

CST

ÉTUDE DES BATTERIES APPLIQUÉE À L'INDUSTRIE DU CINÉMA

La CST est la première association française de techniciens du cinéma et de l'audiovisuel. Née en 1944, elle défend le travail collectif et promeut l'excellence technique pour permettre l'aboutissement de la vision de l'équipe artistique. La CST respecte cette vision et en garantit la traduction sur l'écran pour l'ensemble des spectateurs.

Les actions de la CST se traduisent par l'organisation de groupes de travail pour définir les bonnes pratiques professionnelles qui deviendront des recommandations techniques, parfois même adoptées en normes et standards.

Ces travaux se déroulent au sein des cinq Départements de la CST : Production/Réalisation, Son, Postproduction, Diffusion-Distribution-Exploitation et le Département Image.

À ce titre, la CST accompagne également les professionnels dans la mise en œuvre de ces recommandations. Par exemple, elle conseille et labellise les salles de cinéma qui souhaitent proposer une expérience optimale à leurs spectateurs et assure la direction technique de plusieurs festivals, dont le Festival International du Film de Cannes.

Enfin, la CST est également devenue la maison des associations pour la quasi-totalité des associations de professionnels de l'industrie cinématographique.

La CST est une organisation principalement financée par le CNC.

CST – COMMISSION SUPÉRIEURE TECHNIQUE DE L'IMAGE ET DU SON

9 RUE BAUDOIN – 75013 PARIS

www.cst.fr

Délégué général et directeur de la publication : Baptiste Heynemann

Coordination de la présente publication : Ilan Ferry

Responsable de la communication : Myriam Guedjali

Maquette : fabiennebis.wixsite.com/graphisme

Janvier 2022

ÉTUDE DES BATTERIES APPLIQUÉE À L'INDUSTRIE DU CINÉMA

BUT DE CETTE ÉTUDE

Les technologies numériques sont de plus en plus utilisées pour les tournages cinéma, les reportages TV, la captation d'images, la prise de sons et les communications.

Avec la diversité des lieux de travail, les matériels utilisés sont de plus en plus « légers et mobiles ». Contrainte de cette mobilité, ils sont principalement alimentés par des sources portables d'énergie. Dans la pratique, ces matériels fonctionnent donc principalement à l'aide de batteries.

Pour mémoire une batterie est un composant électrochimique capable de générer une certaine quantité d'énergie électrique pendant un certain temps. Cette énergie consommée, il est possible de la recharger pour une nouvelle utilisation.

Le but de ce document est d'aider les différents utilisateurs (personnels techniques, réalisateurs et exploitants) à découvrir et à mieux comprendre les différences et les particularités des différentes sources d'énergies disponibles pour ces activités.

Dossier réalisé par Paul BRESSON et François MARESCHAL.

SOMMAIRE

1 ► PRÉSENTATION HISTORIQUE ET TECHNIQUE DES TECHNOLOGIES DE BATTERIES 6

DÉFINITION	6
PRINCIPES ET HISTOIRE	7
CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES	7
DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATIONS	7
■ Plomb-acide	7
■ Nickel	9
Le couple nickel-cadmium (Ni-Cd)	
Le couple nickel-métal hydrure (Ni-MH)	
Le couple nickel-zinc (Ni-Zn)	
■ Lithium	10
Le couple lithium-fer-phosphate	
Précautions d'emplois des batteries lithium	

2 ► INNOVATIONS ET AUTRES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE 13

LA BATTERIE DU FUTUR	13
ÉVOLUTIONS	13
■ Étapes de fabrication	13
■ L'électrolyte	14
■ Les nouvelles électrodes	14
Le couple sodium-ion	
Un autre couple : le lithium-soufre (Li-S)	
Le Lithium-Ion et Le graphène	
UNE NOUVELLE ÉLECTRODE POUR LES FUTURES BATTERIES	15
LA MINIATURISATION	16
AUTRES SOLUTIONS POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	16
■ La batterie à écoulement	17
■ La pile à combustible	18

3 ► RÉGLEMENTATIONS LIÉES AUX BATTERIES 19

RÉGLEMENTATIONS	19
■ Usages et Fabrication	19
Usage	
Fabrication	
Normes de fabrication	
■ Conditions d'utilisation	20
■ Réglementation du transport (batterie au lithium)	20
Le transport routier	
Le transport par avion	
Le transport maritime	

■ Débaras des batteries usagées	21
Principe de la REP et modèle de Battribox	
Procédés de recyclages selon technologies	
Efficience du recyclage	
Collecte des batteries usagées	
Responsabilité du loueur de batteries	
Précautions de recyclage	
Alternatives au recyclage : réemploi et régénération	
Législation du recyclage des batteries	

4 ► ENJEUX EXTERNES ET SECTEURS D'ACTIVITÉS 23

LES MÉTAUX RARES	23
LE MARCHÉ DE LA BATTERIE	24
■ Applications « stationnaires secours »	24
■ Application « stationnaire en cyclage »	25
■ Applications « Mobiles pour équipements portables »	25
■ Applications « Mobiles pour équipements de secours »	25
■ Applications « Mobiles pour équipements autonomes »	25

5 ► BESOINS SPÉCIFIQUES AU CINÉMA POUR LES BATTERIES 26

QUELS BESOINS POUR LE CINÉMA ?	26
■ Pourquoi utiliser des batteries ?	26
■ La diversité du matériel et des lieux	26
■ L'échelle du tournage	26
TÉMOIGNAGES DE PROFESSIONNELS	26
■ Avis d'une cheffe électro	26
■ Avis d'un régisseur	27
■ Avis d'un constructeur de batteries	28
FONCTIONS ET CONTRAINTES DES BATTERIES POUR L'AUDIOVISUEL	28
■ Fonctions attendues d'une batterie de cinéma	28
■ Avis d'un loueur	28
Ordre de grandeurs des besoins énergétiques	
Spécificités des batteries pour le cinéma	
Le cinéma comme moteur d'innovation ?	
La sécurité des batteries au cinéma	
Les innovations, utiles pour le cinéma ?	
La question de l'hydrogène	

6 ► EXEMPLES DE PRODUITS, ORDRES DE GRANDEURS ET SOURCES 30

EXEMPLES DE BATTERIES SUR LE MARCHÉ	30
BIBLIOGRAPHIE	31
■ Sources	31
■ Liste des figures	31
■ Liste des intervenants	31

1 ► PRÉSENTATION HISTORIQUE ET TECHNIQUE DES TECHNOLOGIES DE BATTERIES

DÉFINITION

Les batteries sont des composants électrochimiques autonomes. Ils sont aussi appelés « accumulateurs ».

C'est l'application d'une technique, qui permet l'accumulation (stockage) et la restitution (décharge) de l'énergie électrique, et qui découle du principe de la pile d'Alexandro VOLTA.

PRINCIPES ET HISTOIRE

Le principe de fonctionnement d'une batterie repose sur une technique de conversion réversible d'énergie. Elle permet le stockage et la restitution de l'énergie électrique par la migration des électrons entre deux électrodes.

Le principe de base de ce composant fut mis en évidence en 1801 par les expériences du physicien italien Alexandro VOLTA (1745-1827) qui pensait que la mise en contact de deux métaux différents pouvait produire de l'électricité. De ses nombreuses expériences naquit la première pile constituée de rondelles de Cuivre et de Zinc séparées de feutre imbibé d'eau salée.

C'était une solution technique qui permettait la fabrication de l'électricité. L'industrialisation de ce principe a commencé en 1881, au Luxembourg, impulsée par les frères TUDOR. Ceux-ci, et plus spécialement Henri TUDOR (1859-1928), développèrent un accumulateur à partir des travaux de Gaston PLANTE (1834- 1889). Celui-ci, chercheur autodidacte, a vécu dans le quartier du marais à Paris.

Grâce à sa fortune personnelle, n'appartenant à aucune école, il à mené durant toute sa vie des recherches sur l'électricité à la suite des travaux de VOLTA. Il a d'ailleurs rédigé un livre considéré, par les spécialistes de l'époque, comme « impérissable » : « Recherches sur l'électricité ».

Les frères TUDOR, reprenant ces recherches, ont amélioré et conçu un nouveau type de batteries qu'ils ont industrialisé. Elles étaient utilisées aussi bien pour l'éclairage public ainsi que pour alimenter les premières machines agricoles dites « dynamo-électrique » destinées à remplacer les machines à vapeur.

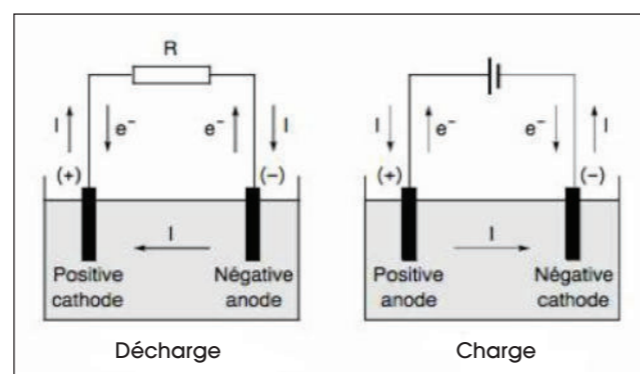
Avant de se développer en Europe et en Angleterre, ils ont aussi été les fournisseurs des batteries destinées aux premières voitures « pétroleo-électriques » mise sur le marché en 1897. Les piles et batteries actuelles sont donc des évolutions de la pile de VOLTA et des recherches de PLANTE et des frères TUDOR.

Les batteries sont des composants utilisés dans de nombreux matériels de télécommunications, dans l'outillage professionnel, dans des équipements médicaux et industriels, dans d'audiovisuel et le cinéma, et de plus en plus, dans les moyens de transports actuels et futurs.

Ce composant a une durée de vie variable selon son utilisation (donc un nombre de cycles charge-décharge), selon les technologies employées pour sa fabrication et en fonction des conditions climatiques de son emploi.

Une batterie est généralement composée de plusieurs cellules de base raccordées entre elles (assemblage dit « en string ») afin d'obtenir la tension souhaitée et la puissance nécessaire. Plusieurs cellules câblées en séries permettent d'élever la tension disponible, couplées en parallèle la puissance disponible augmente.

Chaque cellule de base est constituée d'un « dispositif à deux électrodes (positive et négative) reliées à des plaques plongées dans un électrolyte (mélange d'eau et d'acide sulfurique) en liquide, en gel, ou même solide. Chaque cellule est encapsulée dans un bac.



► Figure 1. Schéma de fonctionnement d'une pile.

Les deux plaques sont faites à partir de matériaux échangeant des électrons. L'électrolyte dans lequel elles sont immergées a pour but de faciliter cette réaction chimique (modification des structures moléculaires des plaques) qui génère le mouvement des électrons entre ces plaques et produit ainsi une tension quand une charge est connectée à leurs bornes. C'est l'action de décharge.

Cette réaction est réversible, permettant ainsi la régénération des électrodes en la connectant à une source de courant continu. C'est l'action de charge.

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

Toutes les batteries, quel que soit leurs technologies de fabrication, ont deux caractéristiques principales communes :

- leur tension exprimée en volts (V) ;
- leur capacité exprimée en Ampères heures (Ah).

On caractérise aussi usuellement les batteries en exprimant leur énergie spécifique en Wh/kg. Cette énergie est le produit de la force électromotrice (exprimée en volts) et de la capacité (en Ampères heures).

Les autres caractéristiques sont principalement :

- Le courant de charge, qui se mesure en Ampères, c'est le courant maximum supportable par la batterie pendant la recharge ;
- La charge électrique qui se mesure en Ah ou mAh. (Courant constant pendant un temps connu). C'est donc la quantité d'électricité emmagasinée dans la batterie. -L'énergie stockée qui se mesure en watts-heure, (Wh) c'est la charge électrique multipliée par la tension moyenne ;
- Le débit maximum (ou courant de pointe) qui se mesure en Ampères. Il est généralement spécifié en amplitude et en durée. Il est largement supérieur au débit moyen permanent ;
- La durée de vie qui est estimée par le nombre moyen de « cycle charge/décharge » ;
- L'impédance Interne, qui est exprimée en ohms ;
- Le rendement qui est le rapport entre énergie initiale et énergie restituée

Il est parfois aussi question de « vieillissement », c'est-à-dire la perte progressive de capacité de la batterie dans le temps qui dépend des conditions d'emplois et de charge.

Les différentes technologies utilisées pour la fabrication des éléments de base (électrode, électrolyte, bac) constituent d'autres facteurs caractéristiques d'une batterie.

La fabrication des batteries s'est adaptée et a évolué grâce aux différentes recherches et aux progrès technologiques réalisés ces dernières années sur ses différents composants, ce afin de répondre au mieux à chaque cas particulier d'utilisation.

Ainsi malgré une certaine standardisation, en particulier pour les connexions externes, la forme physique et les éléments qui constituent une batterie sont différents et toujours adaptés à leurs utilisations.

NOTA

Parallèlement à ces évolutions, les contraintes législatives (destinées principalement à assurer la sécurité de fonctionnement et à réduire l'impact environnemental) ont généré une législation importante concernant la fabrication, l'utilisation, le transport et les procédés de recyclage des batteries.

Ces règles sont des contraintes non négligeables, impératives à respecter et qui doivent être prise en compte lors du choix d'une batterie.

DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATIONS

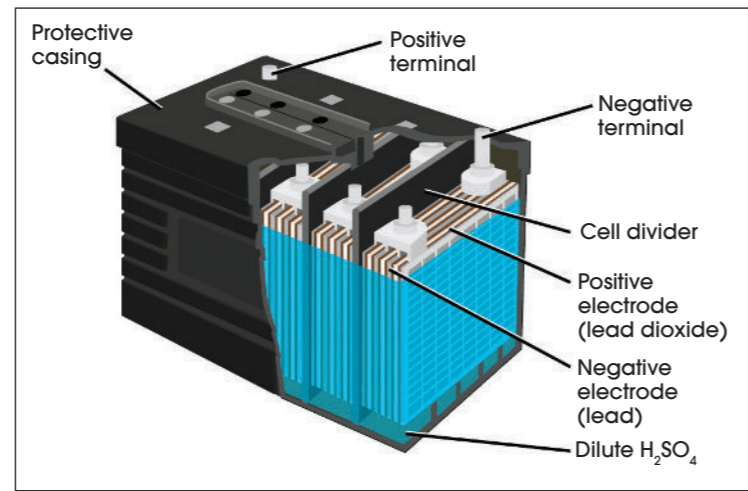
■ Plomb-acide

C'est la plus ancienne technologie. Le premier accumulateur, qui est une déclinaison de la pile de VOLTA, a été réalisé en 1859 par Gaston PLANTE.

Celui-ci en observant l'électrolyse de l'eau acidulée remarqua que son appareil d'expérimentation rendait de l'électricité lorsqu'on coupait l'alimentation, comme si l'oxygène et l'hydrogène pouvaient rendre l'électricité qui les avait produits.

Il comprit très vite que ce n'était pas l'oxygène et l'hydrogène gazeux qui produisaient le courant, mais la modification chimique (oxydation) de la surface du plomb. L'industrialisation et l'apparition des premières batteries sur le marché date de 1881 et fut réalisé en particulier a son début par la société luxembourgeoise TUDOR.

Les batteries au Plomb actuelles sont obtenues en réunissant plusieurs cellules. Chaque cellule est composée de deux lames, (l'une en plomb, l'anode et l'autre en oxyde de plomb, la cathode), plongées dans un bain d'acide sulfurique dilué par de l'eau distillée et écartées par des bandes isolantes (séparateur).



▲ Figure 2. Schéma d'une batterie acide-plomb. Source : Wikipédia.

Ce type de batterie est sensible à la température ambiante, celle-ci pouvant provoquer une variation de la capacité.

Elle demande un entretien régulier (recharge régulière, contrôle du niveau de l'électrolyte) et une ventilation minimum.

Une version plus récente, faisant appel à un électrolyte gélifié ; présente alors l'avantage de ne plus nécessiter d'entretien régulier et de pas rendre la ventilation nécessaire (bac fermé). Elle est aussi plus facilement manipulable mais sa durée de vie est plus réduite.

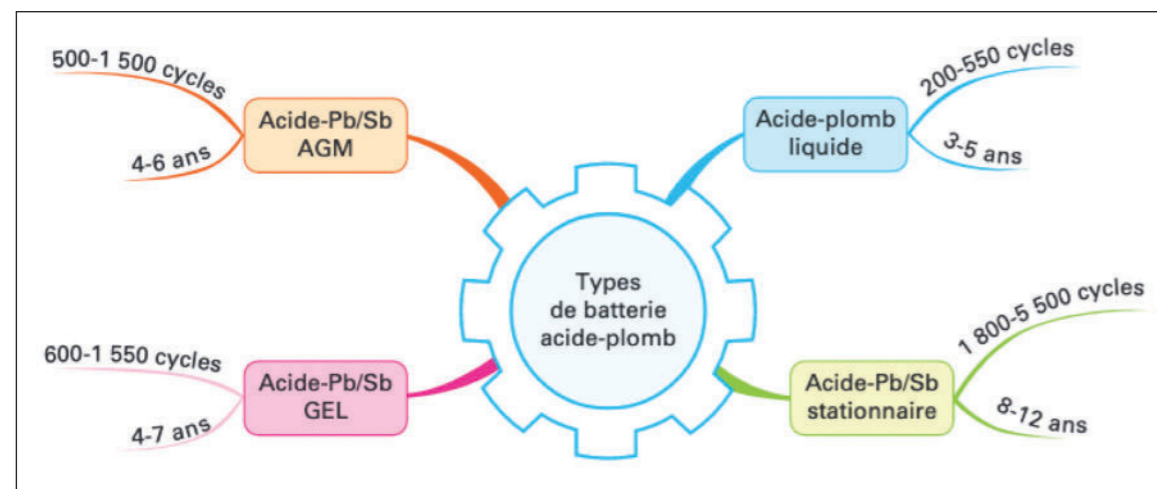
Cette technologie plomb-acide est bien connue et bien maîtrisée.

Elle est principalement utilisée pour les batteries de démarrage des véhicules automobiles et pour certains véhicules électriques de manutention.

Leur utilisation, malgré la nécessité d'une maintenance régulière, reste aussi prépondérante pour toute autre application de sécurité ou de contrôle en secours de la source d'énergie locale.

Bien que ce type de batteries représente actuellement plus de 75 % du marché mondial, la présence de plomb et d'acide sulfurique posent toujours des problèmes de transport et de recyclage, et restent potentiellement dangereux pour l'environnement.

Utilisation - Recyclage des batteries au plomb



▲ Figure 3. Performances des batteries acide-plomb. Source : Techniques de l'Ingénieur.

Le recyclage de ces batteries est une activité rentable. Le plomb ainsi récupéré est très largement réutilisé pour fabriquer de nouvelles batteries.

Ce type de technologie est malgré tout appelé, à plus ou moins longue échéance, à décroître et disparaître.

Nickel

Il a fallu attendre les années soixante pour qu'une nouvelle alternative de la technologie des batteries, à base de nickel, remplace la technologie du plomb.

Bien que connue depuis le début des années 1900, les premiers accumulateurs utilisant cette technologie ne sont apparus qu'à la fin des années quarante.

Cette nouvelle génération de batteries présente, en comparaison des batteries utilisant la technique plomb-acide, une bien meilleure « cyclabilité ».

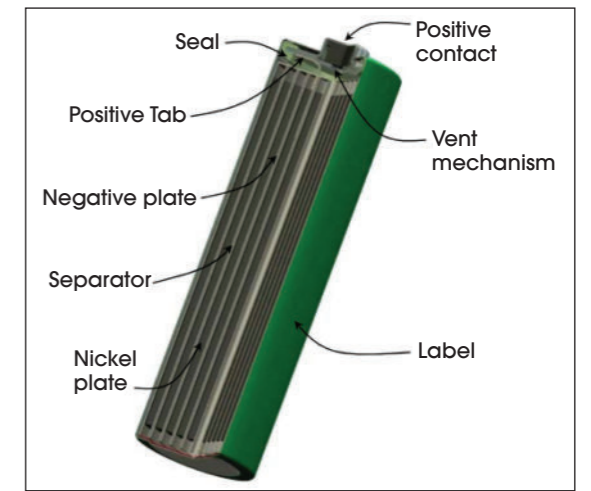
Ces batteries présentent toutes le même type d'électrode positive (cathode à base de Nickel sous la forme oxyhydroxide de nickel) et le même électrolyte aqueux. Seul l'alliage constituant l'électrode négative (anode) varie selon les différentes versions de batteries.

Cette électrode est donc composée d'un alliage présentant la capacité d'absorber et de « résorber » plus facilement l'hydrogène dégagé par la réaction chimique avec l'électrolyte, évitant ainsi la « consommation » ou l'appauvrissement des électrodes au cours du fonctionnement en décharge.

Par rapport à la technique plomb-acide la capacité de stockage de l'énergie est supérieure, le vieillissement est plus progressif. À noter qu'une telle batterie est moins sensible aux variations de la température extérieure.

Ces batteries sont utilisées principalement pour des usages industriels. (Ferroviaire, aéronautique, appareils portatifs, équipements de sécurité, etc.).

Trois différentes combinaisons à base de nickel sont apparues pour réaliser cette électrode négative.



▲ Figure 4. Schéma d'une pile type nickel. Source : perma-batteries.com

Le couple Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

Le cadmium est, dans ces batteries, utilisé pour fabriquer les anodes.

La cathode reste toujours réalisée en hydroxyde de nickel.

Le cadmium, considéré comme un « métal de transition », est bon conducteur d'électricité, mais présente une toxicité élevée.

Ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du zinc, lui permettent entre autres, d'entrer dans la composition de nombreux alliages ou d'être utilisé pour des applications spécifiques, telles le cadmiage (couche de protection de métaux), la galvanoplastie (soudures spéciales) mais aussi pour constituer des éléments mécaniques d'écrans de télévision ou de réacteurs nucléaires.

L'utilisation de ce métal permet un plus grand nombre de cycle « charge-décharge », et donc d'assurer une durée de fonctionnement plus longue. Il supporte des pointes d'appel de courant importantes (résistance interne faible).

Ce type de batteries est particulièrement fiable et peut être utilisé dans une large plage de températures pour de nombreux besoins.

En exploitation, la fin de sa charge se caractérise par une faible variation de la tension, qui est détectable par les chargeurs automatiques, permettant ainsi de réguler la charge de ce type de batteries.

Ces batteries sont principalement utilisées pour des systèmes d'urgence ou de sécurité (chemin de fer, aviation, télécoms). On les a longtemps utilisées pour les équipements portatifs (radio, vidéo, équipements médicaux et outillages sans fils).

Du fait de l'utilisation de substances toxiques, et devant l'obligation de confier les batteries usagées à un site de recyclage agréé, ce type de batteries est soumis à la réglementation européenne d'utilisation des substances dangereuses.

Le coût élevé du cours du cadmium, ne fait que renforcer la concurrence avec la solution technologique plomb / acide et la technologie Ni-MH.

Le couple Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Après de longues recherches, débutées à partir des années 1975, dans tous les secteurs industriels (CNRS, Philips, Volkswagen entre autres), la batterie nickel-métal hydrure (Ni-MH), dérivée de la batterie Ni-Cd, a été commercialisée à partir de 1990, et s'est répandue sur le marché pour répondre à certains usages spécifiques.

Comme dans les types précédents de batteries l'électrode positive (cathode) est en nickel (sous forme d'oxyhydroxide de nickel).

Pour l'anode on emploie des matériaux d'insertion comme l'hydroxyde de potassium mélangé à un alliage d'hydrure métallique (lantane et nickel).

L'énergie emmagasinée est supérieure d'au moins 30 % à celle des batteries Ni-Cd. Si sa charge est plus rapide leur durée de vie est plus faible.

Comme pour les batteries au Ni-Cd, la fin de sa charge se caractérise par une faible variation de la tension nécessitant d'utiliser des chargeurs dits « intelligents » capables d'arrêter celle-ci lorsqu'elle est complète. En exploitation, une telle batterie est utilisée dans à peu près tous les matériels et permet d'obtenir des tensions plus importantes. Elle est donc présente dans les équipements fixes de sécurité ou pour alimenter les moteurs électriques des premières voitures hybrides.

Sur le marché des véhicules électriques, les batteries Ni-MH sont malgré tout progressivement remplacées par la technologie Li-ion.

Ne contenant pas de lithium ou de cadmium c'est donc un matériel plus sécurisé, peu polluant, plus simple à transporter et à stocker.

Son recyclage est réalisé selon des procédés connus et éprouvés avec peu de risques pour l'environnement.

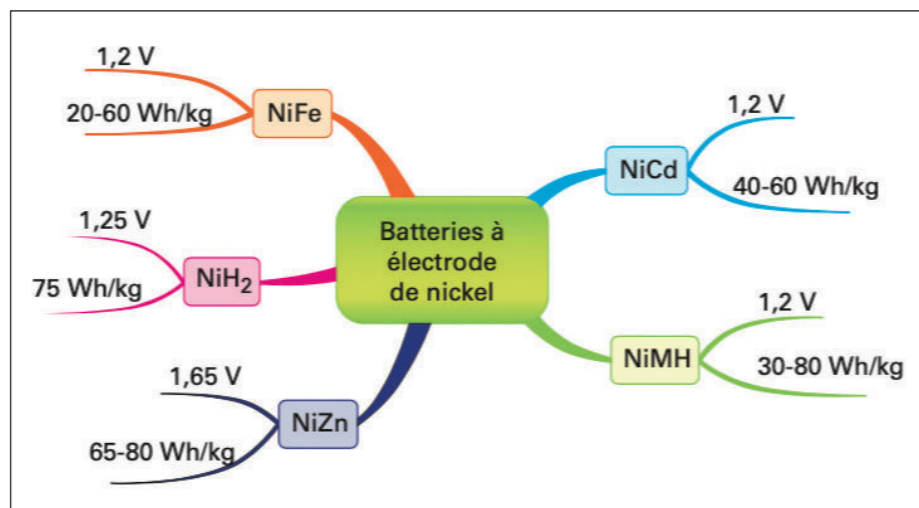
Le couple Nickel-Zinc (Ni-Zn)

Cette combinaison électrochimique, bien que connue depuis plus de cent ans, n'a été industrialisée qu'à partir des années 1998/2000, pour donner suite à l'amélioration de la stabilité des composants.

L'utilisation de zinc pour fabriquer les anodes de batteries rend la fabrication de celles-ci attractives. C'est un système robuste, fiable, parfaitement sûr qui ne nécessite aucune maintenance.

En plus de son coût de fabrication plus économique par rapport à celle des autres accumulateurs (le zinc étant un composant moins coûteux et facilement disponible), et sa facilité de recyclage ; cette solution répond plutôt à des besoins « grand public » (jouet, outillage) ; ou pour des véhicules électriques spéciaux ou bien depuis peu pour le stockage des énergies renouvelables. Elle offre des performances d'énergie et de puissance supérieures au couple Ni-Cd.

Résumé des performances des batteries nickel



▲ Figure 5. Performances des batteries au nickel. Source : Techniques de l'Ingénieur.

■ Lithium

L'évolution des connaissances des propriétés de certains « métaux dits rares » et une meilleure maîtrise de l'électrochimie sont indispensables pour la mise au point et la fabrication de ces nouvelles batteries. Cela a permis la mise en évidence les propriétés du lithium.

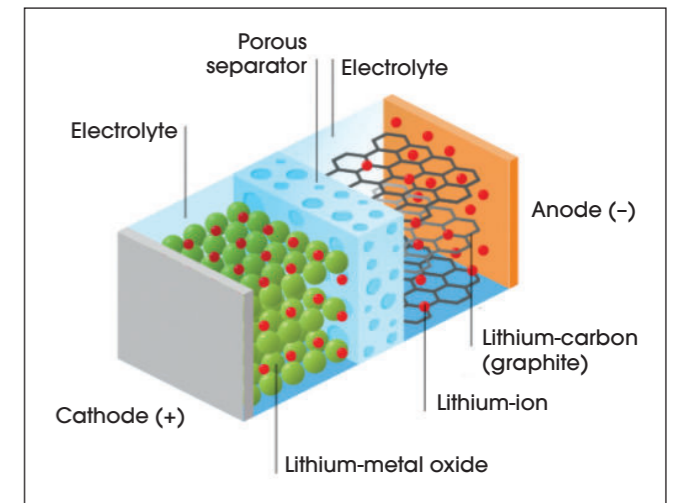
C'est ainsi que la technique dite Lithium Ion, dénommée aussi lithium-ion battery, est apparue. Cette technologie bien que mise au point en 1978, n'est commercialisée que depuis 1991 et est toujours en développement.

Elle repose sur des cellules dont l'électrode positive est réalisée :

- soit en lithium métallique (solution qui pose d'importants problèmes de sécurité) ;
- soit en ajoutant au lithium un composé d'insertion.

Ce composé est obtenu par la combinaison du lithium soit avec du nickel, soit du zinc, soit du cobalt, soit du fer, ou bien encore avec du manganèse.

Si cette solution de composés offre une meilleure sécurité de fonctionnement (forte densité d'énergie, plus longue durée de vie et pas d'effet mémoire), elle nécessite un circuit de protection « embarqué » dans la batterie pour contrôler la gestion des tensions entre les différentes cellules, pour en contrôler et en gérer la charge et la décharge. Cette solution est sensible à la température.



▲ Figure 6. Schéma d'une pile au Lithium. Source : letstalkscience.ca

Enfin l'emploi d'un « chargeur intelligent » est aussi nécessaire pour respecter les paramètres précis de charge.

Malgré cela, c'est donc actuellement la solution de plus en plus souvent employée. Ce type de batteries, occupe maintenant plus 10 % du marché mondial actuel, et continue sa pénétration des différents secteurs.

Des problèmes de sécurité importants (incendie ou explosion) demeurent en cas de surcharge, de décharge trop rapide ou de court-circuit ; le risque d'incendie est alors difficilement maîtrisable. Son développement a suivi les évolutions des secteurs de la téléphonie, des ordinateurs portables, des matériels audiovisuels, des nouveaux véhicules électriques et aussi du stockage statique d'électricité.

L'introduction d'un gel qui fige l'électrolyte (solution dite lithium polymère) permet de stabiliser son contenant à une plus simple enveloppe.

Le couple Lithium-fer-phosphate

Développée à partir de 2007, cette solution est de plus en plus utilisée. Elle est aussi appelée « accumulateur LFP » ou plus simplement « accumulateur LIFE » et utilise une cathode en phosphate de fer Lithié. (LiFePO₄).

Par rapport aux précédentes batteries cette technologie, permettant des intensités élevées, donc plus de puissance, supporte beaucoup plus de cycles de décharges- recharges, et présente surtout un temps recharge plus rapide.

Les risques d'incendie sont plus faibles, et les risques de pollution moins élevés. Cette solution est une excellente option pour les utilisations qui demandent de forts appels de courant dans des conditions climatiques extrêmes.

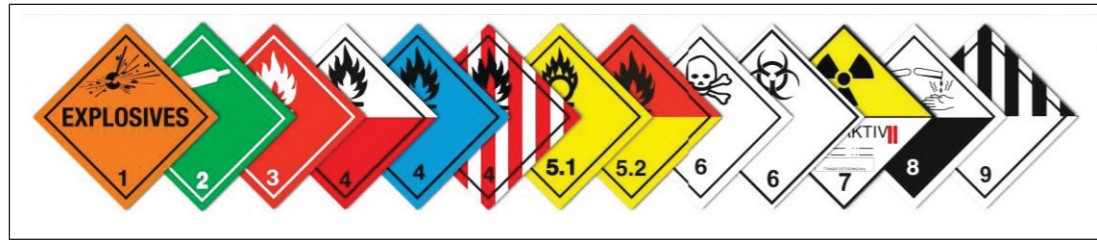
Quelques indications sur les batteries Li-ion les plus courantes							
Une propriété donnée est d'autant meilleure que le nombre d'étoiles est élevé							
Cathode	Désignation	Énergie spécifique	Puissance spécifique	Performances	Durée de vie	Sûreté	Coût
LiCoO ₂	LCO	****	**	***	**	**	***
LiMn ₂ O ₄	LMO	***	***	**	**	***	***
LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂	NMC	****	***	***	***	***	***
LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂	NCA	****	***	***	***	**	**
LiFePO ₄	LFP	**	****	***	****	****	***
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO	**	***	****	****	****	*

▲ Figure 7. Performances des batteries Li-ion. Source : Techniques de l'Ingénieur.

Les difficultés pour fabriquer les batteries au lithium, et réutiliser ses composés chimiques, rendent cependant le recyclage difficile. Ce sont là des freins à la mise en service de ce type de batterie.

Malgré tout, une réutilisation possible est actuellement envisageable en regroupant d'anciennes batteries afin de constituer des « unités de stockage statique » d'électricités destinées aux bâtiments dits écologiques ou à basse énergie et équipés de panneaux photovoltaïques.

À NOTER : le lithium étant considéré comme une matière dangereuse, (matière dangereuse de classe 9) il entraîne de nombreuses contraintes pour le transport, l'utilisation et le recyclage de batteries contenant ce composant.



▲ Figure 8. Symboles de la classification des matières dangereuses. Source : domformateur.com.

Précautions d'emplois des batteries Lithium

Bien que rares, les accidents liés aux batteries Lithium existent, et des précautions doivent être prises afin d'en limiter les dégâts.

Comme expliqué précédemment, le fonctionnement de ces batteries repose sur une réaction chimique interne. Toute réaction chimique possède une cinétique (i.e. une vitesse de réaction), qui dépend de plusieurs facteurs extérieurs, notamment de la température ambiante.

Plus la température augmente, plus la réaction sera rapide. Or la réaction est exothermique, c'est-à-dire qu'elle-même génère de la chaleur. On peut donc assister à un emballement thermique, qui peut entraîner l'enflamment de la batterie.

Cet incident détruit la batterie, certes, mais peut aussi représenter d'importants dangers pour les utilisateurs environnants. Si elle est en intérieur, son enflamment peut déclencher un incendie de plus grande ampleur. De plus, son emballement thermique puis sa combustion libèrent des gaz toxiques et irritants.

Heureusement, ces batteries sont conçues pour fonctionner en toute sécurité dans une plage de température déterminée. En cas d'échauffement, des systèmes de sécurités sont prévus au sein de la batterie pour évacuer le surplus de chaleur et empêcher l'emballement thermique. Parmi eux, on retrouve par exemple :

- des systèmes d'évacuation thermiques (évents...);
- des fusibles internes;
- des cartes électroniques de surveillance (BMS).

Malgré ces sécurités de conception, si la batterie est soumise à une température excessive (150 °C ou plus), il existe encore un risque d'accident. De même si la batterie est confinée, ce qui empêcherait l'évacuation thermique d'avoir lieu.

Enfin, la sécurité offerte par une batterie dépend évidemment de son prix. Tandis que les constructeurs de renom garantissent un certain niveau de sécurité, les batteries d'entrée de gamme ou de constructeurs peu connus ne respectent pas toujours ces normes.

Quoiqu'il en soit, en cas d'échauffement de la batterie, il est recommandé de la débrancher puis de s'en éloigner, et d'appeler les pompiers. Ces derniers ont reçu des formations spécifiques aux batteries, et savent intervenir en fonction du type de batterie.

2 ► INNOVATIONS ET AUTRES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

LA BATTERIE DU FUTUR

S'il est probable que les différents types de batteries Lithium-ion resteront à ce jour prédominant, les nombreuses recherches s'orientent, dans un futur proche, vers plusieurs axes d'évolutions :

- de nouveaux électrolytes (liquides ou solides);
- de nouveaux matériaux pour réaliser les électrodes;
- une miniaturisation des futures batteries.

Principales caractéristiques des technologies de batteries						
caractéristiques	Plomb-acide	Ni-Cd	Ni-MH	Lithium-ion LFP	Lithium-ion LMO	Lithium-ion LTO
Tension (V)	2,1	1,2	1,2	3,2	3,6	2,3
Énergie massique (Wh - kg ⁻¹)	30 à 40	40 à 60	50 à 80	100 à 150	140 à 250	50 à 80
Énergie volumique (Wh - L ⁻¹)	60 à 100	100 à 160	220 à 400	200 à 400	300 à 700	100 à 250
Puissance (Wh - kg ⁻¹)	700	700	1 000 à 1 500	1 000	700 à 2 000	1 000 à 2 000
Température en charge (°C)	- 20 à 50	- 40 à 60	- 30 à 60	0 à 50	0 à 50	- 20 à 50
Température en décharge (°C)	- 20 à 50	- 40 à 60	- 30 à 60	- 20 à 50	- 20 à 50	- 20 à 50
Sécurité	++	++	++	+	-	+

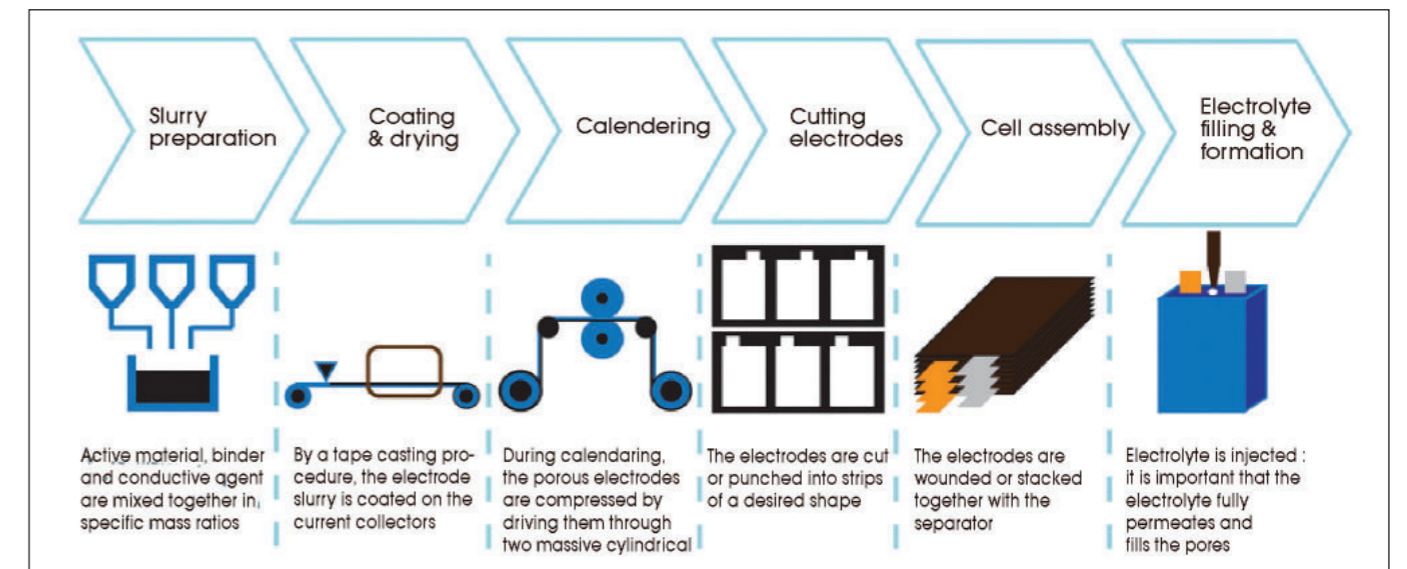
▲ Figure 9. Performances des batteries selon leur type. Source : Techniques de l'Ingénieur.

Le besoin d'améliorer leurs performances et une meilleure connaissance des mécanismes de fonctionnement chimiques feront certainement émerger de nouveaux types de batteries.

ÉVOLUTIONS

Étapes de fabrication

De nombreuses recherches sont orientées sur la réalisation des batteries et leur conception. L'innovation peut avoir lieu à chaque stade de développement.



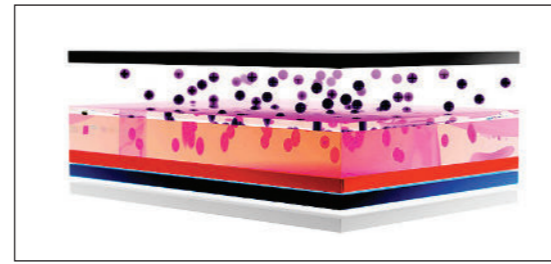
▲ Figure 10. Étapes de fabrication d'une batterie. Source : researchgate.net.

—■ L'électrolyte

Un industriel spécialisé dans les batteries de hautes technologies (SAFT) développe un nouveau programme de batteries dites lithium ion solides ou Li-ion.

Dans ce type de batterie, l'électrolyte liquide est remplacé par un composé inorganique solide qui améliore la diffusion des ions de Lithium. Placé entre les électrodes il assure la séparation et facilite le déplacement des ions.

Cette solution offre un avantage immédiat en matière de sécurité, permet d'améliorer la densité d'énergie, offre une plus longue durée de vie et une plus brève durée de recharge. Pour l'industrie automobile, ces batteries seraient une évolution vers plus de sécurité, plus de performance, et moins coûteuse à fabriquer (réduction de l'enveloppe), mais cette solution reste malgré tout difficile à concrétiser.



▲ Figure 11. Représentation SAFT.
Source : saftbatteries.com.

—■ Les nouvelles électrodes

Les principaux éléments limitant les performances d'une batterie sont ses électrodes. Actuellement celles-ci sont composées à l'aide de poudres à la médiocre conductivité électrique, thermique et ioniques.

Le couple sodium-ion

Cette solution apparaît comme une alternative plus éthique et surtout plus économique pour réaliser des électrodes plus performantes (faible coût du sodium). Ce type de batterie présente l'avantage d'avoir un cycle de charge rapide et ainsi de modifier en profondeur le paradigme technologique fixé aujourd'hui autour du modèle lithium-ion.

De telles batteries semblent principalement destinées à compléter les installations de production d'énergies renouvelables dans les bâtiments dits intelligents, mais aussi pour alimenter des engins destinés à la mobilité sur de faibles distances.

Une première application a été réalisée et intégrée dans des trottinettes et des scooters électriques.

Un autre couple : le lithium-soufre (Li-S)

Après des études en Allemagne, ce couple est en cours de mise au point par des chercheurs australiens et semble être une solution prometteuse pour réaliser des électrodes plus performantes.

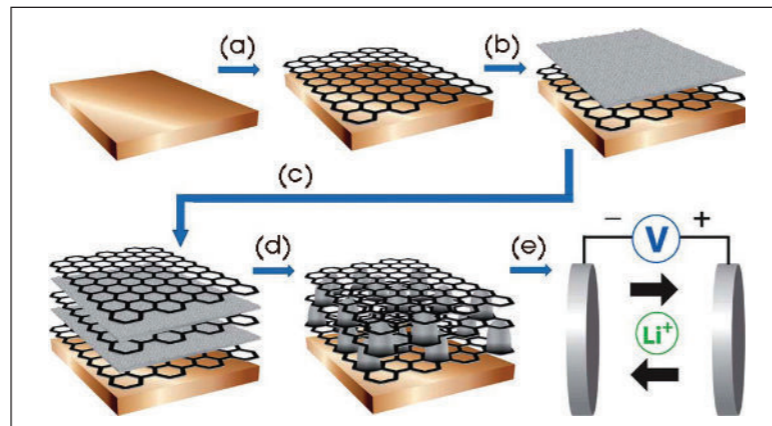
Ce type de batterie à haute capacité, malgré des problèmes portant sur le comportement de la cathode en Soufre, pourrait conduire à une fabrication plus facile de batteries plus puissantes et surtout moins chères à produire. (Coût du soufre).

Ce type de batteries semblerait parfaitement adapté à des applications de l'industrie aéronautique ou spatiale, ainsi que pour des dispositifs de stockage d'énergie.

Le lithium-ion et Le graphène

L'utilisation du graphène est un autre exemple de l'évolution de la composition des électrodes des batteries lithium-Li-ion permettant ainsi d'en booster les performances. Les recherches sur l'emploi de cet élément ont été initiées par la firme SAMSUNG dans le but immédiat d'augmenter l'autonomie de ses téléphones portables.

Dans cette batterie l'électrode négative en graphite est recouverte d'une fine couche de graphène et la composition de l'électrolyte est modifiée.



▲ Figure 12. Schéma d'assemblage d'une batterie au graphène.
Source : Techniques de l'Ingénieur.

Ces modifications permettent une meilleure conductivité de l'énergie électrique, et en même temps de réduire l'échauffement de la batterie en charge.

C'est donc à la fois une évolution des performances énergétiques et de la sécurité tout en espérant une longévité record de la batterie. (Temps de recharge divisé par cinq et densité énergétique doublée).

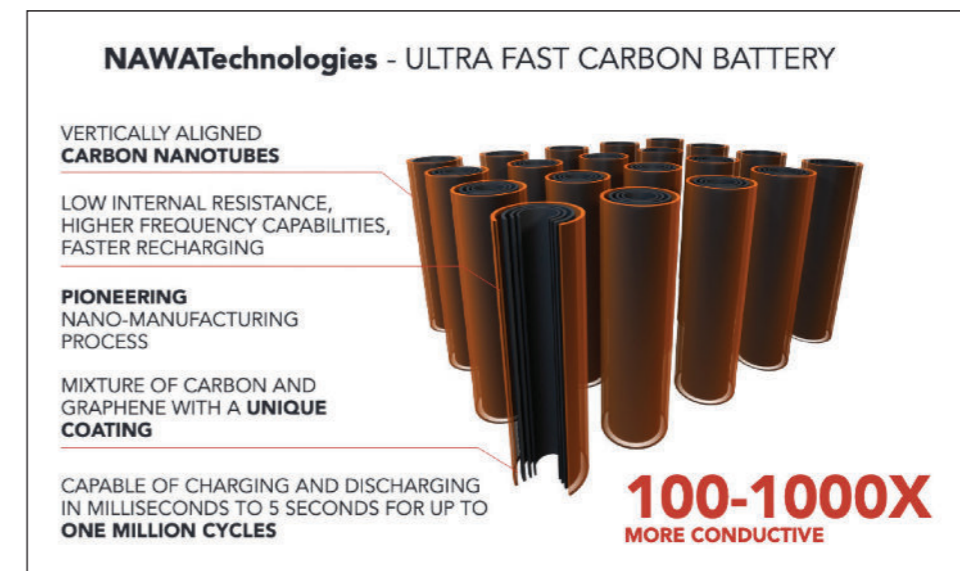
Cependant le graphène est un matériau cher et très complexe à produire, ce qui selon les premières estimations devrait renchérir le prix des batteries d'environ 30 %. La commercialisation de telles batteries ne peut donc être envisagée que si les méthodes de fabrication donnent des résultats stables et reproductibles.

Dans l'immédiat, c'est donc une application principalement destinée à la téléphonie mobile, sachant que dans un futur plus ou moins proche la mise en service de la technologie « 5G » va certainement entraîner une croissance du trafic des téléphones et autres « objets connectés ».

À plus ou moins longue échéance, l'augmentation de performances de ce type de batteries lithium-ion pourrait se reporter sur des applications destinées en particulier aux véhicules électriques.

—■ Une nouvelle électrode pour les futures batteries

Une société française spécialisée dans la conception de systèmes de stockage de l'énergie (NAVA Technologies) a donc imaginé un nouveau type d'électrode constituée par des milliards de nanotubes en carbone par centimètre carré et alignés verticalement. C'est « l'Ultra Fast Carbone Electrode ».



▲ Figure 13. Publicité Ultra Fast Carbone Electrode. Source : nawatechnologies.com.

Cette technologie augmente spectaculairement la conductivité des électrodes, offrant ainsi une densité de l'énergie multipliée par trois, une puissance multipliée par dix et une durée de vie jusqu'à cinq fois supérieure.

En même temps la durée de charge sera très sérieusement réduite. (On parle alors de minutes et non plus d'heures de charge).

Cette électrode pourrait être utilisée avec les différents matériaux existants pour les batteries actuelles ou avec les matériaux des futures générations de batteries.

De plus cette technologie d'électrode est facilement recyclable à la fin de sa vie, réduisant ainsi l'impact sur l'environnement de près de 60 % lors de la construction d'une batterie.

Cette application, si elle s'avère économique et facile à mettre en œuvre, pourrait donc avoir rapidement un sérieux impact sur l'évolution des batteries des systèmes de transports non polluants (en outre pour les véhicules autonomes ou les avions électriques), et entraîner des déclinaisons industrielles pour les nombreuses applications fonctionnant sur batteries.

Actuellement en développement, cette technologie ne sera pas mise en production avant les années 2023-2025 et sera dès le départ destinée à l'industrie automobile. (Dans une voiture électrique la batterie représente environ 30 % du coût du véhicule). On pourrait ainsi avoir des véhicules électriques ayant une autonomie d'environ 1 000 km sans recharge.

— La miniaturisation

Les batteries entrent, elles aussi, dans la course à la miniaturisation. Le développement des objets connectés nécessite la réduction des dimensions pour l'intégration de batteries de taille microscopique.

Les structures classiques des électrodes d'une batterie actuelles n'ont jamais été pensées pour des applications miniatures. Leurs dimensions, donc la surface de contact entre électrodes et électrolyte, influent sur les performances d'une batterie. La réduction de la surface de contact entraîne la chute des performances de la batterie. (Stockage de l'énergie, puissance).

La miniaturisation d'une batterie nécessite donc la modification de la structure classique des électrodes d'une batterie, (habituellement en 2D) vers une structure en 3D, ce qui entraîne une augmentation considérable de la surface de contact. Grâce à l'holographie (méthode de photographie en relief) couplée à une architecture appelée « en colonne ou tubulaire » il devient possible de construire des batteries Lithium-ion de très faibles dimensions (quelques millimètres carrés).

Pouvant être intégrées dans une « puce électronique cette technologie, qui est compatible avec les standards de la fabrication de la micro-électronique et des composants électroniques, devrait permettre une reproduction en grande série de ce type de batterie.

Des accords sont en cours de négociation entre différents constructeurs automobiles européens pour la réalisation d'un « Airbus des batteries » afin de retrouver une certaine maîtrise de ces nouvelles technologies à ce jour, largement dominé par industriels asiatiques (Chinois, Coréens, Japonais) et américains.

À ces projets, il faut ajouter celui du constructeur américain TESLA qui a commencé, en Allemagne, la construction d'une usine pour ses productions européennes

Des sites industriels sont donc en cours de développement en Europe. Malgré cela seuls 10 % à 15 % des besoins européens seront assurés.

Les différentes solutions prometteuses actuellement en développement devraient en priorité être appliquées au marché des batteries destinées aux divers véhicules électriques afin d'aider cette industrie à se développer.

Le frein principal de ce marché, il faut le rappeler, est actuellement le prix de vente, le manque d'autonomie des véhicules et surtout la faible quantité des stations de recharge.

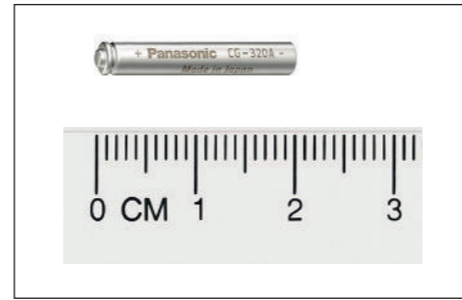
À noter que cette situation peut paraître logique, car il faut se rappeler qu'il a fallu près de cent ans pour mettre en place le réseau de distribution des carburants des véhicules thermiques actuels.

AUTRES SOLUTIONS POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

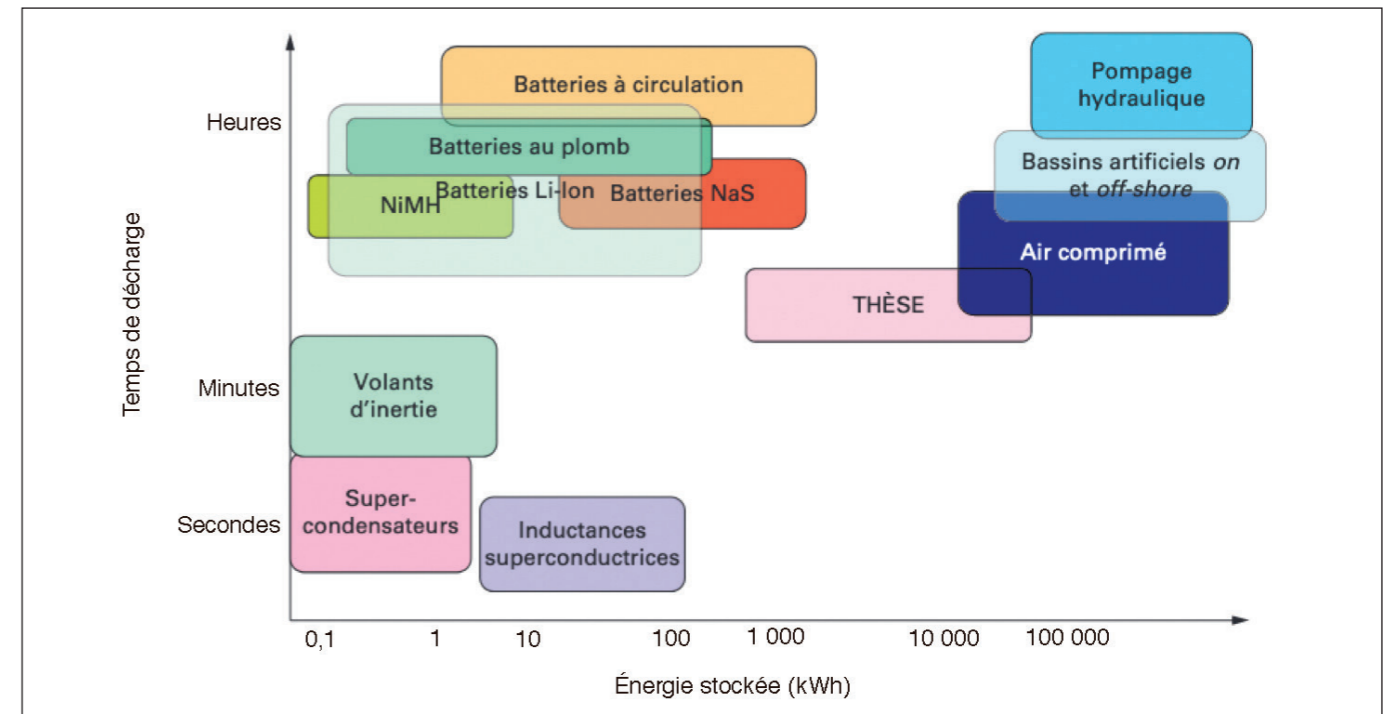
Le stockage stationnaire de l'énergie électrique est aussi une cible des systèmes à batteries. Reliées aux sources de production de l'électricité, ce sont des solutions de destinées à stocker de l'énergie pour compenser rapidement les variations de la demande de consommation d'un réseau de distribution.

Différentes solutions permettent un stockage important d'énergie :

- Soit par des solutions techniques hydroélectriques à retenue ou chute d'eau (barrage) ;
- Soit par des systèmes de production d'électricité à stockage à air comprimé, ou encore des systèmes thermiques classiques (turbine à gaz).



▲ Figure 14. Exemple d'une pile miniaturisée. Source : industry.panasonic.eu.



▲ Figure 15. Comparatif des performances de différentes technologies de stockage d'énergie. Source : Techniques de l'Ingénieur.

Elles sont toutes actuellement plus ou moins à l'état de prototype ou de petites séries, mais de plus gros projets sont en cours comme chez Phenix Batteries (SNAM). Ces solutions sont complétées depuis quelques années par des solutions électrochimiques permettant un stockage important de l'énergie électriques.

— La batterie à écoulement

Cette solution électrochimique fait donc appel à un système de batteries appelés « batterie à écoulement » ou encore « à circulation » fonctionnant selon le même principe que les batteries classiques, c'est-à-dire par une oxydation et une réaction au niveau de chaque électrode.

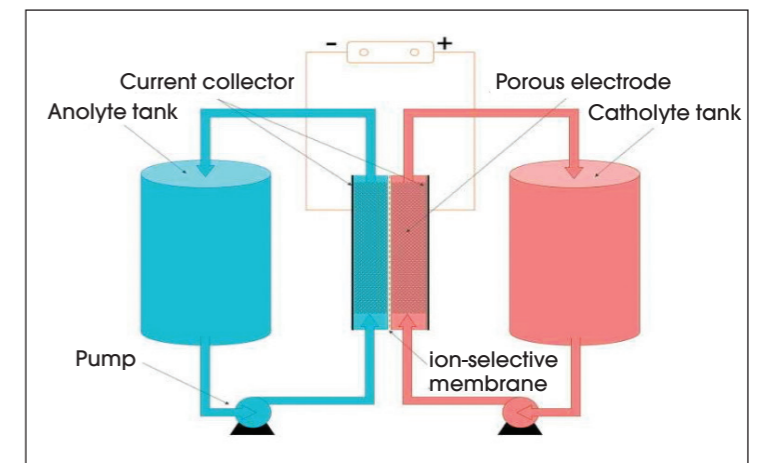
Mais elles présentent plusieurs particularités :

- les deux électrodes sont réalisées sous la forme de deux demi-cellules étanches (une demi-cellule par électrode) séparées par une membrane échangeuse ;
- l'électrolyte de chaque demi-cellule est composé de réactifs en solution circulant dans les deux demi-cellules ;
- des pompes assurent la circulation de ces électrolytes afin de renouveler chaque réactif à la surface des électrodes correspondantes, mais aussi pour en limiter l'échauffement.

La réalisation de ces électrolytes est obtenue par un mélange liquide à base de différents matériaux. Les électrodes des demi-cellules sont à base de matériaux carbonés combinés avec du sodium, du potassium, un mélange sodium/brome, ou vanadium/brome, ou znc/brome ou vanadium.

Le Brome est un élément chimique neurotoxique et perturbateur endocrinien. Connu et utilisé comme désinfectant dans les eaux de piscine ou comme retardateur de flammes dans la composition d'isolants, ou encore comme sédatif et anti-convulsant, c'est un produit particulièrement toxique à manier avec précaution.

Les électrodes à base de vanadium restent à ce jour la technologie la plus avancée. Les installations utilisant ces systèmes de batteries à circulation d'électrolyte restent donc très complexes à mettre en œuvre. Elles nécessitent un haut niveau d'expertise technique.



▲ Figure 16. Schéma d'une pile à écoulement.

Elles n'ont pour l'instant aucune chance de diffusion pour des activités « grand-public ». Cependant, à terme, elles peuvent connaître un développement pour le stockage massif de l'énergie électrique pour des réseaux d'énergie.

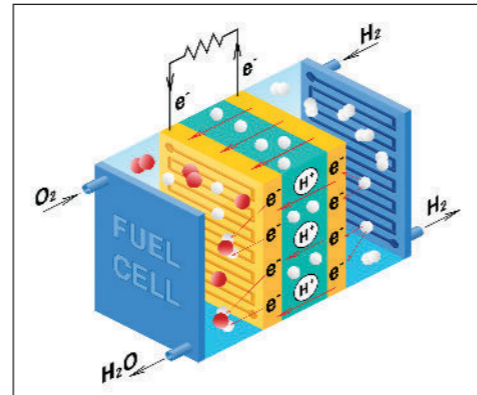
Une autre solution est déjà en cours d'industrialisation et semble être plus facilement adaptable à des installations à plus grande diffusion : la pile à combustible.

—■ La pile à combustible

Comme les autres batteries, une pile à combustible est un générateur, qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

Pour ce type de batterie, l'Hydrogène est le combustible, l'oxygène qui provient de l'air ambiant sert de comburant, car c'est à la fois un bon conducteur ionique et un isolant.

Une pile à combustible est constituée de cellules unitaires, chaque cellule ayant deux électrodes séparées par un électrolyte. L'anode est alimentée par le combustible stocké à l'extérieur de la pile ; la cathode reçoit de l'extérieur un oxydant, l'oxygène de l'air. L'électrolyte entraîne l'oxydation qui libère les électrons générant un courant électrique.



▲ Figure 17. Schéma d'une pile à combustible. Source : airbus.com.

Mais ce type de pile nécessite la production de l'Hydrogène, car celui-ci est rarement présent sous la forme de molécules stables. Une pile à Hydrogène ne peut donc pas fonctionner seule ; il faut au moins l'intégrer au sein d'un système composé par les équipements indispensables pour le stockage de l'Hydrogène et pour la production de l'énergie électrique.

La production d'Hydrogène par électrolyse de l'eau est la solution de production la plus facile ; de plus elle répond favorablement au respect de l'environnement. (Ne rejette que de la vapeur d'eau).

Mais elle n'est économiquement viable que si l'électricité nécessaire à sa production est de source « renouvelable » (panneaux photovoltaïques ou éolienne).

De plus, de nombreuses contraintes sécuritaires nécessitent de créer les infrastructures spécifiques de stockage et de distribution parfaitement sécurisées, et aussi de prévoir la formation du personnel.

Actuellement 90 % de la production d'hydrogène utilisée dans l'industrie est toujours une production dite « Grise » ou « Sale » car elle entraîne une forte émission de CO₂ pour sa production.

Il faut aussi prendre en compte qu'une telle pile est destinée à alimenter des équipements nécessitant une énergie bien définie. Il est donc nécessaire de prévoir, avec la pile, les équipements complémentaires produisant :

- soit du courant alternatif monophasé ou triphasé de haut voltage et de puissance entre 120 v et 380 v. (onduleur spécifique) ;
- soit du courant continu de puissance et d'une valeur bien définie. (48 v ou plus)

Les premiers secteurs concernés par de tels « groupes électrogènes » sont l'alimentation des sites isolés non raccordés au réseau local d'énergie (relais de télécoms isolés, lieux de tournage, etc.).

L'intérêt de tels systèmes sera accru s'il est possible de fabriquer localement l'hydrogène. (Panneaux photovoltaïques) Une autre application peut être destinée à l'alimentation de réseaux de distribution, ou à la génération de l'énergie pour des bâtiments dits écologiques.

L'utilisation comme source d'énergie pour des véhicules de transport est un autre axe de développement prometteur (Taxi, autobus, camion, train).

Mais cela nécessite toujours la mise en place d'un site de production d'hydrogène, avec les équipements de stockage et éventuellement de transfert de l'hydrogène vers l'utilisateur.

Déjà utilisée dans pour l'industrie spatiale, et pour certaines activités militaires, ces nouvelles sources de production et de stockage de l'énergie électrique vont imposer le développement de nouveaux systèmes techniques, performants et durables, de nouvelles infrastructures de distribution ainsi que l'acquisition de nouvelles compétences et rendre la formation des techniciens et des personnels spécialisés indispensables pour faire face à ces nouveaux enjeux industriels.

Le mode de production de l'hydrogène (avec toutes ses contraintes de stockage et de sécurité) reste donc le facteur principal pour évaluer l'intérêt économique d'une telle solution énergétique.

3 ► RÉGLEMENTATIONS LIÉES AUX BATTERIES

RÉGLEMENTATIONS

—■ Usages et Fabrication

Usage

L'usage des batteries est divisé en deux catégories, bien définies :

- Les batteries délivrant une tension inférieure à 75 volts qui sont réglementées par la directive dite « BASSE TENSION » référence 2014/35/UE, accompagnées par la norme EN 60335-2-29 pour la réglementation des chargeurs de batteries ;

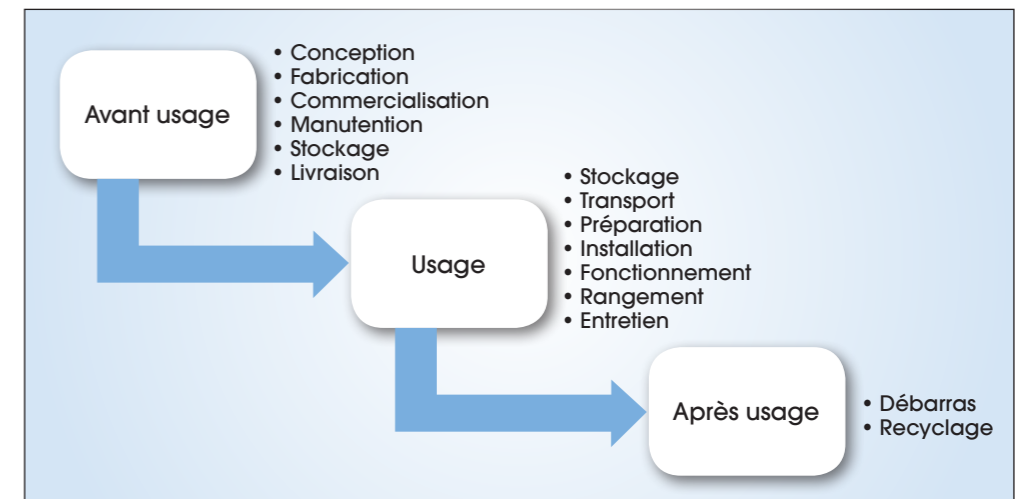
- Les batteries pouvant fonctionner dans un environnement électromagnétique élevé, en particulier pour celles contenant des circuits de gestion interne de la charge /décharge des cellules, norme référence 2014/30/UE accompagnée par les normes harmonisées IEC 55014 - 1 et 2 pour les chargeurs de batteries au lithium.

De ces normes découle, spécifiquement pour les batteries au LITHIUM, une autre série de réglementations complémentaires à appliquer concernant en particulier le transport.

Fabrication

Comme d'autres produits industriels, les batteries (mais aussi les piles) sont des composants générateurs d'énergie susceptibles de créer des situations de dangers. (Incendie, explosion, chaleur).

Dans toutes les étapes de leur vie les batteries, et en particulier quand le lithium est un de leur composant, sont donc soumises à différentes législations (Construction, utilisation, transport et recyclage).



▲ Figure 18. Étapes de vie d'une batterie.

Il faut rappeler que le lithium est considéré comme une « matière dangereuse » de la classe 9. (Soit « marchandise dangereuse diverse »)

Toute une série de normes et réglementations (qui peuvent être plus ou moins différentes d'un pays à un autre) ont été développées au sein de la CE et à l'international pour renforcer la sécurité d'utilisation des différentes batteries.

Normes de fabrication

Ces principales réglementations sont :

- IEC 60086-1 qui concerne les normes de fabrication des piles et batteries ;
- EC 62133-3 qui concerne les exigences de sécurité des piles et batteries, (Tests électriques, mécaniques, comportements environnementaux) ;
- IEC 61960 qui concerne les performances des différents types de batteries ;
- IEC 62281 qui concerne les principales normes de sécurité pour le transport ;
- La directive Européenne IEC 2006/66/CE précise les restrictions ou interdictions d'utilisation de certains métaux pour la construction et l'utilisation des piles et batteries (restriction de l'utilisation du mercure et du cadmium, marquage et conditions de recyclage).

Du fait des risques que présente l'intégration d'une batterie dans un matériel :

- par l'usage de produits chimiques et des métaux rares utilisés pour sa fabrication ;
- selon les conditions de son stockage et de son transport ;
- selon les conditions de son exploitation, de son recyclage et sa destruction, l'ensemble de ces batteries doit impérativement présenter un marquage extérieur « CE », ainsi qu'une numérotation à 4 chiffres dite « NATIONS UNIES » utilisée pour le commerce international.

Cette Étiquette de marquage est obligatoire depuis le 01-01-2019.

Ce marquage permet de retrouver le numéro des NATIONS UNIES, (utile pour les transactions commerciales) et un numéro de téléphone pour obtenir les informations complémentaires concernant la batterie marquée.

Attention : les batteries étant souvent des assemblages de cellules, la conformité aux normes d'une batterie nécessite la conformité de chaque cellule ainsi que la conformité de l'assemblage de celles-ci.



▲ Figure 19. Symbole des produits corrosifs.

— Conditions d'utilisation

Les piles et batteries sont le lieu d'une réaction chimique toxique et corrosive, et ce quel que soit la technologie employée.

Cela entraîne donc qu'un certain nombre de précautions et de contraintes à respecter tant pour la première charge d'une batterie, que pour son entretien, son stockage et son transport.

Quel que soit donc le type de batterie utilisé, il faudra donc respecter les principes de bases sécuritaires pour la première charge de votre batterie.

Celle-ci ayant un impact sur sa durée de vie, il faudra donc veiller à effectuer une charge complète avant sa mise en service.

Pour réaliser cette première charge :

- vérifier sa date de fabrication (doit être inférieure de 15 à 18 mois à la date de charge) et sa tension aux bornes (plus de 12.2 v pour une batterie de 12v) ;
- vérifier la propreté et le bon état des connexions externes ;
- installer le lieu de charge dans un local bien ventilé et dont la température ambiante est de l'ordre de 20° centigrades ;
- s'assurer que ce local ne présente pas de risque d'incendie (pas de matières inflammables à proximité) et qu'il est bien ventilé ;
- bien utiliser le chargeur adapté au type de batterie.

On veillera à respecter le courant et le temps de charge conseillés par le fournisseur, ces paramètres étant dépendant de la technologie et du type de batterie.

Les batteries utilisant la technologie plomb-acide (avec un électrolyte liquide) nécessite une vérification du niveau de celui-ci, et éventuellement de réaliser régulièrement un complément du niveau de celui-ci.

— Règlementation du transport (batterie au lithium)

Les principales associations et organisations mondiales qui ont défini les principales normes de transport sont nombreuses et diverses :

- IATA : International Air Transport Association ;
- IACO : International Civil Aviation Organisation ;
- DOT: US Department of Transport ;
- UN : United Nations ;
- FAA: Federal Aviation Administration ;
- IMDG: International Maritime Dangerous Goods ;
- RID: Regulation concerning the international Carriage of Dangerous Goods by Rail ;
- AND: International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways ;
- ADR: European Agreement – International Carriage of Dangerous Goods by Road.

Les accords internationaux sur le transport des matières dangereuses réglementent donc tous les types de transport concernant les piles et batteries au LITHIUM ainsi que les conditions d'emballage pour les transports.

En plus de la norme générale européenne IEC 62281 de 2012 (similaire à la norme US 38.3) les différents opérateurs de transport appliquent leurs propres normes pour :

Le transport routier

Les batteries au lithium sont soumises aux accords Européen dits « Accord ADR » de janvier 2019, cela en application du « Manuel d'épreuves et des critères » du Chapitre « Réglementation des transports routiers. UN38.3 (origine US) ».

Le transport par avion

Dans ce cas c'est l'organisation de l'aviation civile internationale qui impose le guide IATA et plus spécialement le « Lithium Battery Shipping Guidelines » (LBSG).

Se référer aussi au site internet d'AIR France / « Conditions de transport des piles et batteries au lithium ».

Le transport maritime

Pour ce type de transport il faudra se rapporter au code IMDG publié par l'organisation Maritime internationale. Devant ces nombreuses contraintes administratives, régulièrement mises à jour par les différents états, il est donc fortement conseillé, en cas de déplacement hors des frontières de l'hexagone, de confier le transport de ce type de batteries à des transitaires spécialisés dans le transport de matières dangereuses.

À noter :

- le transport routier des batteries est considéré comme étant la solution de transport la moins sûre car non protégée vis-à-vis des agressions extérieures ou des intempéries ;
- Les dispositions de transport pour une batterie avec ou dans un équipement peuvent être plus souple, en fonction de la quantité, cela étant dépendant d'un « seuil d'exemption » des produits dangereux à transporter, dont la liste et les règles sont variées et évolutives selon les états... (informations précises sur le site de la Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies – UNECE) ;
- En fonction de la destination d'autres conditions de transport des batteries peuvent être appliquées par chaque état (divergence état-exploitant ...) ;
- Les personnels chargés de la préparation au transport doivent avoir suivi un stage de formation afin d'effectuer cette préparation selon les exigences de la législation du transport des matières dangereuses ;
- Dans le cas d'importation et d'intégration d'une batterie dans un équipement, il faudra s'assurer que celle-ci est bien conforme à la réglementation pour que l'ensemble équipement / batterie soit considéré comme conforme à la réglementation locale.

C'est donc à l'importateur et/ou au fabricant de vérifier et de s'assurer de la conformité de l'ensemble de ces obligations réglementaires s'appliquant pour le transport des marchandises neuves.

— Débaras des batteries usagées

Comme indiqué précédemment, les batteries, notamment celles composées de lithium, comportent des substances rares et très polluantes pour l'environnement si leur mise au débris n'est pas réalisée selon une procédure stricte.

Principe de la REP et modèle de Batribox

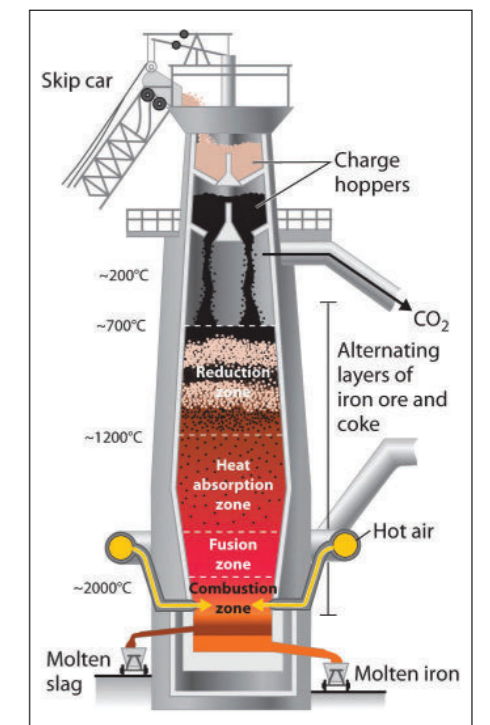
La REP (Responsabilité Élargie du Producteur) engage le producteur de produits électroniques (ici, les batteries) à inclure dans son prix de vente une somme qui permettra de financer la fin de vie du produit (récupération, tri, recyclage). Elle peut être DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) ou P&AP (Piles et Accumulateurs Portables).

L'éco-contribution vise à financer les éco-organismes, entreprises privées à but non lucratif telles que Srelec. Cet éco-organisme est agréé par les Pouvoirs Publics sur la filière Piles et accumulateurs portables. Srelec collecte par l'intermédiaire de sa solution Batribox.

Procédés de recyclages selon technologies

Le recyclage des batteries a majoritairement lieu selon deux procédés : la pyrométallurgie ou l'hydrométallurgie. Dans le premier cas, les métaux entrent en fusion et sont séparés par différence de densité.

Dans l'autre, la séparation a lieu grâce à des acides qui séparent les



▲ Figure 20. Séparation par différence de densité. Source : chem.libretexts.org.

différents composants, avec une meilleure précision que la pyrométallurgie. C'est pourquoi ce deuxième procédé est préféré pour les batteries Lithium, composées de fines couches de matériaux superposées.

Efficiences du recyclage

La technique de recyclage dépend donc de la technologie de batterie traitée, mais reste la même quelle que soit la taille de la batterie. Toutes méthodes et technologies confondues, environ 75 % des composants des piles sont recyclés, pour 25 % éliminés au cours du traitement. Certaines technologies se recyclent plus facilement et à moindre coût, comme l'acide/plomb. Le lithium est, quant à lui, plus cher à recycler, en demandant environ 3000 € par tonnes recyclées.

Collecte des batteries usagées

Certaines de ces sociétés proposent des points de collectes répartis sur l'ensemble du territoire français, dans lesquels les consommateurs de petites batteries peuvent venir déposer leurs piles usagées, une fois qu'ils estiment que l'autonomie est insuffisante. Certaines entreprises peuvent même se charger de récupérer elles-mêmes les déchets, sous condition d'une charge minimum à enlever.

Responsabilité du loueur de batteries

Pour ce qui est du cinéma, le matériel est souvent loué puis rendu à la fin du tournage. C'est alors le loueur qui juge de l'état du matériel qui lui revient, que ce soit pour l'esthétique ou les performances. S'il juge que l'autonomie de la batterie n'est plus suffisante, c'est à lui de contacter un organisme de collecte, ou alors directement les centres de traitement, pour enclencher le recyclage.

Précautions de recyclage

Les batteries, même en fin de vie, doivent être manipulées avec autant de précautions que lors de leur usage. Il faut éviter à tout prix les chocs et températures extrêmes. De plus, certaines technologies comme le lithium demandent des précautions de transport. Elles doivent être empilées avec un isolant spécifique, la vermiculite, afin d'éviter les départs de feu en cas de gonflement des batteries usagées.

Alternatives au recyclage : réemploi et régénération

La fin de vie d'une batterie ne signifie pas forcément recyclage. En effet, ce procédé coûteux et partiellement destructeur n'est à considérer qu'en dernier lieu. Avant cela, la batterie vieillit progressivement, perd en performance, mais reste utilisable. Une batterie dimensionnée pour de l'éclairage sur un plateau pourra donc resservir pour une utilisation moins énergivore, comme la prise de son : on parle de réemploi. Il est aussi possible de régénérer certaines batteries, sans pour autant les recycler totalement.



▲ Figure 21. Exemple de cartographie des centres de tri de batterie. Source : corepile.fr.

Législation du recyclage des batteries

Au niveau législatif, le gouvernement français a mis en place plusieurs lois qui assurent la bonne gestion des piles usagées :

- les distributeurs, détaillants ou grossistes, ont l'obligation de reprendre gratuitement les piles ou accumulateurs usagés et de les mettre à la disposition des filières de recyclage (décret n°99-374 du 12 mai 1999 et arrêté du 26 juin 2001) ;
- les fabricants et importateurs de batteries ont l'obligation de récupérer et d'éliminer les piles et accumulateurs en fin de vie, et de communiquer leur démarche au ministère de l'Écologie et du Développement Durable ;
- les utilisateurs professionnels doivent assurer, après usage, le recyclage des piles et des accumulateurs qu'ils utilisent.

Attention : le code de l'environnement prévoit un statut spécial pour le transport des batteries usagées, (cas du retour au fabricant) celles-ci étant alors considérées comme « un déchet dangereux ».

Ne pas oublier que l'utilisateur de batteries est le seul responsable, le fabricant et le distributeur ne pouvant contrôler la bonne utilisation de leurs matériels.

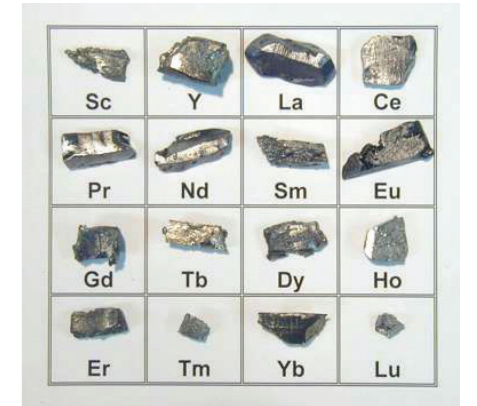
4 ► ENJEUX EXTERNES ET SECTEURS D'ACTIVITÉS

LES MÉTAUX RARES

Depuis les années 1970, le besoin en ressources énergétiques augmentant, la volonté politique de réduire les bouleversements climatiques probablement générés par l'usage des énergies fossiles, a entraîné une orientation des recherches vers de nouveaux moyens de production des énergies, et en particulier ceux des systèmes de stockage de l'énergie électrique.

Ces recherches ont permis de découvrir et de tirer parti des différentes propriétés de certains « métaux dits rares » permettant par leur intégration d'améliorer les performances des batteries. (Propriétés chimiques, catalytiques, magnétiques, et même optiques).

Mais ces métaux ne sont disponibles qu'associés en quantité infime aux classiques métaux abondants. Pour obtenir environ 15 tonnes d'un métal rare il faut traiter plus de 1500 tonnes de métaux classiques. Les difficultés de leur production en font donc des matériaux très chers à produire.



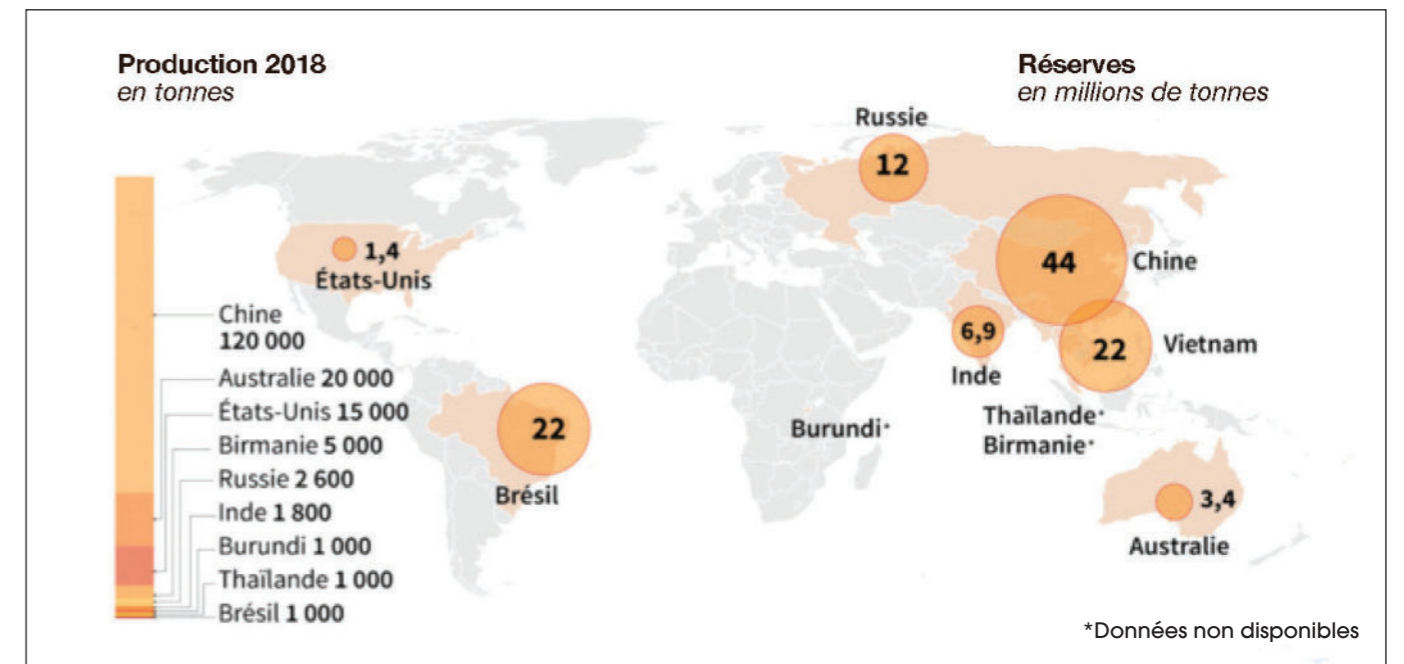
▲ Figure 22. Exemples de métaux rares. Source : specialtymetals.com.

Ces métaux sont surtout présents en Afrique, en Russie, aux États-Unis, en Amérique du Sud et en Chine.

Malgré la volonté des autorités européennes de développer et favoriser une fabrication locale, l'industrialisation des différents types de batteries utilisant ces métaux reste, à ce jour, largement dominé par industriels asiatiques (Chinois, Coréens, Japonais) et américains.

Et cela principalement pour des raisons économiques, les « métaux dits rares » sont donc actuellement très souvent travaillés et obtenus dans la zone géographique de leur extraction.

Le coût de la main d'œuvre, les contraintes environnementales et législatives, les obligations de recyclage parfois difficiles de certains composants des batteries sont des éléments qui expliquent partiellement, à ce jour, que cette fabrication soit principalement délocalisée hors de l'Europe.



▲ Figure 23. Carte mondiale des productions et réserves de métaux rares (2018). Source : impact.sn.

Ce besoin de « métaux rares », qui augmente régulièrement, modifie donc les relations internationales et commerciales, entraînant l'apparition d'un quasi-monopole de production. Ces facteurs géopolitiques peuvent donc influencer le niveau de production.

L'Union Européenne, bien que possédant la main d'œuvre la plus qualifiée, ne fabrique que 3 % de cette production. Si les réserves des sous-sols européens semblent malgré tout prometteuses, leurs exploitations risquent d'être bloquées par une certaine « Conscience écologique » des citoyens Européens effrayés par l'impact de cette production sur l'environnement.

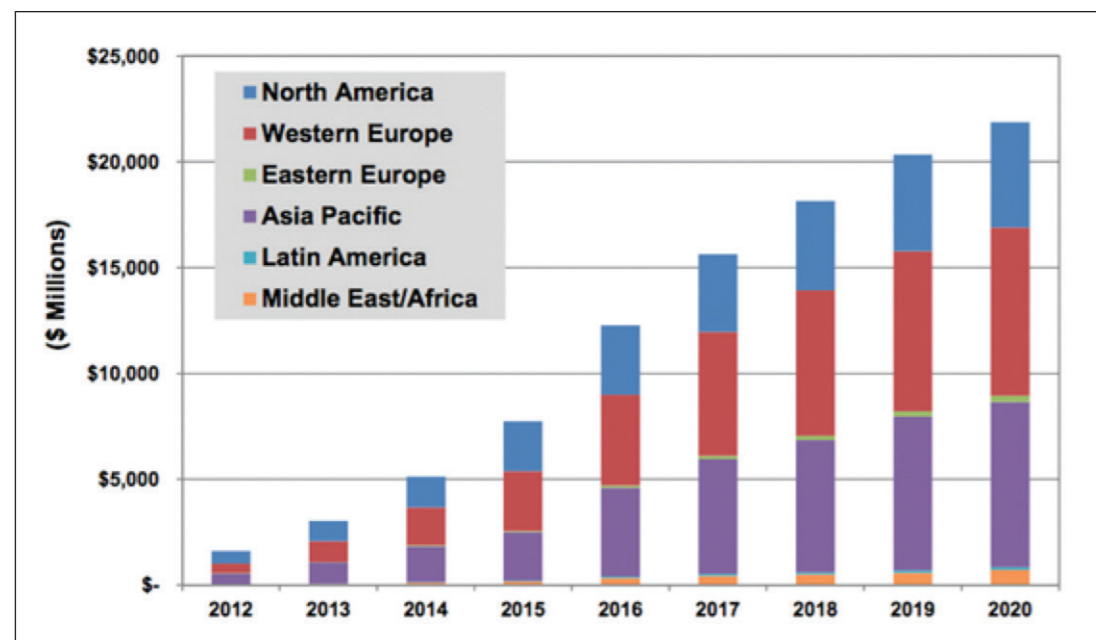
Une étude du « BOSTON CONSULTING GROUP » estime que pour 2025 environ 25 % des véhicules vendus dans le monde seront électriques ou hybrides, donc équipés de batteries pour leur propulsion.

Il faut aussi noter que les pays où le volume et la pénétration du marché des batteries ont le plus augmenté, correspondent aux pays qui ont mis en œuvre des politiques de soutien les plus volontaristes pour le développement des véhicules électriques (chine, Norvège).

Les dernières décisions du pouvoir politique pour favoriser la progression du marché des véhicules électriques et le développement d'infrastructures de recharge pour ce type de véhicule seront peut-être les éléments qui feront basculer la situation actuelle, et favoriseront une industrialisation locale et européenne des batteries.

LE MARCHÉ DE LA BATTERIE

C'est un marché globalement en croissance et en perpétuelle évolution aussi bien commerciale que technique. On peut donc distinguer plusieurs groupes d'applications de ce marché qui se caractérise par des dynamiques variables selon les familles d'applications.



▲ Figure 24. Revenus mondiaux générés par le marché des batteries Li-ion. Source : avem.fr.

—■ Applications « stationnaires secours »

Les principaux utilisateurs sont les industriels et certains professionnels (sécurité, contrôle). Les technologies Plomb/Acide et Ni-Cd dominent ; la facilité d'utilisation, la fiabilité et le prix sont les principaux critères de sélection.

La croissance est comparable à la croissance moyenne mondiale du secteur industriel.

—■ Application « stationnaire en cyclage »

Les applications de ce secteur concernent en grande majorité le stockage pour des systèmes ou des réseaux de production de l'énergie électrique.

C'est un secteur en pleine croissance où les batteries (technologies plomb/acide) sont encore privilégiées pour des raisons de facilité d'utilisation et de prix.

L'arrivée et l'utilisation sur ce marché de batteries Li-ion « en seconde vie » pourrait favoriser l'émergence de cette technologie. Sur de récents projets, sa part du marché s'est établie à 90 %.

Les systèmes de stockage de grande capacité (plus de 1 MW) utilisant les batteries à circulations, ou des piles à combustibles, sont des technologies nouvelles de stockage électrochimiques plus adaptées et actuellement émergentes.

—■ Applications « Mobiles pour équipements portables »

Les applications mobiles comme la téléphonie et l'informatique utilisent en grande majorité la technologie Li-ion.

La croissance de ce secteur semble marquer le pas depuis quelques années, tout en représentant environ 35 % du marché global des batteries.

—■ Applications « Mobiles pour équipements de secours »

Les dispositifs de secours dans le secteur des transports, ainsi que les matériels médicaux utilisent principalement les technologies plomb/acide et Ni-Cd.

C'est encore la fiabilité, la robustesse et la sécurité qui sont des éléments déterminants de ce choix et rendent ce marché stable.

Pour les applications mobiles de petite taille, les nouveaux dispositifs médicaux portables et certaines applications de contrôle la technologie Li-ion, est maintenant utilisée majoritairement.

—■ Applications « Mobiles pour équipements autonomes »

Ce secteur qui regroupe les systèmes d'instrumentation en milieux industriels, le commerce, certains dispositifs médicaux et l'outillage sans fils, utilise principalement la technologie Li-ion. Il est également en croissance.

En résumé si le marché des batteries est en croissance depuis ces vingt dernières années, des incertitudes demeurent sur l'évolution des matières utilisées pour répondre à cette demande, le coût de ces matières premières, l'adaptation des différentes réglementations industrielles et environnementales et bien sûr le développement des activités de réemploi et de recyclage des batteries usagées.

5 ► BESOINS SPÉCIFIQUES AU CINÉMA POUR LES BATTERIES

QUELS BESOINS POUR LE CINÉMA ?

Après avoir détaillé les différentes technologies existantes et futures dans le secteur du stockage d'énergie, il est nécessaire de redéfinir le cadre d'étude. Si le cinéma est un bénéficiaire de ces technologies, elles n'ont pas été spécialement conçues pour des besoins audiovisuels.

Il faut donc identifier les contraintes spécifiques à chaque tournage pour décider quelle technologie de batterie serait optimale.

—■ Pourquoi utiliser des batteries ?

L'usage de batteries pour alimenter la machinerie du cinéma n'est pas récent. Il permet aux équipes de ne pas être tributaires d'un réseau électrique mural. Cela est évidemment pratique pour les tournages extérieurs, mais aussi pour les locations exigües ou présentant un réseau électrique limité / difficile d'accès.

Les batteries répondent donc à un besoin d'indépendance de la part des équipes de tournage. Qualitativement, cela signifie que leur encombrement doit être minime, et leur autonomie électrique maximale.

—■ La diversité du matériel et des lieux

Chaque corps de métiers composant une équipe de tournage nécessite un apport électrique. Les batteries doivent donc être compatibles avec une large variété d'appareils électriques (éclairages, caméras, prise de son...).

Que ce soit pour les tournages intérieurs ou extérieurs, les batteries seront en contact avec un environnement dont les caractéristiques seront variables : plages de température, d'humidité, conditions météorologiques... Les batteries du cinéma doivent donc présenter une robustesse suffisante face à l'environnement de tournage.

—■ L'échelle du tournage

Les projets cinématographiques possèdent chacun leurs spécificités et leur ampleur. Les batteries devront être sélectionnées en prenant en compte de nombreux aspects proportionnels à l'échelle du projet :

- la quantité d'appareils branchés simultanément ;
- la durée de tournage sans recharge ;
- la durée de recharge disponible entre deux tournages...

Compte tenu l'influence de ces nombreux paramètres, il est difficile de choisir une seule technologie de batterie valable pour tous les tournages.

Cependant, nous allons établir une grille de fonctions et de contraintes liés à chaque tournage, avec des grandeurs quantifiables pour chacun des critères.

TÉMOIGNAGES DE PROFESSIONNELS

En abordant la chaîne de production, il est intéressant de constater que les besoins énergétiques et leur stockage sont différents selon les corps de métiers.

Pour mieux comprendre les besoins de chacun, nous avons interrogé dans chaque corps de métier différents spécialistes.

—■ Avis d'une cheffe électro

Au quotidien, les batteries apportent des avantages certains. Elles représentent une flexibilité supplémentaire sur les plateaux, qu'il s'agisse de modifier au dernier moment le placement de certains appareils, ou d'accéder à des zones loin de tout branchement. Cependant, ces stockages d'énergie sont à l'usage plus une variable d'ajustement qu'une source autosuffisante d'énergie.

En effet, si théoriquement un tournage pourrait être exclusivement réalisé grâce à l'énergie de plusieurs batteries, cela représenterait des problèmes logistiques importants, que ce soit dans le volume de batteries nécessaires, leur poids à déplacer, la gestion permanente de leur charge...

Les professionnels attendent des batteries capables d'offrir une autonomie d'au moins deux heures pour une configuration légère avec des LED par exemple, afin de pouvoir tourner huit heures de suite avec quatre batteries. Les batteries sont alors rechargées de nuit pour le lendemain. Il est aussi possible de recharger les batteries pendant que d'autres fonctionnent, afin d'optimiser leur usage et de réduire leur nombre. Mais cela nécessite d'avoir une borne de rechargement et des moyens de gestion supplémentaires.

Les groupes électrogènes présentent à la fois une solution pratique et relativement rapide à mettre en place, mais ils sont sources de pollutions, à la fois environnementales et sonores. Cela peut dégrader les conditions de travail sur le plateau, et les conditions de vie des riverains aux alentours.

C'est pourquoi la préférence s'oriente vers la possibilité d'utiliser des branchements électriques. Un plateau peut se connecter à des branchements forains, sources d'énergies urbaines à haut potentiel électrique, souvent présents sur les places publiques, comme les places de marché. Il est aussi possible de se brancher sur les alimentations des immeubles.

Il faut alors faire appel aux entreprises qui fournissent cette électricité, par exemple EDF. Elles étudient la demande et interviennent afin de créer un raccordement temporaire, avec un compteur afin de quantifier l'énergie consommée par le tournage.

La solution des branchements forains semble la plus pertinente et la moins polluante vis-à-vis des batteries et des groupes électrogènes. Cependant, elle présente des limitations non négligeables, qui la rendent parfois inutilisable :

- Le tournage doit se situer dans un périmètre d'environ 100m autour de la zone de raccordement. Au-delà, la longueur du câblage peut causer des pertes électriques et/ou une variation de courant lors de l'utilisation ;
- La durée nécessaire pour organiser un raccordement est parfois trop importante par rapport au rythme imposé par la production.
- Les entreprises fournissant l'électricité ne sont pas toujours réceptives ou motivées pour réaliser ce genre de branchements. Le cinéma ne représente pas en général une priorité à leurs yeux.
- Une fois que le branchement est réalisé, il arrive parfois que des problèmes surgissent le Jour J, que ce soit au niveau de l'électricité délivrée, qui peut varier selon la consommation des habitants de l'immeuble en question.

Malgré tout, la solution du branchement est largement favorisée par les chefs électriciens lorsqu'une puissance de plus de 10kW est nécessaire.

Pour conclure, les batteries sont aujourd'hui perçues comme un outil supplémentaire et pratique pour équiper un plateau de tournage. Elles ne sont pas encore considérées comme une source exclusive viable d'énergie. Cela pourrait le devenir, à la suite des innovations technologiques et des adaptations des méthodes de travail. Il serait souhaitable dans ce cas de désigner une personne uniquement en charge des batteries et de leur maintenance.

—■ Avis d'un régisseur

Bien que les batteries apportent des avantages non négligeables sur un plateau, leur gestion ajoute des complications dans le quotidien des régisseurs.

Une de leurs inquiétudes est la gestion des batteries une fois qu'elles seront déchargées. Actuellement, c'est souvent au régisseur de les récupérer en fin du tournage, de les emmener, et souvent chez lui, pour les recharger dans la nuit. Si cette solution quelque peu empirique semble viable pour des petites batteries en petit nombre, elle devient vite complexe en cas de grands volumes.

De plus, les batteries sont utilisées à des échelles très différentes. Il est important de prendre en compte les nombreuses utilisations de batteries sur un tournage. En général, on pense principalement à l'éclairage, à la captation audio/vidéo ou aux HMC. Mais il y a aussi de nombreux petits dispositifs comme les talkie-walkie, les imprimantes, les machines à café...

Ces petites batteries nécessitent gestion et une manutention. Si leur volume et poids et moins important, leur grand nombre peut devenir source d'encombrement et leur gestion chronophage.

Une solution qui semble pertinente pour un régisseur serait de disposer d'un véhicule sur lequel différents appareils pourront être branchés, à la manière d'un groupe électrogène.

De plus, il serait favorable d'utiliser les raccordements électriques urbains lorsqu'ils sont possibles, même si les

procédures pour se raccorder à des branchements publics sont souvent longues et fastidieuses. Pour y remédier, il serait judicieux de cartographier la ville et ses points de branchements souvent utilisés pour le cinéma.

— Avis d'un constructeur de batteries

Le cinéma possède ses propres besoins bien spécifiques en termes de batteries. Les constructeurs adaptent donc des technologies déjà existantes pour offrir des performances spécialement conçues pour les tournages :

- Silence de la batterie lors de son utilisation ;
- Réduction des parasites électromagnétiques ;
- Mobilité, volume et poids raisonnables pour manutention ;
- Énergie : puissance électrique suffisante selon appareillage ciblé ;
- Sécurité : batteries normées avec crash tests ;

Les entreprises cherchent à innover selon leur technologie de batteries. Elles sont d'ores et déjà compatibles avec des sources d'énergies renouvelables comme les panneaux solaires.

Elles envisagent une hybridation de certains modèles avec la technologie hydrogène. Elles investissent parfois dans la recherche d'alternative aux métaux rares, afin de s'affranchir de ces ressources qui s'amenuisent. Par exemple, le sodium ou le graphène représenteraient des solutions viables de remplacement.

FONCTIONS ET CONTRAINTES DES BATTERIES POUR L'AUDIOVISUEL

Après avoir établi une analyse du besoin des batteries dans le secteur audiovisuel, nous avons pu obtenir les fonctions suivantes, auxquelles on associe des critères d'acceptation. En rouge sont indiquées les fonctions intrinsèques aux batteries, tandis qu'en vert sont indiquées les fonctions contraintes par l'environnement des batteries.

— Fonctions attendues d'une batterie de cinéma

NOM	INTITULÉ
F1	Permettre aux techniciens d'utiliser la machinerie
F2	Permettre de respecter les délais
C1	Être ergonomique pour le technicien
C2	Être sécurisé
C3	Être financièrement accessible et viable
C4	S'adapter au lieu de tournage
C5	Résister aux conditions climatiques

Il est évident que les professionnels du cinéma ne peuvent pas analyser avec autant de détail les performances de leurs batteries. Ils auront à choisir leur matériel directement chez le loueur, parmi un panel de modèles qu'il aura présélectionné.

C'est pourquoi nous nous sommes entretenus avec un loueur, afin de mieux comprendre les besoins chaque corps de métiers.

— Avis d'un loueur

Ordre de grandeurs des besoins énergétiques

Sur un plateau de tournage, les besoins en énergie diffèrent selon le département concerné :

- La filière Son est la moins demandeuse, en général 50W lui suffit ;
- La filière Image demande quant à elle des puissances proches de 250W, avec une intensité d'environ 15A. Cela permet d'alimenter à la fois la caméra, mais aussi les accessoires qui lui sont appliqués (écran externe, rail...) ;

En général, les équipes utilisent 4 batteries de chacune 2 h d'autonomie.

Il faut préciser que l'utilisation de ces appareils n'est pas constante, il y a certains moments de flottement durant lesquels les appareils sont en veille.

- La filière Données demande aussi de l'énergie. Les disques durs enregistrant la captation vidéo sont alimentés

par des tours informatiques, assez énergivores, autour de 400 W. De plus, des techniciens utilisent des ordinateurs portables pour effectuer des vérifications lors du tournage ;

- La filière Lumière est la plus grande consommatrice d'électricité. Selon l'échelle du tournage, les besoins peuvent aller de 1 000 à 5 000 W.

Certains professionnels ont trouvé ces ordres de grandeurs sous-estimés. Ces valeurs sont évidemment très variables selon l'importance de la production. Ils sont parfois largement plus importants, pour des raisons d'échelle ou de sécurité de production (réserve d'énergie).

Spécificités des batteries pour le cinéma

Concevoir une batterie pour le cinéma, c'est adapter sa structure à des besoins très concrets, pratiques, et spécifiques à l'audiovisuel :

- En France, la plupart des machines utilisent des branchements type connecteurs Marechal ;
- Plusieurs voltages doivent être disponibles en sortie (220V, 12V...). Le courant de sortie doit être délivré en DC (12 ou 24V continu) ou AC (courant alternatif), d'où la nécessité d'intégrer un onduleur dans la batterie ;
- La possibilité d'une recharge en fonctionnement doit être envisagée (les techniciens veulent éviter d'être à court d'énergie) ;
- Il est utile que la batterie comporte des indicateurs lumineux, afin de prévenir de leur état rapidement et clairement au chef électricien ;
- Le système batterie doit être mobile sur un plateau et pendant son transport. Cela se traduit par un compromis entre dimensions, poids et autonomie ;
- Pour les dimensions, il faut pouvoir placer les batteries sur un rack ou dans un camion sans difficulté et debout de préférence ;
- Pour le poids, la batterie doit être déplaçable par le personnel. Des poignées et sangles et systèmes de roues sont prévues pour faciliter le déplacement.

Le cinéma comme moteur d'innovation ?

Par rapport aux autres industries, le cinéma n'est pas un utilisateur prioritaire. Il récupère des technologies déjà existantes et les adapte à ses besoins spécifiques.

Par rapport aux autres secteurs, comme le secteur militaire, les systèmes à base de batteries pour l'audiovisuel cherchent à optimiser le rapport kW fourni / kg, et à présenter un rendement convenable.

Les entreprises qui font de la conception pour le cinéma doivent donc savoir s'adapter à des demandes de tournages particulières (ex : étanchéité améliorée pour un tournage sur bateau).

La sécurité des batteries au cinéma

Leur batteries classiques cinéma sont dimensionnées selon certains critères de sécurité :

- Pour la résistance aux chocs, notamment lors du transport, des tests sont en général effectués pour que les batteries résistent à une chute de 1 m ;
- L'étanchéité d'une batterie classique respecte la norme IP21 (protection contre les gouttes d'eau). Elle peut être améliorée jusqu'à l'IP56 (protection contre les forts jets d'eau type karcher) ;
- Les cellules doivent être agencées de manière à limiter la propagation du feu en cas de départ puis emballage de combustion. De plus, des bacs à sable doivent être à proximité afin d'arrêter le feu.

Les innovations, utiles pour le cinéma ?

Les nouvelles technologies ne s'appliquent pas forcément aux besoins de l'audiovisuel, ou en tout cas seulement quelques années après leur mise sur le marché.

Des progrès ont été fait depuis plusieurs années, avec la mise au point de nouvelles cellules Li-ion permettant un gain d'autonomie de 25 % pour un poids identique. Cependant, cette technologie est encore trop coûteuse et peu distribuée pour être rentable sur plateau de cinéma.

La question de l'hydrogène

Pour ce qui est des piles à combustion, dont le principal consommable est l'hydrogène, leurs conditions de fonctionnement semblent peu adaptées aux pratiques du cinéma.

- Financièrement, un groupe électrogène de 4000 W avec deux heures d'autonomie coûterait dix fois plus cher qu'une batterie aux mêmes caractéristiques électriques ;
- Côté pratique, les piles à hydrogène nécessitent des bombes sous pression, en général 1 000 bar, volumineuses et lourdes, qu'il faut stocker sur tournage, ou se faire livrer au fur et à mesure.






6 ► EXEMPLES DE PRODUITS, ORDRES DE GRANDEURS ET SOURCES




EXEMPLES DE BATTERIES SUR LE MARCHÉ

Après avoir résumé les différentes technologies disponibles en termes de batteries et leurs performances / avantages / inconvénients, il nous semble important de présenter quelques exemples de systèmes à batteries vendues ou louées sur le marché actuel.

Il ne s'agit bien évidemment pas d'une liste exhaustive, mais d'une sélection des quelques produits actuellement proposés par les loueurs aux intervenants.

Cette liste a pour but de donner des ordres de grandeurs des rapports charge / taille / poids globalement proposés, et se base sur les données constructeurs.

EXEMPLES DE BATTERIES LITHIUM					
Constructeur	Modèle	Photo	Caractéristiques	Unités	Valeurs
TSF	8-VE 3000		Puissance électrique	kW	3
			Dimensions	cm ³	56 x 46 x 25
			Poids	kg	43
Maluna	UE 6000		Puissance électrique	kW	3
			Dimensions	cm ³	58 x 46 x 25
			Poids	kg	43
Axsol	Arvey E3		Puissance électrique	kW	3
			Dimensions	cm ³	62 x 42 x 58
			Poids	kg	78
Axsol	Arvey E5		Puissance électrique	kW	5
			Dimensions	cm ³	62 x 42 x 58
			Poids	kg	106
Atohm	Basecamp		Puissance électrique	kW	3,45
			Dimensions	cm ³	56,6 x 37,6 x 16
			Poids	kg	15

EXEMPLES DE BATTERIES HYDROGÈNE					
Constructeur	Modèle	Photo	Caractéristiques	Unités	Valeurs
H2SYS	500ACS		Puissance électrique	kW	0,5
			Dimensions	cm ³	21,2 x 42,3 x 34,7
			Poids	kg	10
H2SYS	1000ACS		Puissance électrique	kW	1
			Dimensions	cm ³	21,2 x 42,3 x 40,2
			Poids	kg	13
H2SYS	3000ACS		Puissance électrique	kW	3
			Dimensions	cm ³	21,2 x 42,3 x 68,6
			Poids	kg	24

BIBLIOGRAPHIE

— Sources

- ADEME. (2017, novembre). *Évaluation de la filière des piles et accumulateurs industriels*.
- Articles. (2018). *Qualité de la Construction*, n° 169.
- Articles. (2019). *Industrie & Technologie*, du n° 1019 au n° 1023.
- Articles. (2019-2020). *Usine Nouvelle*, n° 3618, n° 3625, n° 3645.
- Bureau VERITAS. (2020, juin). Conférence LCIE.
- Bureau VERITAS. (2021, juin). *Standards and Rules over HV Batteries*.
- *La collecte et le recyclage des piles*. (2003). Actu Environnement. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/402.php4>
- *Conditions de transport des piles et batteries au lithium*. (2014). Air France. <https://www.ma-valise-voyage.fr/wp-content/uploads/2014/12/restriction-batteries-avion.pdf>
- Fiches Techniques. Centre de Commerce International.
- Filières piles et batteries collectées. (2021). Batribox. <https://www.batribox.fr/filiere-piles-et-batteries-collectees/>
- Normes et Décrets. Certifications ISO pour batteries.
- Pages Économiques. (2020). *Le Monde*.
- Pitron, G., Renaud, J., & A. (2019). *La Guerre des métaux rares : La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Audiolib.
- RECORD. (2019, juillet). *État de l'art sur le recyclage et le réemploi des batteries* (n° 17-0915/1A). https://www.record-net.org/storage/etudes/17-0915-1A/rapport/Rapport_record17-0915_1A.pdf
- *Réglementation et obligation*. MAMBAT France.
- *Transport des batteries*. (2020). Bretagne Commerce International. <https://www.bretagnecommerceinternational.com>
- *Les risques d'incendie des batteries lithium*. (2020). ANNUME. <https://www.anumme.fr/2020/07/23/rsiques-incendies-solutions/>

— Liste des figures

- Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'une pile.
- Figure 2 : Schéma d'une batterie Acide-Plomb. Source : Wikipédia.
- Figure 3 : Performances des batteries Acide-Plomb. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 4 : Schéma d'une pile type Nickel. Source : perma-batteries.com;
- Figure 5 : Performances des batteries au Nickel. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 6 : Schéma d'une pile au Lithium. Source : letstalkscience.ca.
- Figure 7 : Symboles de la classification des matières dangereuses. Source : domformateur.com.
- Figure 8 : Performances des batteries Li-ion. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 9 : Performances des batteries selon leur type. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 10 : Représentation SAFT Source : saftbatteries.com.
- Figure 11 : Étapes de fabrication d'une batterie. Source : researchgate.net.
- Figure 12 : Schéma d'assemblage d'une batterie au Graphène. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 13 : Publicité Ultra Fast Carbone Electrode. Source : nawatechnologies.com.
- Figure 14 : Exemple d'une pile miniaturisée. Source : industry.panasonic.eu.
- Figure 15 : Comparatif des performances de différentes technologies de stockage d'énergie. Source : *Techniques de l'Ingénieur*.
- Figure 16 : Schéma d'une pile à écoulement.
- Figure 17 : Schéma d'une pile à combustible. Source : airbus.com.
- Figure 18 : Exemples de métaux rares. Source : specialtymetals.com.
- Figure 19 : Carte mondiale des productions et réserves de métaux rares (2018). Source : impact.sn.
- Figure 20 : Revenus mondiaux générés par le marché des batteries Li-ion. Source : avem.fr.
- Figure 21 : Étapes de vie d'une batterie.
- Figure 22 : Symbole des produits corrosifs.
- Figure 23 - Séparation par différence de densité.
- Figure 24 : Cartographie des centres de tri de batterie. Source : corepile.fr.

— Liste des intervenants

Nous souhaitons remercier les intervenants suivants, pour leur implication dans nos recherches, leur soutien et leur apport de connaissance :

- Paul CHAVISSIEU : Batribox - Sophie LELOU : Cheffe Electro - Alexis GIRAUDEAU : Régisseur
- François ROGER, Christophe PIQUEMAL : Atohm Battery - Danys BRUYERE : TSF



9 RUE BAUDOIN
75013 PARIS – FRANCE
Site Internet : www.cst.fr