaucoup de la stabilité thermique des composants.
- **Taux C**: taux de charge/décharge, c'est-à-dire le rapport entre le courant de charge ou de décharge (A) et la capacité nominale de la cellule (Ah). Il s'agit d'un paramètre étroitement lié à la capacité de la cellule à générer de l'énergie.
- **Cycle de vie** : Nombre de fois où la cellule peut être déchargée et rechargée jusqu'à ce que la fin de vie soit atteinte, normalement considérée comme atteinte lorsque la capacité résiduelle est de 80 %.
- **Coût**

2/ Électronique de surveillance : BMS (Battery Management System)

Le BMS protège les accumulateurs montés en batterie et évite certains risques. Rappel, le terme batterie nomme une association d'accumulateurs élémentaires.

Le BMS est pratiquement indispensable pour les batteries Li/ions pour des raisons de sécurité en surveillant la température de l'ensemble. Accessoirement, il sert aussi à protéger chaque cellule d'une charge ou d'une décharge excessive. Souvent le BMS assure une fonction limitation de courant afin de protéger la batterie contre le court-circuit qui est dangereux essentiellement pour des raisons thermiques.

Pour optimiser la durée de vie des batteries, il est conseillé de choisir des BMS à équilibrage afin de compenser les disparités entre les diverses cellules. On peut aussi faire appel à des égaliseurs actifs capacitifs ou à transformateurs afin d'exploiter les meilleures cellules en leur faisant aider les plus mauvaises.

Les BMS existent en électronique simple ou avec micro-contrôleur, dans ce dernier cas, de nombreuses options deviennent accessibles mais cela rend très difficile une réutilisation simple de la batterie pour d'autres applications.

Les batteries au plomb sont rarement équipées de BMS : l'électronique de surveillance, si elle existe, se limite à la batterie globale en contrôlant tension min, tension max, avec limitation de courant pour la recharge. Dans une voiture, l'alternateur fournit 14,4volts et on considère que le courant sera limité par la puissance de l'alternateur.

Un composant intéressant pour la protection contre le court-circuit est le fusible réarmable. Certains Lipo en sont d'ailleurs équipés directement sur une de ses deux bornes.

Point important :

La mise en parallèle de batteries doit être faite avec précaution à cause du risque de court-circuit d'une cellule. En général, les mises en parallèle se font au niveau des cellules élémentaires pour minimiser les conséquences. Avec des batteries, il faut utiliser des diodes pour éviter qu'une batterie puisse se décharger dans une autre. Sinon prévoir fusibles ou ampoules de phare 12V qui peuvent jouer le rôle d'indicateur visuel et de fusible.

E/ Risques associés à l'utilisation des diverses technologies :

Bien sûr, ne pas oublier les risques électriques, optiques, de brûlures et de projections associés à l'usage de générateurs électriques : tensions et courants élevés.

1/ Toxicité et corrosivité de certains produits :

Avec les batteries au plomb : le plomb est toxique (saturnisme) et ne doit être libéré dans la nature (très polluant), l'acide sulfurique est corrosif.

Avec les Cadmium/Nickel : le cadmium est toxique et la potasse est caustique.

Avec les batteries lithium : en cas de fuites dégagement possible d'acide fluorhydrique (très corrosif), de vapeurs diverses dont certaines nocives. L'hexafluorophosphate de lithium qui est utilisé dans électrolyte doit être traité avec précautions.

Donc penser à prendre des précautions pour éviter l'inhalation, l'ingestion ainsi que les contacts avec la peau et surtout les yeux.

De plus il est important de contribuer au recyclage qui est le meilleur moyen de minimiser la pollution et d'économiser les matières premières offertes par la planète.

2/ Risques associés à la température ou aux mélanges :

Avec les éléments non étanches, les dégagements gazeux peuvent aboutir à des mélanges explosifs avec l'air : batteries au plomb (production d'hydrogène) à placer dans des locaux aérés.

Avec tous les éléments hermétiques, la température est un paramètre à surveiller car toute élévation abusive entraîne des augmentations de pression qui peuvent devenir dangereuses en cas de dislocation avec tous les risques de projections de divers morceaux et produits plus ou moins dangereux.

Simultanément le contact avec l'air de ces produits peut provoquer des incendies qui peuvent être difficile à maîtriser.

Dans le cas des batteries lithium, la présence de ce produit à l'état de métal permet à la batterie de brûler violemment dans l'air.

De plus, l'oxygène étant aussi disponible sous certaines

combinaisons dans la batterie, le

lithium peut donc trouver le moyen de brûler sans air. Il en résulte l'impossibilité d'étouffer un incendie de batterie lithium.

Les seules actions efficaces sont :

- le confinement pour éviter la propagation,
- le refroidissement avec de la neige carbonique ou avec de l'eau, à condition d'être à l'extérieur à cause de l'hydrogène produit, l'objectif étant de diminuer l'importance de la réaction chimique.



F/ Réparation et recyclage des blocs batteries :

1/ Diagnostic des pannes et actions possibles :

défauts cellules : solution changement cellule

- ➡ Court-circuit interne (défaut le plus grave qui peut arriver sans raison apparente ou extérieure avec risque d'incendie)
- ➡ Coupure interne résulte, en général, d'un échauffement excessif ou d'une surcharge (due à une protection intrinsèque mise en place depuis de nombreuses années pour éviter que les cellules se propulsent comme des fusées). Ce dispositif n'existe pas sur les Lipo.
- ➡ Corrosion visible à l'extérieur consécutive à une situation déchargée excessive pendant une durée prolongée ou présence d'eau au niveau du plot positif.
- ➡ Baisse de capacité qui est une conséquence normale du vieillissement.
- ➡ Autodécharge importante qui peut rendre inutilisable la cellule dans de nombreuses applications.
- ➡ Augmentation de la résistance interne.
- ➡ Gonflement avec le Lipo : risque de fuite d'un gaz d'odeur caractéristique.

défauts batteries : solution rééquilibrage des cellules ou changement cellules

- ➡ Déséquilibre des cellules qui provoque une baisse de capacité due à l'action du BMS qui protège contre la décharge ou surcharge excessive de chaque cellule.
- ➡ Défaut d'une cellule comme décrit au dessus.
Dans le cas d'une batterie plomb régénération par recharge forcée à C/10 pendant 14h ou désulfatation par impulsions à forte intensité, ajout d'électrolyte ou charge à C/100 pendant plusieurs semaines.

défauts électroniques :

- ➡ Fusible grillé : Solution changement fusible
- ➡ Refus de charge ou décharge dont la cause est une panne BMS : Solution changement du BMS.

2/ Recyclage de certains éléments des blocs batteries :

récupération de bonnes cellules :

dans la majorité des cas les pannes sont dues aux BMS donc les cellules peuvent être recyclées. En cas de pannes dues à une ou plusieurs cellules, les autres peuvent être en parfait état.

Pour ce qui concerne les mauvaises cellules, si la tension aux bornes est nulles et que l'on est certains que la sécurité intrinsèque n'est pas coupée, dans le principe le risque d'incendie est supprimé mais pas la nocivité des produits qui peuvent s'échapper.

récupération des batteries d'ordinateurs :

certaines BMS refusent la recharge lorsque la batterie est trop déchargée donc démontage pour précharge par l'extérieur ou perçage aux extrémités pour effectuer cette opération.

De même, certains chargeurs de Li/ions refusent de charger si la tension des batteries est descendu en dessous d'un seuil fixé dans le chargeur.

En cas de baisse de capacité d'une cellule, effectuer l'échange de la cellule en mettant en parallèle une cellule tampon pour éviter que le BMS constate une coupure dans son alimentation :

sinon nécessité de disposer d'un matériel spécial pour reprogrammer le BMS.

récupération des batteries Li/ions diverses :

Certains chargeurs de refusent de charger si la tension des batteries est descendue en dessous d'un seuil fixé dans le chargeur. Cela concerne, en général, les chargeurs de batteries Lipo de modélisme sans BMS dont cette fonction est assurée par le chargeur.

Une solution qui permet de récupérer la batterie si elle n'a pas été détériorée consiste à effectuer une précharge vers C/100 jusqu'à atteindre sur chaque cellule une valeur minimale de 3 volts. Ensuite le chargeur prévu acceptera de prendre le relais.

Certains BMS appliquent aussi cette méthode.

Conclusion : il ne faut pas charger à fort courant une cellule dont la tension est inférieure à 3 volts si l'on veut éviter de l'endommager irréversiblement.

récupération d'éléments de BMS :

L'interrupteur MOS peut servir avec l'ajout d'électronique.

Les bms de monocellules sont directement réutilisables.

Les fusibles réarmables des Lipo sont très utiles comme éléments de sécurité.

Liens utiles :

<https://www.flashbattery.tech/fr/types-batteries-lithium-quelle-chimie-utiliser/>

<https://etekware.com/fr/types-of-lithium-ion-batteries/>

<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/batterie-et-recharge-ve/s-2511-les-differents-types-et-chimies-de-batteries-lithium-ion.php>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Georges_Claude

<https://www.encyclopedie-energie.org/energie-thermique-des-mers-histoire-et-perspectives/>

<https://diystirlingengine.com/sv-2-stirling-engine-generator/>

http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Syst%C3%A8me_Parabole-Stirling_d%27Odeillo

<https://www.genitronsviluppo.com/2008/02/13/motori-stirling-50-milioni-di-per-infinia-le-nuove-parabole-solari-ad-alta-efficienza-35-kw-da-una-tecnologia-di-2-secoli-fa/>

<https://www.tycorunenergy.fr/batteries-a-flux/>