

# Recyclage et réemploi des batteries

*Etat de l'art*



C4H5O2\_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/ 1392.000 1  
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**ÉTAT DE L'ART SUR LE RECYCLAGE ET LE REEMPLOI  
DES BATTERIES**

**RAPPORT FINAL**

**juillet 2019**

**F. SANCHEZ – RECY'STEM PRO**



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Etat de l'art sur le recyclage et le réemploi des batteries, 2019, 175 p, n°17-0915/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

**Comité de suivi de l'étude :**

Fabrice ABRAHAM – RENAULT, Gérard ANTONINI – RECORD, Raphael BRIERE – ENGIE, Jean-Paul CAZALETS – TOTAL, Bertrand CHERPIN – RENAULT, Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Laure DALLEM – MTES, Sylvain DURÉCU – TREDI, Marc FERREOL – SUEZ, Jade GARCIA – SCORE LCA, Olga KERGARAVAT – ADEME, Lyse LONGUEVILLE – SUEZ, Hervé ROMANO – EDF, Clémence SIRET – SAFT

© RECORD, 2019

## **RESUME**

L'étude se situe sur un périmètre mondial et différencié sur quatre zones géographiques principales : Chine, Etats-Unis, Europe et Japon.

Elle propose dans un premier temps un état de l'art du marché des batteries en étudiant notamment les différentes technologies et les dynamiques de croissance des marchés utilisateurs.

Une deuxième partie se penche sur les enjeux liés à la réglementation, l'éco-conception, la sécurité, la seconde vie et le coût et la disponibilité des métaux qui conditionnent en partie le marché des batteries mais surtout le marché de leur recyclage.

Une troisième partie permet de faire un état de l'art du recyclage des batteries à travers une description générale des procédés, une cartographie des principaux acteurs du recyclage, une description détaillée de quelques procédés spécifiques et enfin une analyse de la stratégie des acteurs vis-à-vis de la filière de recyclage.

La dernière partie offre enfin une vision prospective afin d'évaluer au travers de plusieurs scénarii, les volumes de batteries en fin de vie sur la période allant jusqu'en 2030 et discuter de l'adéquation des capacités de recyclage.

## **MOTS CLES**

BATTERIES, RECYCLAGE, LITHIUM-ION, BMS, VEHICULE ELECTRIQUE, REGLEMENTATION, REEMPLOI, SECONDE VIE, ECO-CONCEPTION, IMPACT ENVIRONNEMENTAL, METAUX STRATEGIQUES, PYRO-METALLURGIE, HYDROMETALLURGIE, PROCEDE DE VALORISATION DIRECTE.

---

## **SUMMARY**

The study covers on a worldwide perimeter and differentiates four main geographical areas: China, United States, Europe and Japan.

It first proposes a state of the art on battery market by studying the different technologies and growth dynamics of user markets.

Secondly it focuses at the issues related to regulations, eco-design, security, second life and the cost and availability of metals that partly condition the battery market but more significantly the market for their recycling.

A third part allows to make a state of the art on battery recycling, through a general description of the processes, a mapping of the main actors of recycling, a detailed description of some specific processes and finally an analysis of the strategy of the stakeholders involved regarding the recycling sector.

The last part finally offers a prospective vision to evaluate, through several scenarios, the battery volumes at the end of life over a period until 2030 and discusses the adequacy of recycling capacities.

## **KEY WORDS**

BATTERIES, RECYCLING, LITHIUM-ION, BMS, ELECTRIC VEHICLE, REGULATIONS, RE-EMPLOYMENT, SECOND LIFE, ECO-DESIGN, ENVIRONMENTAL IMPACT, STRATEGIC METALS, PYRO-METALLURGY, HYDROMETALLURGY, DIRECT RECOVERY PROCESS.

## Table des matières

1	Etat du marché des batteries.....	8
1.1	Le marché des batteries à travers leurs applications.....	8
1.2	Analyse comparative des principales technologies de batteries mises sur le marché.....	11
1.2.1	Diagramme de Ragone.....	11
1.2.2	Critères de comparaison liés à la performance.....	12
1.2.3	Autres critères de comparaison (Hors performance).....	13
1.2.4	Critères complémentaires.....	13
1.2.5	Bilan et discussion concernant les avantages et inconvénients des principales technologies de batteries actuellement sur le marché.....	14
1.2.6	Les systèmes de stockage électrochimiques alternatifs.....	19
1.3	Les grandes tendances du marché des applications et impact sur le marché des batteries.....	28
1.3.1	Croissance du marché des batteries (1990 – 2016).....	28
1.3.2	Dynamiques de croissance en fonction des domaines d'applications.....	29
1.3.3	Dynamique de croissance de la technologie Li-ion et potentiel d'émergence de technologies concurrentes.....	32
1.4	Conclusion sur l'évolution du marché des batteries en volume.....	35
1.5	Les acteurs du marché des batteries.....	38
2	Enjeux et déterminants du marché des batteries et de leur recyclage.....	41
2.1	Synthèse réglementaire.....	41
2.2	Etat des lieux sur l'Ecoconception.....	48
2.2.1	Définition.....	48
2.2.2	Ecoconception, recyclabilité et réglementation européenne.....	49
2.2.3	Etat des lieux et perspectives.....	50
2.3	Etat des lieux sur la sécurité des batteries Lithium.....	52
2.3.1	Batteries Lithium-Métal Polymère.....	52
2.3.2	Batteries au Lithium ionique.....	53
2.3.3	Gestion de la sécurité dans les installations de recyclage des batteries Li-ion.....	55
2.4	Seconde vie.....	56
2.4.1	Des difficultés techniques.....	58
2.4.2	Des difficultés économiques.....	59
2.4.3	Des difficultés réglementaires.....	60
2.5	Coûts et disponibilités des métaux.....	61
2.5.1	Le Lithium.....	62
2.5.2	Le Nickel.....	65
2.5.3	Le Cobalt.....	67
2.5.4	Conclusion sur le coût et la disponibilité des métaux.....	70
3	Les procédés de recyclage des batteries.....	71

3.1	Introduction.....	71
3.2	Généralités sur les procédés de recyclage des batteries .....	71
3.3	Les principales étapes des procédés de recyclage des batteries .....	72
3.3.1	Séparation des flux .....	72
3.3.2	Préparation ou prétraitement.....	73
3.3.3	Procédé de valorisation directe .....	74
3.3.4	Procédés Pyro-métallurgiques.....	74
3.3.5	Procédés Hydro-métallurgiques .....	75
3.4	Comparaison des procédés de recyclage et impacts environnementaux .....	77
3.5	Les procédés de recyclage des batteries Ni-Cd.....	78
3.5.1	Traitement par distillation .....	78
3.5.2	Traitement par hydrométallurgie.....	78
3.6	Les procédés de recyclage des batteries Ni-MH.....	79
3.6.1	Procédés pyro-métallurgiques.....	79
3.6.2	Procédés hydro-métallurgiques .....	79
3.7	Les procédés de recyclage des batteries Li-ion.....	80
3.7.1	Procédés pyro-métallurgiques.....	81
3.7.2	Procédés hydro-métallurgiques .....	81
3.8	Quelques éléments concernant l'économie du recyclage des batteries Li-ion : .....	81
3.9	Les acteurs du recyclage de batteries .....	82
3.10	Recyclage des batteries Li-ion et stratégie des acteurs .....	86
3.11	Les procédés de recyclage face à l'évolution des technologies Li-ion.....	90
3.12	R&D, quels enjeux prioritaires ?.....	91
3.13	Conclusions sur les procédés de recyclage.....	92
4	ANALYSE PROSPECTIVE.....	94
4.1	Méthodologie générale .....	94
4.2	Etat des lieux du marché mondial des batteries Li-ion .....	96
4.2.1	Véhicules électriques légers – VEH (particuliers et utilitaires) .....	96
4.2.2	Les bus électriques .....	99
4.2.3	Autres équipements .....	100
4.2.4	Conclusion sur l'état des lieux du marché des batteries Li-ion .....	100
4.3	Scenarii d'évolution du marché des batteries Li-ion.....	101
4.3.1	Discussion préliminaire sur le futur du marché des VEH.....	101
4.3.2	Prévisions du marché global des VEH.....	107
4.3.3	Prévisions du marché des bus électriques.....	112
4.3.4	Prévision du marché des autres équipements .....	113
4.4	Scenarii d'évolution des volumes de batteries Li-ion en fin de vie et prévision du marché du recyclage .....	114
4.4.1	Rappel méthodologique .....	114

4.4.2	Equivalence entre capacité de stockage et poids moyen des batteries pour les VEH et Bus électriques.....	114
4.4.3	Equivalence entre capacité de stockage et poids moyens des batteries pour les autres équipements .....	115
4.4.4	Durée de vie et profils de fin de vie.....	116
4.4.5	Potentiel de seconde vie .....	118
4.4.6	Estimation des volumes de batteries Li-ion en fin de vie selon les zones géographiques 120	
4.4.7	Adéquation des capacités de recyclage.....	126
CONCLUSION.....		129
<b>ANNEXE 1 : Généralités techniques sur les batteries.....</b>		<b>131</b>
<b>ANNEXE 2 : Restrictions réglementaires concernant la composition des batteries dans l'UE.....</b>		<b>139</b>
<b>ANNEXE 3 : Technologies peu utilisées.....</b>		<b>140</b>
<b>ANNEXE 4 : Batteries du futur.....</b>		<b>143</b>
<b>ANNEXE 5 : Repères chiffrés.....</b>		<b>149</b>
<b>ANNEXE 6 : Variétés des compositions des batteries Li-ion.....</b>		<b>150</b>
<b>ANNEXE 7 : Description des procédés de recyclage des batteries Li-ion.....</b>		<b>155</b>
<b>ANNEXE 8 : Bibliographie.....</b>		<b>173</b>

## Introduction

Ce document constitue le rapport final concernant l'état de l'art relatif au recyclage et au réemploi des batteries.

La première partie propose une analyse de l'état du marché des batteries :

- Description du marché des batteries à travers ses technologies, ses applications et ses acteurs
- Présentation des technologies dominantes, émergentes et analyse des potentiels de développement en fonction des dynamiques du marché des applications.

Ces éléments permettent dans un premier temps, de conclure que les enjeux en matière de recyclage des batteries dans les années à venir se concentrent sur la technologie Li-ion.

Une deuxième partie fait le point sur les déterminants du marché du recyclage des batteries et en particulier la réglementation, les pratiques d'éco-conception, la sécurité (batteries Li-ion), la seconde vie (batteries Li-ion) et enfin le coût et la disponibilité des métaux stratégiques pour la fabrication des batteries (nickel, Cobalt, Lithium)

Une troisième partie aborde les technologies de recyclage en présentant les trois principales voies de recyclage (valorisation directe, pyrométallurgie et hydrométallurgie). Cette partie propose également un éclairage sur la stratégie des acteurs en matière de positionnement sur la chaîne de valeur du recyclage. Nous montrons notamment comment le contexte industriel et réglementaire détermine en grande partie ces stratégies sur les zones géographiques étudiées. Cette partie est complétée par L'ANNEXE 7 qui décrit en détail les procédés des principaux acteurs ou les procédés ayant valeur d'exemplarité.

Enfin, dans une approche prospective, la dernière partie évalue les quantités de batteries arrivant en fin de vie jusqu'en 2030 pour les comparer aux capacités actuelles de recyclage.



# 1 Etat du marché des batteries

Les batteries sont utilisées pour de multiples applications et le service attendu par celles-ci est variable. Ainsi, on ne peut pas aborder le marché des batteries sans aborder le marché des applications.

Dans cette partie, nous proposons donc en premier lieu et à titre indicatif, une photographie du marché des batteries segmenté en fonction des applications. Et pour chaque segment du marché des applications nous proposons une estimation des parts de marché des principales technologies de batteries correspondantes.

Dans un second temps, nous présentons une analyse comparative des technologies de batteries qui dominent actuellement le marché. En mettant en évidence les avantages et inconvénients de ces technologies, nous verrons que leur périmètre d'interchangeabilité est limité. Cette approche nous permettra de comprendre les déterminants de leur adoption par le marché et nous aidera par la suite pour évaluer le potentiel de développement des différentes technologies de batteries (y compris les technologies émergentes) en fonction du développement prévisible des marchés d'application.

Bien que les batteries au plomb/acide soient exclues du champ de l'étude, on ne peut pas les ignorer dans cette partie qui consiste à décrire le marché des batteries, comprendre sa dynamique et ses déterminants. En effet, cette technologie reste prépondérante dans de nombreux domaines d'application. Dans la perspective d'évaluer le marché futur des batteries, il est impératif de comprendre les atouts de cette technologie pour démontrer que les batteries plomb/acide conserveront probablement à moyen terme une place prépondérante quels que soient les progrès effectués sur les autres technologies de batterie.

## 1.1 Le marché des batteries à travers leurs applications

Sur le marché des applications une batterie n'a pas toujours la même fonction. Il est possible d'aborder le service attendu selon trois approches :

- **Mobile versus Stationnaire**  
Les batteries pourront être utilisées pour des applications mobiles (type véhicules électriques, équipements portables, outillage sans fil) ou stationnaires (stockage sur réseau). Pour des applications mobiles, la densité d'énergie est un critère particulièrement important puisqu'une densité d'énergie importante permettra de limiter le poids des batteries embarquées.
- **Cyclage versus secours**  
En cyclage, une batterie subira des cycles de charge et décharge réguliers lors de son utilisation. En secours, l'accumulateur ne sera sollicité qu'en cas de coupure du réseau d'alimentation principal. De ce fait, on peut noter que pour une utilisation en secours, la cyclabilité peut devenir un critère secondaire alors qu'il est essentiel pour une application en cyclage.
- **Puissance versus Energie<sup>1</sup>**  
Un fonctionnement « en puissance » exige de la batterie la capacité de renvoyer une forte intensité en peu de temps. Un fonctionnement « en énergie » exige une forte capacité de stockage afin de pouvoir délivrer un courant de moindre intensité mais sur une longue durée. L'aptitude à délivrer de la puissance varie avec la technologie de batterie.

---

<sup>1</sup> Voir le diagramme de Ragone en 2.2.1

De plus, pour une technologie donnée, il existe des versions optimisées en puissance ou en énergie en fonction des applications de destination. Par exemple on maximisera la puissance pour des outils électroportatifs ou pour des batteries de démarrage alors qu'on maximisera plutôt l'énergie pour des applications en stockage stationnaire.

Cette approche différenciée des services attendus permet de proposer une segmentation du marché des applications.

Cette segmentation a été réalisée à partir de l'étude ADEME concernant les P&A industriels<sup>2</sup>, en la complétant avec les domaines d'applications « portables » qui ne faisaient pas partie du périmètre de l'étude ADEME.

De plus, les parts de marché pour les applications industrielles qui ne concernaient que le périmètre français ont été réévaluées à une échelle mondiale (par exemple, les VAE en Chine sont encore souvent équipés de batteries au Plomb, alors que cette utilisation reste très minoritaire en Europe).

Le marché des batteries est généralement évalué en Wh (ce qui correspond à la somme de l'énergie électrique stockée par la totalité des batteries considérées. Ou encore la quantité d'énergie électrique délivrable par la totalité des batteries au cours d'un cycle de décharge). Dans le tableau ci-dessous les parts de marchés sont exprimées en % des Wh mis sur le marché.

L'intérêt de cette segmentation est de montrer la diversité des applications pour apporter une compréhension qualitative du marché des batteries. L'approche quantitative (évaluation en tonnages) est menée dans la partie prospective de l'étude sans entrer dans le détail de chaque application et en regroupant les segments de marchés sous trois grandes catégories : VEH, Bus électriques, Autres applications

---

<sup>2</sup> Evaluation de la filière des piles et accumulateurs industriels (ADEME – Novembre 2017)

	Secteurs d'activité	Applications	Pb/Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Autres
APPLICATIONS STATIONNAIRES	Secours (back-up)						
	Utilities: production d'électricité (y/c nucléaire), transport et distribution (sous-stations)	Alimentations de secours AC et DC Interrupteurs et sectionneurs (switchgear) Démarrage Diesel de secours	90%	10%			
	Oil and Gas: off shore, sous-marin, on-shore, infrastructure de distribution, raffineries		50%	50%			
	Bâtiments (hopitaux, banques, data centers),		80%	20%	x		
	Industries (chimique, métaux, mines, cimenteries...)		80%	20%	x		
	Bureautique, informatique individuelle		95%			5%	
	Infrastructures de transport (trackside ferroviaire, routes et tunnels, balises aviation, phares et balises marines,...)		80%	20%	x		
	Stations fixes des réseaux de télécom		80%	20%	x		
	Systèmes d'alarme professionnels intrusion, contrôle d'accès, video-surveillance	Enregistreur - moniteur	x			x	
	Eclairage de sécurité : Evacuation, anti-panique, habitation, locaux à sommeil	Eclairage de secours centralisé obligatoire Eclairage de secours décentralisé obligatoire pour risque incendie	Majorité	Majorité	Disparu	Remplace le NiCd	
	Cyclage (utilisation continue)						
	Systèmes domestiques d'énergies renouvelables	Installations photovoltaïques, systèmes éoliens, ...	90%			10%	
	Systèmes d'énergies renouvelables industriels	Installations photovoltaïques, systèmes éoliens, ...	10%		10%	80%	
	Stockage et restitution réseau (Energie)	Stockage sur réseau de distribution électrique	20%			70%	10% (NaS et batteries à flux))
Stockage multiservices sur réseau électrique (Puissance / énergie)	Smart grid & ENR (écrotage, stabilisation, effacement)	10%			90%		
APPLICATIONS MOBILES	Secours (back-up)						
	Transport ferroviaire et aéronautique	Secours Ferroviaire: portes, éclairage, communication, chauffage, climatisation Secours Aérien: alimentation cockpit, actionnement commandes,...	30%	60%		10%	
	Dispositifs médicaux	Système de monitoring, Administration automatique de médicaments...	20%			80%	
	Stockage portable	batteries d'appoint pour équipements portables individuels				100%	
	Cyclage (équipements de traction)						
	Equipements de levage et de manutention	Chariots élévateurs, nacelles, gerbeurs, services aéroportuaires au sol.	95%			5% croissance	
	Equipements industriels de nettoyage	Autolaveuses, polisseuses...	95%			5%	
	Véhicules électriques (4 roues)	Véhicules hybrides			toyota uniquement 90%	Transfert 2020 tout li-ion - 10%	
		Véhicules électriques, voitures de golf et autres véhicules de transport automatiques		Il n'y en a plus		99%	
	Véhicules électriques (2 et 3 roues)	Vélo assistance électrique, scooters électriques	60%			40%	
	Autres dispositifs terrestres /équipements de mobilité électriques	trotinettes électriques, gyropodes électriques, ...	0-5%			95-100%	
	Marine (propulsion électrique)	Bateaux hybrides et tout électrique	95-99%			1-5%	
	Cyclage (équipements portables)						
	Informatique portable	laptops, tablettes			5%	95%	
	Photos et vidéo	appareils photo, caméras			50%	50%	
	Communication	Téléphone portable			20%	80%	
	Autres produits grand public	Jeux, MP3, Tel fixe sans fil, rasoirs, brosses à dents... etc			20%	80%	
	Autres fonctions en autonomie						
	Outillage sans fil	Bricolage et jardinage		Interdiction Europe	40%	60%	
	Commerce	Terminaux de paiement, lecteurs de code à barres			x	x	
	Pilotage, instrumentation, mesures en secteurs industriels et bâtiments	smart applications, domotique, gestion d'énergie		x	x	x	
	Dispositifs médicaux mobiles	Fauteuils roulants, lits médicalisés, moniteurs,...	x		x	x	
Drones, aéromodélisme					x	80% (Li-Po)	
Eclairages mobiles	Mines, travail de nuit, égouts, plongées pro..etc			x	x	x	
Clotures électriques		x			x	Zinc air	

**Tab 1** : Segmentation du marché des batteries – Estimations des PdM 2016  
(Données compilées de différentes sources)

## 1.2 Analyse comparative des principales technologies de batteries mises sur le marché

Les éléments de comparaison des différentes technologies de batteries sont, dans un premier temps, liés à leur performance, c'est-à-dire principalement leurs grandeurs caractéristiques (Voir l'ANNEXE 1 pour les généralités techniques sur les batteries).

Nous utilisons ensuite d'autres éléments de comparaison tels que le prix, la sécurité, la facilité de gestion (maintenance, charge, décharge) etc., qui sont également des critères déterminants dans le choix d'une batterie pour une application donnée.

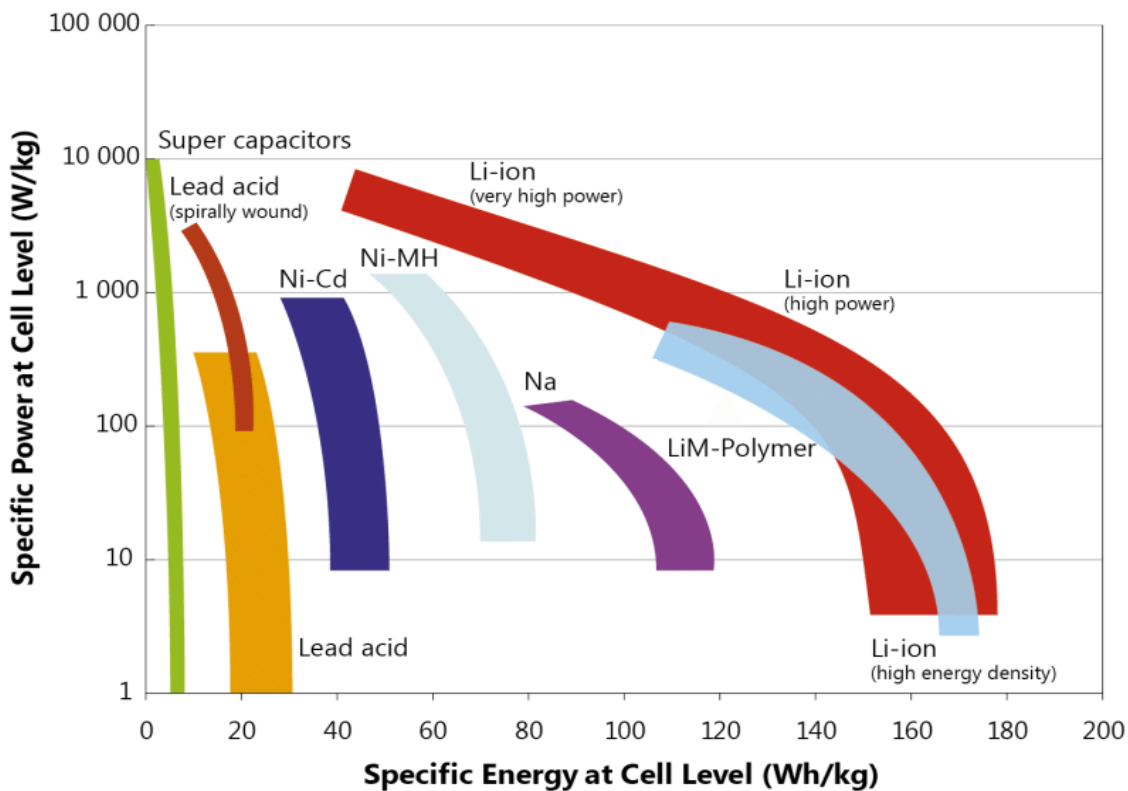
Les batteries Li-ion présentent une grande variété de conception principalement liée à diverses associations de matériaux constituant la cathode.

Ceci se traduit également par un éventail de performance assez large mais qui globalement ne change pas la hiérarchie des avantages et inconvénients vis-à-vis des autres technologies.

Il n'apparaît donc pas nécessaire, à ce stade de l'étude d'entrer plus en détail dans les différences de conception au sein de la famille Li-ion. En revanche, cette diversité de composition aura des conséquences importantes en ce qui concerne le recyclage.

### 1.2.1 *Diagramme de Ragone*

Le diagramme de Ragone exprime la puissance spécifique d'une batterie en fonction de son énergie spécifique. Il permet de comparer les performances des systèmes de stockage d'énergie entre eux en matière de densité de puissance et de densité d'énergie.



**Fig 1** : Diagramme de Ragone<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Source Daniel CHATROUX, Bruno BERANGER (CEA) - Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques – Symposium de génie électrique – Grenoble, FRANCE 7-9 juin 2016.

L'observation du diagramme de Ragone, montre que de manière générale, chaque nouvelle génération de batterie (Plomb/acide, Ni-Cd, Ni-MH et Li-ion) permet d'accroître à la fois la densité de puissance et la densité d'énergie.

Ce diagramme met également en évidence que le choix d'une batterie est un compromis entre densité de puissance et densité d'énergie, car l'augmentation d'un paramètre entraîne généralement la diminution de l'autre.

Enfin, sur ces deux critères de performance, on constate que la technologie Li-ion surclasse nettement les autres technologies aussi bien sur des applications en puissance qu'en énergie.

### 1.2.2 Critères de comparaison liés à la performance

	Li-ion	Ni-MH	Ni-Cd	Na-S <sup>4</sup>	Pb/Acide
Tension nominale (volts)	3,7	1,2	1,2	1,75	2
Densité d'énergie massique (Wh/Kg)	90-250	60-80	40-55	100-110	30-50
Densité de puissance (W/kg)	100-5000	100-2000	100-800	100-200	100-300
Nombre de cycles	1000-10000	1000-1500	1500-2500	2000-5000	500-1200
Rendement charge /décharge	>95%	70 à 90 %	70 à 90 %	70-80 %	70 à 75 %
Autodécharge (% / mois)	<5 %	20 %	20 %	Forte (batterie chaude) 20%/jour	5 %

**Tab 2:** Comparaison des principales technologies de batteries selon leurs critères de performance (Données compilées de différentes sources)

Les performances des différentes technologies sont le plus souvent exprimées par des fourchettes de valeur.

En effet, au sein d'une technologie donnée, les performances varient en fonction de la qualité de fabrication, elle-même liée à la qualité des process et la qualité des matériaux constitutifs. Au-delà des écarts de fiabilité entre fabricants, cette qualité dépendra avant tout de l'usage prévu (Par exemple à technologie équivalente les batteries destinées aux applications spatiales seront fabriquées dans des conditions plus rigoureuses afin notamment de maximiser leur cyclabilité et donc leur durée de vie)

Au sein de la technologie Li-ion plus spécifiquement, la variabilité des performances est liée à un spectre des compositions chimiques relativement large.

Enfin, pour chaque technologie, on pourra chercher à optimiser soit la puissance, soit l'énergie en fonction des applications de destination.

<sup>4</sup> Source ENEA CONSULTING : « Facts en figures » – Le stockage d'Énergie – Mars 2012

### 1.2.3 Autres critères de comparaison (Hors performance)

	Pb	Ni-Cd	Ni-MH	Na-S	Li-ion
Prix	+++	++	+	+	-
Sécurité d'utilisation	+++	+++	+++	+	-
Facilité de gestion (maintenance, charge et décharge)	++	++	-	--	--
Fiabilité dans un environnement extrême (T° / chocs)	+	++	+	-	-

**Tab 3:** Comparaison des technologies de batteries selon des critères non liés à la performance

Légende : plus il y a de « + » et plus la chimie présente un intérêt positif par rapport au critère évalué

Légende couleur :

Stable
En cours d'évolution

### 1.2.4 Critères complémentaires

Enfin d'autres critères pourront être pris en compte ou influenceront dans le choix d'une batterie, Il s'agira notamment des éventuelles restrictions réglementaires, de l'impact environnemental ou encore de la « recyclabilité ».

L'impact environnemental sur l'ensemble de cycle de vie d'une batterie ne sera pas traité dans le cadre de cette étude (A noter que l'analyse du cycle de vie d'une batterie est complexe car il dépend en grande partie de la phase d'utilisation<sup>5</sup>). Seul l'impact environnemental des procédés de recyclage sera abordé dans une approche comparative (chap. 3.4).

La notion de recyclabilité est abordée plus loin (chap. 2.2.2).

Les technologies Pb/acide, Ni-Cd et Ni-MH sont utilisées depuis longtemps et leurs critères d'évaluation sont stabilisés. On peut cependant souligner qu'en Europe les batteries au plomb sont sur le point de subir des restrictions réglementaires en hausse du fait de l'inscription de nouvelles substances entrant dans la composition de ces batteries à l'annexe XIV et XVII du règlement REACH<sup>6</sup> (qui mentionnent les substances soumises à autorisations et à restrictions). Les batteries au plomb bénéficient actuellement d'un régime d'exemption (voir Annexe 2 de cette étude : restrictions réglementaires dans l'UE).

En revanche, les technologies Li-ion actuellement en fort développement continuent à évoluer en ce qui concerne leur composition, leur prix et leur sécurité.

L'amélioration de la sécurité est aujourd'hui un axe de recherche important pour les technologies Li-ion. On peut mentionner la technologie LFP (Lithium/fer/phosphate) qui offre potentiellement plus de sécurité du fait d'une meilleure stabilité thermique des cellules. En contrepartie, cette technologie est un peu moins performante sur la densité d'énergie massique (90-120 Wh/kg).

Cette technologie a jusqu'ici été privilégiée par Sony et surtout BYD qui est un des leaders mondiaux dans la fabrication de batteries au lithium<sup>7</sup>. Mais ce dernier utilise de plus en plus des batteries Li-ion de type NMC (Nickel/Manganèse/Cobalt) pour ses VEH. Les batteries LFP restent très utilisées pour les bus électriques.

<sup>5</sup> L'étude ACV publiée en 2013 par l'ADEME sur les seules batteries de véhicules électriques donnent la mesure de la difficulté. Pour une approche très complète sur les analyses de cycle de vie, voir l'association SCORELCA - <https://www.scorelca.org/>

<sup>6</sup> Règlement N° 1907/2006, complété par le règlement N° 2015/628 concernant plus spécifiquement le plomb et ses composés.

<sup>7</sup> L'entreprise chinoise BYD a la particularité de fabriquer à la fois des batteries mais aussi des véhicules électriques – BYD représente près de 20% des parts de marché dans la fabrication de batteries Li-ion dans le monde et 11% de parts de marché sur les batteries de VEH. Son CA est de 12 Mds de USD en 2015.

Des moyens importants sont également mis en œuvre pour mettre au point des batteries Li-ion à électrolyte solide qui améliore la sécurité ainsi que la densité énergétique.

Dans le domaine du stockage de masse, du fait de son fonctionnement à haute température et du risque d'accident en cas de contact avec l'air extérieur ou l'humidité, la technologie de batteries Na-S présente des risques qui peuvent être parfaitement contrôlés en milieu industriel mais ne se prêtent pas à un usage domestique (qui n'est par ailleurs pas du tout envisagé pour cette technologie).

Pour les technologies Ni-Cd, les restrictions réglementaires concernent son utilisation (voir détail en ANNEXE 2) Pour les technologies Lithium, les restrictions réglementaires concernent son transport (par voie aérienne notamment) – voir Chap 2.1 concernant la réglementation.

De manière générale les technologies les plus récentes, même si elles offrent des performances supérieures (en particulier le Li-ion), restent encore relativement chères et sont surtout plus complexes à gérer dans leur utilisation.

Les technologies de recyclage pour les batteries Ni-Cd et Ni-MH sont matures, et il est peu probable qu'elles évoluent dans le futur. Aujourd'hui la directive CE 2006-66 impose 75 % de taux de recyclage sur le Ni-Cd et 50 % sur les autres technologies hors Plomb<sup>8</sup>. Pour ces deux catégories de batteries, les rendements de recyclage sont déjà élevés et supérieurs aux exigences.

Concernant le Li-ion, l'augmentation des volumes de batteries, la nécessité de sécuriser les ressources en métaux stratégiques sur le long terme (Lithium, cobalt et Nickel principalement) et la nécessité de réduire l'impact environnemental de la fin de vie font du recyclage de ces batteries un enjeu important en matière de développement.

Concernant les batteries Na-S, elles sont en théorie facilement recyclables au regard de leurs composants mais il ne semble pas exister à ce stade de procédés industriels pour leur recyclage.

## **1.2.5 Bilan et discussion concernant les avantages et inconvénients des principales technologies de batteries actuellement sur le marché**

### **1.2.5.1 Plomb-Acide**

Mises au point en 1859, Les batteries plomb/acide restent de loin les plus utilisées (75 % du volume de batteries tous marchés confondus<sup>9</sup> en 2017, près de 50 % en valeur). Elles sont robustes, peu chères et facilement recyclables même si le plomb et l'acide utilisé (acide sulfurique) sont potentiellement dangereux pour l'environnement. Les batteries au plomb seront généralement préférées tant qu'elles répondent au cahier des charges de l'utilisateur. Elles peuvent fonctionner aussi bien en cyclage qu'en secours, en puissance qu'en énergie et peuvent être rechargées avec un chargeur bas de gamme. Pouvant fournir une forte intensité (puissance), elles sont particulièrement adaptées pour les batteries de démarrage et plus généralement pour le segment d'application appelé SLI en anglais (Start, Lighting, Ignition).

L'inconvénient majeur des batteries au plomb est leur faible densité d'énergie massique qui les disqualifie généralement pour les applications mobiles demandant de l'autonomie (leur utilisation reste toutefois très majoritaire pour les véhicules industriels tels que les engins de levage et manutention ou les équipements industriels de nettoyage).

---

<sup>8</sup> A l'échelle européenne, ces taux sont atteints par une écrasante majorité d'acteur. Cependant, malgré le règlement N° 493/2012 qui précise les modalités de calcul des rendements de recyclage, des progrès semblent encore nécessaires pour harmoniser le reporting.

<sup>9</sup> AVEICENNE ENERGY – Présentation Christophe Pillot Octobre 2018 – congrès de Nice.

Bien qu'inférieure au Ni-Cd, la plage de température d'utilisation reste assez large (-20°C à 45°C) et généralement supérieure aux batteries Li-ion.

Les batteries Plomb ont l'inconvénient d'avoir une fin de vie soudaine qui peut être problématique pour certaines applications notamment dans le cas où une maintenance régulière est difficile à mettre en œuvre.

L'utilisation de batteries plomb/acide reste donc prépondérante pour toutes les applications stationnaires en secours en dehors de conditions extrêmes et sur sites isolés où on lui préférera généralement la technologie Ni-Cd.

Les batteries plomb/acide restent également majoritaires pour les systèmes domestiques d'énergie renouvelables pour leur facilité d'utilisation et de gestion. En revanche, pour la plupart des applications stationnaires qui fonctionnent en cyclage dans un environnement industriel, (systèmes EnR industriel, stockage multiservices sur réseau) les batteries Li-ion seront préférées (ou Na-S pour du stockage de grande capacité).

Enfin, du fait de sa faible densité énergétique, la technologie Plomb/acide n'est pas utilisée pour les autres applications de mobilité électrique (à l'exception des vélos à assistance électrique hors Europe) ni aucun autre équipement électronique portable.

Le recyclage des batteries au Plomb est une activité rentable. De fait, les batteries Plomb-acide sont parmi les produits les plus recyclés au monde. Après concassage, fusion et affinage, les recycleurs produisent du plomb très largement réutilisé pour la fabrication de nouvelles batteries.

### **1.2.5.2 Ni-Cd**

#### Composition

Les batteries Ni-Cd sont composées d'une cathode en hydroxyde de nickel – Ni(OH)<sub>2</sub> et d'une anode en Cadmium.

L'électrolyte le plus couramment utilisé est de l'hydroxyde de potassium (KOH) ou de l'hydroxyde de sodium (NaOH appelée aussi soude caustique). On y trouve aussi en faible quantité de l'hydroxyde de lithium (LiOH) qui permet d'améliorer les performances de la batterie.

Les batteries Ni-Cd contiennent également entre 0 et 3% de Cobalt.

Les proportions moyennes sont de :

- Hydroxyde de nickel : 20 à 25 %
- Cadmium : 15 à 18 %
- Métaux ferreux (casing, ...etc): 20 à 25 %
- Electrolyte : 5 %
- Polymère, matière carbonée (séparateur, liants...etc) : 25 à 35 %
- Cobalt : 0 à 3%

#### Spécificités

Inventées dès 1900 et commercialisées à partir des années 1940 les batteries au Ni-Cd ont permis d'améliorer sensiblement la densité d'énergie et la densité de puissance par rapport aux batteries au plomb. Elles offrent également une plus grande durée de vie (en nombre de cycles) et nécessitent peu de maintenance. Elles sont également beaucoup moins sensibles aux variations de température (le



Ni-Cd conserve ses performances au froid et ne vieillit pas prématurément dans des conditions chaudes) et peu sensibles aux chocs physiques et vibrations.

De plus, contrairement aux batteries au plomb qui subissent une « mort subite », le Ni-Cd a un vieillissement progressif, et donc une perte de performance progressive qui facilite la planification en matière de maintenance et de renouvellement.

Un accumulateur Ni-Cd peut se contenter d'un chargeur bas de gamme, sa recharge est simple et rapide y compris après une longue période de stockage et une décharge complète.

Les batteries Ni-Cd sont donc largement utilisées pour les applications en secours notamment dans les transports aériens, ferroviaires mais aussi dans des zones difficiles d'accès où la maintenance est problématique (par exemple les activités offshore) pour des usages répétitifs et industriels. De manière générale le Ni-Cd permet d'apporter des solutions fiables pour des applications fonctionnant dans un environnement extrême (fortes variations de température, chocs, vibrations, accélération).

Elles ont longtemps été utilisées pour les équipements portables (radio, vidéo professionnelle, équipement médical d'urgence et outillage sans fil) avant d'être progressivement remplacées par du Ni-MH à partir des années 1990 du fait de la dangerosité du cadmium. L'utilisation du Cadmium est aujourd'hui fortement réduite par la réglementation européenne dans le cadre de la restriction d'utilisation des substances dangereuses.

A capacité équivalente, le Ni-Cd coûte 3 à 4 fois plus cher que le Plomb (jusqu'à 10 fois plus cher pour des applications extrêmes en aéronautique par exemple).

Le recyclage des batteries Ni-Cd fait l'objet de procédés éprouvés dans des installations strictement industrielles notamment du fait d'un passage en phase vapeur faisant appel à de hautes températures.

### **1.2.5.3 Ni-MH**

#### Composition

Les batteries Ni-MH sont composées d'une cathode en hydroxyde de nickel et d'une anode d'insertion, en alliage métallique, absorbant réversiblement de l'hydrogène sous forme solide par la formation/décomposition d'un hydrure métallique. Les matériaux hydrurables utilisés commercialement sont des alliages à base de terres rares (Mm) et de nickel, de formule générale Mm (Ni, Co, Al, Mn)<sub>5</sub>

Comme pour les batteries Ni-Cd, l'électrolyte le plus couramment utilisé est de l'hydroxyde de potassium ou de l'hydroxyde de sodium. On y trouve aussi en faible quantité de l'hydroxyde de lithium qui permet d'améliorer les performances de la batterie.

La composition moyenne des batteries Ni-MH utilisées pour des véhicules hybrides électriques, est de

- 23 % de nickel,
- 4 % de cobalt,
- 7 % de terres rares
- 36 % d'acier,
- 18 % de plastique,
- 9 % d'électrolyte,
- 2 % d'autres métaux

- 1 % de polytétrafluoroéthylène (PTFE)<sup>10</sup> utilisé comme liant.

### Spécificités

La batterie Ni-MH a été mise au point en 1975 mais sa commercialisation n'a débuté qu'en 1990. Cette technologie utilise pour la première fois des matériaux d'insertion pour une électrode. C'est-à-dire que le matériau d'électrode n'est pas directement consommé par les réactions d'oxydo-réduction, mais sert à accueillir les espèces ioniques qui participent à la réaction redox (ici un hydrure de métal). Cette avancée technologique permettra la mise au point quelques années plus tard des batteries Li-ion et ouvrira un large champ de recherche sur les matériaux constitutifs des électrodes. Ce champ reste aujourd'hui encore très fertile pour améliorer la performance des batteries notamment en densité de puissance, densité d'énergie et rapidité de charge (aujourd'hui, la R&D s'intéresse en particulier aux anodes d'insertion au silicium)

Le Ni-MH convient pour toutes les utilisations, et plus particulièrement pour un usage de faible puissance et de longue durée.

Il est plus cher que le Ni-Cd mais offre une densité massique plus importante.

Il présente le désavantage d'avoir une autodécharge importante et exige un chargeur « intelligent » capable notamment de détecter lorsque la batterie est chargée et de couper alors la charge. En effet, le Ni-MH ne supporte pas les dépassements de charge.

Enfin les batteries Ni-MH ne doivent pas être déchargées complètement.

Très utilisées sur les premiers véhicules électriques et longtemps préférées par Toyota<sup>11</sup> sur ses véhicules hybrides pour des questions de sécurité, la technologie Ni-MH tend aujourd'hui à disparaître progressivement sur ce marché où le Li-ion s'impose largement.

Les batteries Ni-MH conservent une place dans le secteur des équipements portables (Outillage, laptop, tel mobile, caméra, appareils photos...) mais sont fortement concurrencées par le Li-ion dont la part de marché augmente régulièrement grâce à une meilleure densité d'énergie massique et une baisse de prix régulière.

Le recyclage des batteries Ni-MH est réalisé par pyro-métallurgie selon des procédés éprouvés dans des installations strictement industrielles et souvent compatibles avec le traitement de batteries Li-ion.

#### **1.2.5.4 Li-ion**

La batterie Li-ion a été mise au point en 1978 et commercialisée à partir de 1991.

Cette technologie offre une large diversité en utilisant des composants variés pour constituer la cathode (LCO à dominante Cobalt; LMO à dominante Manganèse, NMC avec Nickel – Manganèse – Cobalt, NCA avec Nickel – Cobalt – Aluminium, LFP avec Lithium – Phosphate de Fer). Les batteries Li-ion ont l'avantage d'avoir une densité d'énergie massique élevée, ce qui en fait la technologie privilégiée pour les applications mobiles. Elles peuvent également proposer des densités de puissance beaucoup plus élevées que toutes les autres technologies.

---

<sup>10</sup> Source Institut du Nickel : <https://www.nickelinstitute.org/>

<sup>11</sup> Toyota continue toutefois à commercialiser une partie de ses véhicules avec des batteries Ni-MH (en Europe notamment) pour des raisons de coûts.

Les batteries Li-ion travaillent donc aussi bien en puissance qu'en énergie avec des durées de vie relativement longues. D'où une utilisation également adaptée en multiservices sur les réseaux électriques.

Enfin, elles ont une faible autodécharge.

Le prix de la technologie Lithium a baissé de manière drastique au cours des dernières années<sup>12</sup>, ce qui favorise son développement.

En revanche, les technologies à base de Lithium sont plus « capricieuses » et doivent être dotées d'une électronique de pilotage (BMS – Battery Management System) permettant de couper la batterie lorsqu'elle sort de sa zone de fonctionnement (car elle présente alors des risques d'emballement thermique pouvant être à l'origine d'explosion ou d'incendie). Il faut en particulier éviter les surcharges, décharges rapides ou courts-circuits ce qui impose une recharge contrôlée et donc un chargeur performant et adapté.

De plus, ce type de batteries ne supporte pas les chocs trop violents et son intégrité doit être préservée pour éviter les risques de départ de feu lié à la libération de l'électrolyte, très inflammable et qui peut dégager des gaz toxiques (chlorés, fluorés) au contact de l'air et de l'eau.

La technologie Li-ion a accompagné le fort développement de l'électronique portable (téléphones mobiles, tablettes, laptop...). Elle s'impose aujourd'hui sur la plupart des secteurs en développement et notamment celui de la mobilité (VEH, VAE, Etc...) et des systèmes stationnaires industriels (EnR industriels, stockage multiservices sur réseaux électriques). Les batteries Li-ion viennent concurrencer le Ni-Cd voire les batteries Plomb-Acide sur les applications en secours et commencent même à entrer sur le marché des équipements de lavage et manutention jusqu'ici réservé à la technologie Pb/acide.

La technologie Li-ion vient enfin concurrencer le Ni-MH sur les applications portables (outillage électroportatif, photo/vidéo... etc) où il avait remplacé le Ni-Cd.

Avec des performances supérieures aux autres technologies dans presque toutes les configurations d'utilisation, les progrès en matière de sécurité mais surtout la baisse des coûts significative au cours des 10 dernières années ont largement favorisé son développement.

Aujourd'hui les marges de progrès supplémentaires liées à la chimie des batteries lithium ion semblent relativement limitées à part dans le champ des électrolytes solides (et les anodes au silicium).

En revanche, il existe des axes d'amélioration dans le domaine de l'ingénierie d'assemblage des packs : réduction des matériaux passifs, système de refroidissement à l'air plutôt que liquides, optimisation du BMS.

Le recyclage des batteries Li-ion fait appel à des procédés existants et en cours de développement qui seront abordés plus en détail dans la suite de l'étude.

#### **1.2.5.5 Na-S**

Les batteries Sodium-Soufre ont été mises au point par Ford Motor Company dans les années 60. Les brevets ont ensuite été cédés à l'entreprise japonaise NGK INSULATORS Ltd qui a relancé un programme de recherche à partir de 1984 pour atteindre un développement commercial au début des années 2000. NGK est aujourd'hui le seul fabricant mondial de ce type de batteries.

---

<sup>12</sup> Bloomberg New Energy Finance indique un prix moyen de 273 USD/KWh en 2016 alors qu'il était de l'ordre de 1000 USD/ KWh en 2010 (The changing landscape of batteries manufacturers – James Frith – BNEF – Batteries congress – Nice 2017)

Avec un potentiel standard de réduction parmi les plus élevés (2,71 V), et une faible masse atomique le Sodium comme le Lithium présente un réel intérêt pour la conception de batteries. En effet, les batteries Na-S proposent une densité d'énergie massique relativement élevée (100-110 Wh/kg) et le Sodium a l'avantage d'être plus abondant et moins cher que le Lithium.

Les batteries Na-S ne sont pas très performantes sur les applications en puissance (Voir diagramme de Ragone) mais parfaitement adaptées pour du stockage de grande capacité sur réseau électrique où la part d'électricité provenant de sources d'énergies intermittentes augmente.

Elles restent cependant complexes à mettre en place et nécessitent un haut niveau d'expertise technique. En effet c'est une batterie chaude dont la température de fonctionnement se situe entre 290°C et 390 °C ce qui réduit également son rendement (puisque une partie de l'énergie stockée est utilisée pour son maintien en température). Son principe est d'utiliser des électrodes liquides sous formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de soufre (pôle positif). L'électrolyte solide intermédiaire est une céramique (Beta Alumine).

Les batteries Na-S, avec une capacité installée à l'échelle mondiale de 530 MW (3700 MWh) sur plus de 200 sites<sup>13</sup> (essentiellement situés au Japon) représentent aujourd'hui le principal mode de stockage électrochimique sur réseau avec près de 50 % des capacités. Un démonstrateur de 1MW est installé depuis 2010 à la Réunion<sup>14</sup> (France). Un autre de 4MW au Texas (USA). Les autres technologies utilisées sont les batteries Plomb/acide, Ni-Cd, Li-ion qui gagnent des parts de marché, ainsi que les batteries à circulation qui restent encore peu utilisées, mais pourraient connaître un développement significatif à moyen terme sur ce marché.

En matière de recyclage, il n'existe aucune installation pour ce type de batteries. Dans la littérature, la seule référence identifiée sur le sujet<sup>15</sup> indique que le recyclage de ces batteries se heurte principalement à des contraintes économiques. Un procédé de recyclage (6 brevets déposés par NGK insulators entre 1992 et 1996 ont été identifiés) propose un broyage des batteries et la récupération d'une solution de polysulfure de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) par dissolution aqueuse. Cette solution est ensuite acidifiée pour générer du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ) qui est ensuite traité par le procédé de Claus<sup>16</sup> afin de récupérer le Soufre. A partir de la solution restante, on produit de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et de l'hydroxyde de sodium (NaOH). En laboratoire, le soufre ainsi récupéré peut être réutilisé dans la fabrication de cellules Na-S avec des performances équivalentes. Cependant, le procédé n'a jamais été industrialisé... NGK insulators étant le seul fabricant pour cette technologie, il est peu probable qu'une solution de recyclage puisse émerger sans son initiative.

### **1.2.6 Les systèmes de stockage électrochimiques alternatifs**

A côté des technologies qui dominent actuellement le marché (Pb/acide, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion et Na-S), il existe d'autres formes de stockage électrochimique.

Nous proposons d'aborder ces autres formes de stockage sous trois catégories :

- Les technologies de batteries connues et utilisées de manière marginale pour certaines applications spécifiques ou qui ont pu connaître dans leur histoire, un développement commercial mais sont aujourd'hui abandonnées ou en voie d'abandon (Cf. ANNEXE 3).
- Les technologies non matures faisant l'objet de travaux de R&D, que nous qualifions de « batteries du futur » car elles ne seront pas en mesure de connaître des applications commerciales de masse à moyen terme (Cf. ANNEXE 4).

<sup>13</sup> <https://www.ngk.co.jp/nas/why/history.html>

<sup>14</sup> Projet PEGASE (EDF)

<sup>15</sup> Used battery Collection and Recycling (De G. Pistoia, J.-P. Wiaux, S.P. Wolsky) - 2001

<sup>16</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Procédé\\_Claus](https://fr.wikipedia.org/wiki/Procédé_Claus)

- Les technologies émergentes, déjà commercialisées en quantité relativement faible (parfois à travers des démonstrateurs ou pilotes industriels) et qui pourraient connaître un développement commercial significatif dans les années à venir.

Concernant les deux premières catégories, nous avons considéré que la faiblesse des volumes (technologies marginales), ou leur absence (batteries du futur) dans les années à venir justifiaient leur exclusion du champ de l'étude car elles ne représentaient pas d'enjeu en matière de recyclage sur le moyen terme. Afin de faciliter la lecture de ce document, nous avons fait le choix de les aborder en annexes :

ANNEXE 3 : Les technologies de batteries peu commercialisées, abandonnées ou en voie d'abandon

ANNEXE 4 : Batteries du futur

En revanche, nous avons retenu trois technologies « émergentes » qui sont actuellement commercialisées en quantité relativement faible mais pourraient connaître un développement à moyen terme. Il s'agit des piles à combustible, des batteries Redox à flux (ou batteries à circulation) et enfin des supercondensateurs<sup>17</sup>. Nous proposons ici une présentation de ces technologies, une analyse de leur potentiel de développement et un commentaire concernant leur recyclage potentiel.

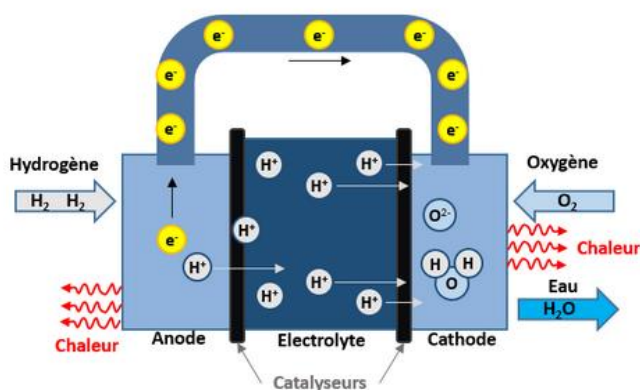
### 1.2.6.1 Piles à combustible

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. On parle de « combustion chimique »

Le combustible utilisé est toujours de l'hydrogène qu'il soit sous sa forme pure (H<sub>2</sub>) ou sous une autre forme constituant un réservoir d'hydrogène (par exemple un alcool ou un hydrocarbure). L'oxygène provient de l'air et sert de comburant.

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau.<sup>18</sup>

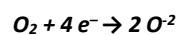
#### Principe de fonctionnement



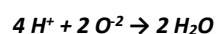
Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons (phénomène d'oxydation) qui vont créer le courant électrique.



D'autre part, au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit (phénomène de réduction)



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions oxygène et forment de l'eau.



**Fig 2** : Schéma de principe d'une pile à hydrogène

Source : <http://www.h2sys.fr/fr/technologies/pile-a-combustible/>

<sup>17</sup> Bien qu'étant des systèmes de stockage électrostatiques (et non électrochimiques) les supercondensateurs sont abordés dans cette étude car ils peuvent concurrencer les batteries sur certains marchés mais présentent également des similitudes au regard des enjeux techniques liés au recyclage.

<sup>18</sup> L'électrolyse de l'eau consiste à dissocier les molécules d'eau (H<sub>2</sub>O) en Dihydrogène(H<sub>2</sub>) et Dioxygène (O<sub>2</sub>) sous l'effet d'un courant électrique.

La pile à combustible est connue depuis le 19<sup>ème</sup> siècle. Son principe théorique est simple mais complexe et coûteux à mettre en œuvre, ce qui l'a longtemps cantonné à des applications de niche et en particulier dans l'industrie spatiale pour laquelle elle présente deux atouts majeurs : sa forte densité d'énergie massique ainsi que ses rejets qui se limitent à de l'eau.

La recherche dans le domaine a été relancée dans les années 90 en particulier par le secteur automobile, au même titre que la recherche sur les autres types de batteries afin de trouver une alternative aux moteurs thermiques.

### Impact environnemental

La technologie hydrogène bénéficie d'une image de « technologie propre » ce qui est vrai au regard de ses rejets (de l'eau) et de l'absence d'émissions de particules au même titre que les batteries.

Pourtant, c'est le mode de production de l'hydrogène qui reste déterminant pour évaluer l'intérêt environnemental d'une pile à hydrogène. En 2015 il est produit à plus de 90 % à partir de sources d'énergies fossiles (notamment par vaporeformage du méthane :  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ ).

Il peut également être produit par électrolyse de l'eau. Dans ce cas, si l'électricité nécessaire à cette opération est d'origine fossile, l'impact environnemental de la pile à hydrogène reste négatif.

La solution hydrogène devient compétitive sur un plan environnemental seulement si l'hydrogène est produit par électrolyse et si cette électrolyse est réalisée à partir d'électricité provenant d'EnR, voire à partir de surplus d'électricité provenant d'EnR.

Cependant l'hydrogène produit par vaporeformage du méthane coûte environ 4 fois moins cher que par électrolyse.

De plus, le rendement de l'électrolyse étant d'environ 70 % et le rendement d'une pile à hydrogène étant à peine supérieur à 50 %, les détracteurs de la pile à hydrogène s'interrogent sur l'intérêt de consommer de l'électricité pour fabriquer de l'hydrogène qui sera à nouveau transformé en électricité (Avec un rendement global de 35 %) alors que l'électricité première aurait pu tout simplement être utilisée pour charger une batterie classique (dont le rendement est au moins égal à 70 %).

### Coût

Le principal handicap de la technologie hydrogène reste son prix. En effet, à l'achat, un véhicule à pile à hydrogène coûte actuellement 3 à 4 fois plus cher qu'un véhicule électrique. Même si le coût de fabrication des piles à hydrogène peut être encore réduit (en essayant notamment de se passer de catalyseur à base de platine), ce n'est qu'à travers des économies d'échelle<sup>19</sup> obtenues grâce à une production de masse que cette technologie pourrait éventuellement devenir compétitive sur le marché des véhicules.

### Mise en œuvre technique/sécurité

Sur un plan technique, la pile à hydrogène pose encore d'autres problèmes liés au transport et au stockage d'hydrogène. En effet, l'hydrogène doit être stocké dans des réservoirs sous haute pression (350 à 700 bars) qui génèrent des contraintes de sécurité d'autant plus que l'hydrogène est fortement inflammable à l'air.

Le stockage sous une autre forme que de l'hydrogène pur, aide à résoudre ces problèmes mais en génère d'autres au niveau des rejets. En effet, si la combustion d'hydrogène pur ne rejette que de

---

<sup>19</sup> Les défis de la voiture à hydrogène – Kheira Bettayeb (CNRS-Le journal 08-03-2017)  
<https://lejournald.cnrs.fr/articles/les-defis-de-la-voiture-a-hydrogene>

l'eau, son utilisation sous forme d'alcool ou d'hydrocarbure génère pour sa part des émissions de CO<sub>2</sub>.

Enfin, le développement de la voiture à pile à hydrogène nécessite une infrastructure de transport et de stockage (pour l'hydrogène) mais aussi une infrastructure de recharge qui est particulièrement coûteuse, au même titre que l'infrastructure de recharge nécessaire pour le véhicule électrique à batterie.

### Potentiel de développement

Malgré les atouts potentiels de la pile à hydrogène (abondance de l'hydrogène, rapidité de charge, autonomie), la compétition avec les batteries Li-ion semble définitivement perdue sur le terrain du véhicule électrique qui est le seul marché potentiel suffisamment important pour permettre de réaliser les économies d'échelle nécessaires à sa compétitivité.

En effet, depuis l'arrivée des véhicules à piles à hydrogène sur le marché en 2013 (seuls Honda, Hyundai et Toyota commercialisent aujourd'hui un modèle destiné au grand public) seules 6 500 immatriculations ont été enregistrées<sup>20</sup> dans le monde (dont près de la moitié en Californie). Alors que les véhicules à batteries ont atteint en 2017 plus de 1 millions d'unités vendues (pour un parc roulant évalué à environ 3 Mi d'unités). Il s'agit essentiellement d'opérations de démonstrations, fortement subventionnées à l'intention de « flottes captives ».

Si on considère le montant des investissements nécessaires pour le développement d'une infrastructure de recharge/stockage dédiée au véhicule hydrogène, il y a peu de chance que deux infrastructures (en grande partie financées par de l'argent public) puissent cohabiter. Or on peut constater que le choix stratégique en faveur des véhicules à batteries est déjà fait.

Le « conseil de l'hydrogène » créé à DAVOS en 2017 qui a rendu son premier rapport en Novembre 2017 affirme que le développement d'une économie de l'hydrogène nécessite 20 à 25 Mds de \$ d'investissement par an jusqu'en 2030<sup>21</sup>. La vision développée par les membres du conseil (qui sont des entreprises de taille mondiale dans le domaine de l'automobile, l'énergie ou encore la liquéfaction) sonne plus comme une succession de vœux pieux que comme un programme industriel. D'autant plus que certains d'entre eux annoncent en parallèle la réduction de leurs investissements dans ce domaine.

Ainsi Daimler, Toyota ou Mercedes qui ont beaucoup investi sur la technologie hydrogène annoncent la réduction de leurs ambitions voire un abandon de leurs programmes<sup>22</sup>. Volvo a officiellement annoncé qu'il n'investirait pas sur cette technologie. En France, les constructeurs automobiles ne participent pas aux efforts de recherche financés par les pouvoirs publics.

A moyen terme, la pile à hydrogène a peu de chance de venir concurrencer les batteries sur des applications de masse d'autant plus que la technologie de batteries Li-ion poursuit sa dynamique de baisse de prix, d'amélioration de sa sécurité et de ses performances (en densité d'énergie, durée de vie) la rendant toujours plus compétitive. Ne pouvant bénéficier des économies d'échelles associées à ces marchés, la technologie de pile à hydrogène restera probablement chère.

Cependant, l'hydrogène reste un mode de stockage d'énergie qui peut avoir de la pertinence en stockage de grande capacité sur réseau électrique mais surtout en stockage de longue durée (car une fois stocké, il n'y a pas de dégradation énergétique de l'hydrogène). Notamment sur sites insulaires pour lisser la production et faciliter l'intégration des EnR au réseau électrique. Dans ce domaine, AREVA propose la Greenery Box<sup>TM</sup>, qui est un système incluant un électrolyseur et une pile à

<sup>20</sup> <http://www.greencarcongress.com/2018/02/20180208-it.html>

<sup>21</sup> Hydrogen Scaling up – Hydrogen Council Novembre 2017

<http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>

<sup>22</sup> [www.techniques-ingenieur.com](http://www.techniques-ingenieur.com) du 10/04/2017

hydrogène. Lors des pics de production, les surplus d'électricité sont utilisés pour l'électrolyse, l'énergie électrique excédentaire est stockée sous forme d'hydrogène. Cet hydrogène alimente ensuite la pile à combustible pendant les pics de consommation.

AREVA propose des installations modulaires de 20 à 100 KW de puissance. Un démonstrateur commercial est installé en Corse depuis 2012 (Projet MYRTE).

### Recyclage<sup>23</sup>

Le principal enjeu concernant le recyclage des piles à hydrogène est lié au Platine qu'il s'agit de récupérer. Ce métal est le principal composant du catalyseur permettant l'échange de protons au travers des « membranes catalytiques ».

Le platine est un métal très cher (25 000 € / Kg). Une pile à combustible de 80 KW en contient entre 30 et 40 g.

Le réemploi présente peu d'intérêt car la membrane catalytique qui représente le cœur de la pile est toujours endommagée en fin de vie.

Le démantèlement qui a pour but d'isoler les cellules doit intégrer des problématiques de sécurité spécifique liées au stockage d'hydrogène.

Ensuite, le procédé de recyclage doit isoler la membrane d'échange qui contient le platine. Cette membrane est en Nafion® (un fluoro polymère), susceptible de dégager du fluorure d'hydrogène (acide fluorhydrique - HF) particulièrement corrosif lors du recyclage. Plusieurs brevets ont été déposés (Umicore, BASF catalysts, Daimler...) mais à ce jour, aucun procédé n'a dépassé le stade du laboratoire.

Actuellement, rien ne peut garantir que les procédés de recyclage brevetés puissent être industrialisés, de nombreuses incertitudes demeurent sur les plans technique, économique (rentabilité des procédés) et environnemental (mesure des impacts). La faiblesse des volumes ne permet pas d'investir dans de tels procédés à échelle industrielle.

#### **1.2.6.2 Batteries à circulation (Redox Flow batteries)**

Le principe d'une batterie à circulation est le même que celui des batteries classiques. Il repose sur une réaction d'oxydation et une réaction de réduction au niveau de chacune des électrodes.

La particularité des batteries à circulation vient du fait que les réactifs sont en solution dans deux électrolytes différents, ils sont donc stockés dans deux réservoirs séparés et circulent dans deux demi-cellules étanches (la cellule anodique et la cellule cathodique)

Ces dernières sont séparées par une membrane semi-perméable qui autorise le passage des ions communs aux deux électrolytes (protons H<sup>+</sup>). Des pompes assurent la circulation des électrolytes afin de renouveler chaque réactif à la surface de l'électrode correspondante.

L'électrolyte circulant joue un rôle caloporteur, ce qui limite les risques d'échauffement de la batterie.

Mais le principal avantage provient du stockage de l'électrolyte à l'extérieur de la cellule électrochimique. Ceci permet de découpler la puissance disponible (qui dépend de la cellule électrochimique et plus particulièrement de la surface d'échange des électrodes, la perméabilité de la membrane et le flux d'électrolyte circulant) et la quantité d'énergie stockée (qui dépend de la quantité

---

<sup>23</sup> « Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling » (Rikka Wittstock Alexandra Pehlken and Michael Wark – université de Oldenburg) Décembre 2016



d'électrolyte disponible et donc uniquement de la taille des réservoirs). Les batteries à circulation apportent donc une grande flexibilité sur le dimensionnement et peuvent se positionner aussi bien sur des systèmes en puissance qu'en énergie.

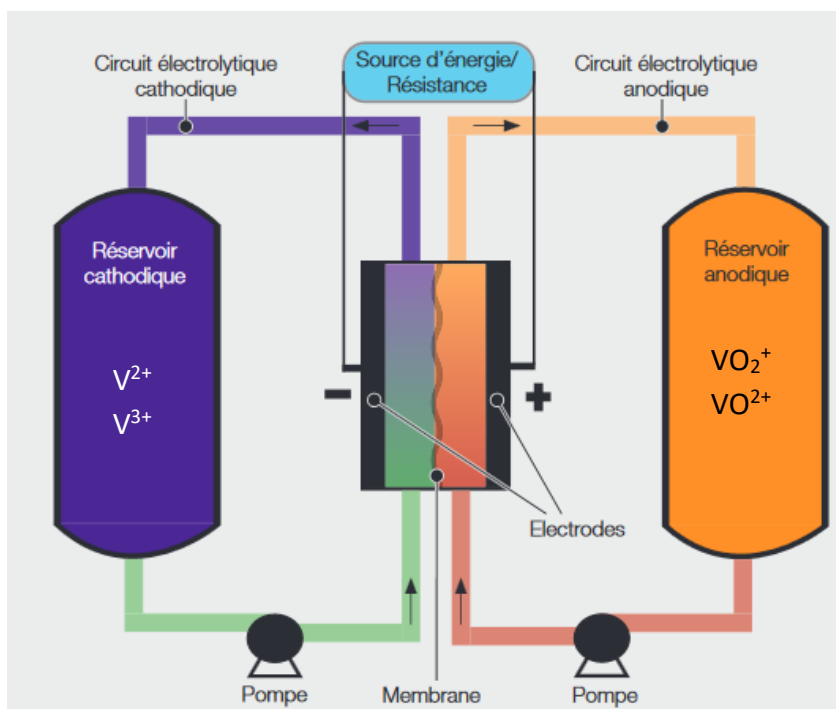
Les électrodes sont généralement basées sur des matériaux carbonés (feutre de graphite). La technologie la plus mature a été brevetée en 1989 (Brevet Australien) et utilise le Vanadium, dissous dans de l'acide sulfurique pour les deux solutions électrolytiques. Ceci est rendu possible par le fait que le vanadium existe dans quatre états d'oxydation ( $V^{2+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $VO_2^+$ ,  $VO^{2+}$ ) et peut former ainsi 2 couples redox :  $V^{2+}/V^{3+}$  (cathode) et  $VO_2^+/VO^{2+}$  (anode).

D'autres technologies font l'objet de recherche : Zinc-Cerium, Brome-Polysulfure, Chrome-Fer, Zinc-Brome.

Parmi elles, la batterie à flux Zinc-Brome mise au point par EXXON au début des années 1970 offre une densité d'énergie plus importante que les batteries au vanadium. C'est une batterie à flux dite hybride car un des composants électro-actif (dans ce cas le zinc) est sous forme solide et non stocké en solution. Cette technologie fait l'objet de plusieurs installations commerciales dans le monde mais la toxicité et la nature très corrosive du brome ainsi que la formation de dépôts solides de zinc (dendrites) pouvant percer la membrane séparatrice constituent des freins importants à son développement.

La batterie à flux au vanadium reste aujourd'hui la technologie la plus avancée. Le fait d'utiliser des espèces ioniques du Vanadium dans les deux électrolytes présente l'avantage de ne pas endommager le système en cas de contamination au travers de la membrane, ce qui n'est pas le cas pour les autres types de batteries à circulation.

### Principe de fonctionnement



*A noter que pour les batteries redox, les termes « anodique » et « cathodique » se réfèrent toujours à la phase de charge.*

*Lors de la décharge, il y a libération d'électron (oxydation) au niveau de l'électrode négative,*



*Et gain d'électrons au niveau de l'électrode positive (réduction)*



*Les protons hydrogène traversent la membrane de la chambre cathodique vers la chambre anodique.*

**Fig 3** : Principe de fonctionnement d'une batterie à flux au vanadium

Outre l'avantage de sa modularité, la batterie à circulation au Vanadium a une très longue durée de vie (> 10 000 cycles / 10 à 20 ans) et une faible autodécharge.

De plus, le fait de rester déchargée pendant une longue période n'entraîne pas de dégradation. Et enfin, la batterie permet un mode de rechargement rapide par remplacement de l'électrolyte (ou plus lent par branchement à une source de courant).

Ces avantages en font un mode de stockage électrochimique qui apparaît particulièrement intéressant pour du stockage de longue durée et en grande capacité sur réseau électrique, malgré sa densité d'énergie massique relativement faible (10 à 20 Wh/Kg) qui n'est pas un obstacle majeur pour une utilisation en stockage stationnaire.

Un désavantage réside dans son rendement charge / décharge de 70 % qui est plutôt faible et s'inscrit dans le bas de la fourchette des différents types de batteries classiques.

#### Mise en œuvre technique / sécurité

L'architecture d'installation d'une batterie à circulation est compliquée du fait du système de pompage et de circulation des électrolytes. (En comparaison, une installation de batteries classique consiste simplement à assembler des packs en série ou parallèle).

Le milieu chimique très corrosif des électrolytes (très acide pour les batteries redox au vanadium), génère des contraintes de sécurité liées aux risques de fuites et des coûts importants sur la maintenance du circuit (pompes et canalisations).

La nature corrosive des électrolytes renchérit enfin les matériaux utilisables pour la membrane protonique.

La recherche dans le domaine des batteries à circulation se penche actuellement sur des composants hydrosolubles qui permettraient d'utiliser des solvants aqueux plutôt que des acides. L'université de Harvard a déposé des brevets dans ce domaine à partir de 2014 et la société Française Kemwatt a mis au point un prototype industriel présenté en 2016 de batterie à flux organique qui permet en outre une charge 1000 fois plus rapide qu'avec du vanadium. Le vanadium est remplacé par des quinones (composés organiques dérivés du benzène), non corrosifs et biodégradables ce qui est un avantage potentiel supplémentaire.

#### Cout

Selon les usages (réponse à la demande de pointe, distribution ou microgrid), les coûts d'une batterie à flux sont de l'ordre de 184 à 413 \$US /MWh.<sup>24</sup>

Ce cout a tendance à baisser avec la taille des installations. En effet, une fois l'installation réalisée, l'augmentation de capacité n'est liée qu'à l'augmentation de la quantité d'électrolyte.

#### Potentiel de développement

Les batteries à flux, du fait de leur cout et de leur modularité sont déjà concurrentielles vis-à-vis des technologies Li-ion pour le stockage en amont du réseau électrique.

Elles sont particulièrement adaptées pour les fortes capacités et pour des durées de stockage supérieures à 4-6 h.

Lazard<sup>22</sup> prévoit 5 à 8% de croissance par an pour ce type de batteries sur les 5 années à venir.

---

<sup>24</sup> Levelized cost of Storage Analysis – LAZARD November 2017  
<https://www.lazard.com/media/450338/lazard-levelized-cost-of-storage-version-30.pdf>

## Recyclage

Il n'existe aucune documentation concernant le recyclage des batteries à flux et la société Kenwatt sollicitée n'a pas répondu. Cependant, le fait que les composants principaux (réservoir, électrolytes, électrode et pompes) soient séparables lors du démontage est de nature à faciliter la réutilisation de chacun des composants ou leur recyclage (sous réserve de mise en œuvre des précautions nécessaires en matière de sécurité).

### **1.2.6.3 Supercondensateurs**

Bien que le stockage d'énergie dans un supercondensateur, comme dans une batterie, soit basé sur sa capacité à transférer et à stocker des ions en solution dans un électrolyte, un supercondensateur n'est pas une batterie.

#### Principe de fonctionnement

En effet, dans une batterie, des réactions chimiques déplacent les ions de l'électrolyte vers l'intérieur ou en dehors de la structure atomique de la matière composant l'électrode, entraînant un changement de degré d'oxydation du matériau, selon la phase de charge ou de décharge. Alors que, dans un supercondensateur, c'est un champ électrique qui entraîne les ions à se déplacer vers (ou depuis) la surface des électrodes. Il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction, les ions ne font que s'adsorber ou se désorber (se fixer ou se détacher) des électrodes sans aucune réaction chimique.

Alors que les batteries sont des systèmes de stockage électrochimiques, les supercondensateurs sont des systèmes de stockage électrostatiques.

L'absence de réaction chimique a un impact important sur la cinétique de charge et de décharge. Contrairement à une batterie, la vitesse de charge d'un supercondensateur est extrêmement rapide. De même pour sa vitesse de décharge qui donne aux supercondensateurs une très grande densité de puissance.

De même il n'y a pas de dégradation des électrodes et de l'électrolyte liée à une répétition (cyclage) de réactions chimiques. De ce fait la cyclabilité des supercondensateurs est elle aussi beaucoup plus importante que celles des batteries (près de 1000 fois plus importante).

En revanche dans une batterie, les ions sont stockés dans le volume des matériaux d'électrodes alors que le supercondensateur, ne stocke les ions qu'à la surface de ses électrodes, ce qui explique leur densité d'énergie massique beaucoup plus faible.

Les supercondensateurs sont composés d'électrodes à base de carbone.

L'électrolyte (qui ne sert ici que de solution pour les espèces ioniques) est liquide et peut avoir des natures différentes. Les supercondensateurs utilisent actuellement des électrolytes aqueux, organiques ou des liquides ioniques.

Aujourd'hui la densité d'énergie massique maximale atteinte par les supercondensateurs commercialisés est de 10 Wh/Kg. Pour augmenter la densité d'énergie massique, la recherche travaille sur la structure des électrodes afin d'augmenter leur surface, permettant ainsi à une plus grande quantité d'ions de s'y adsorber. Le développement des nanotechnologies et la mise au point d'électrode en graphène et nanotubes de carbone permettent d'envisager une amélioration de la densité d'énergie massique des supercondensateurs dans les années à venir.

### Mise en œuvre technique / sécurité

Les supercondensateurs offrent une sécurité plus grande que les batteries sous réserve du respect de certaines contraintes et règles lors de la phase de charge. Même si certains électrolytes peuvent être inflammables en dehors d'une plage de fonctionnement qui s'étale de -40°C à 65°C, l'absence de réactions chimiques complexes en fait des systèmes plus faciles à maîtriser de manière générale.

Le principal risque lié aux supercondensateurs est un risque électrique, au même titre qu'une batterie chargée.

### Cout

Même si le prix des supercondensateurs a baissé de manière très significative au cours des 15 dernières années, ils restent près de 10 fois supérieurs aux batteries Li-ion au regard de l'énergie fournie (en € / kWh).

En revanche, les supercondensateurs sont compétitifs pour des applications en puissance (en € / kW).

### Potentiel de développement

La grande cyclabilité des supercondensateurs permet de lisser efficacement la production électrique (les fluctuations de puissance) des parcs photovoltaïques et éoliens pour une meilleure intégration au réseau électrique.

Plutôt que d'envisager batteries et supercondensateurs comme des solutions concurrentes, il est plus pertinent de les considérer aujourd'hui comme des solutions complémentaires. En effet, la batterie peut être utilisée pour stocker une grande quantité d'électricité tandis que le supercondensateur, positionné en système d'énergie tampon, répond aux pics de puissance. On évite ainsi les sollicitations trop violentes sur la batterie qui altèrent sa durée de vie, tout en gagnant en puissance.

Les supercondensateurs peuvent également être utilisés sur tout type de véhicules (route et ferroviaire) pour les systèmes de récupération d'énergie lors du freinage ou pour alimenter les systèmes start & stop (voitures).

Enfin, des transports collectifs utilisent déjà des supercondensateurs plutôt que des batteries<sup>25</sup> (BlueTram de Bolloré, bus électriques en Chine, bus électrique à supercondensateur Watt System développé par la société française PVI - Power Vehicule Innovation). Dans ce cas, la faible capacité en énergie est compensée par une recharge fréquente, qui peut être réalisée à chaque arrêt pendant la montée/descente des voyageurs avec des bornes de recharges adaptées. La très grande cyclabilité et la rapidité de charge des supercondensateurs permettent un fonctionnement de ce type.

Sa capacité de réponse extrêmement rapide en fait une technologie adaptée pour les applications de très courtes durées.

### Recyclage

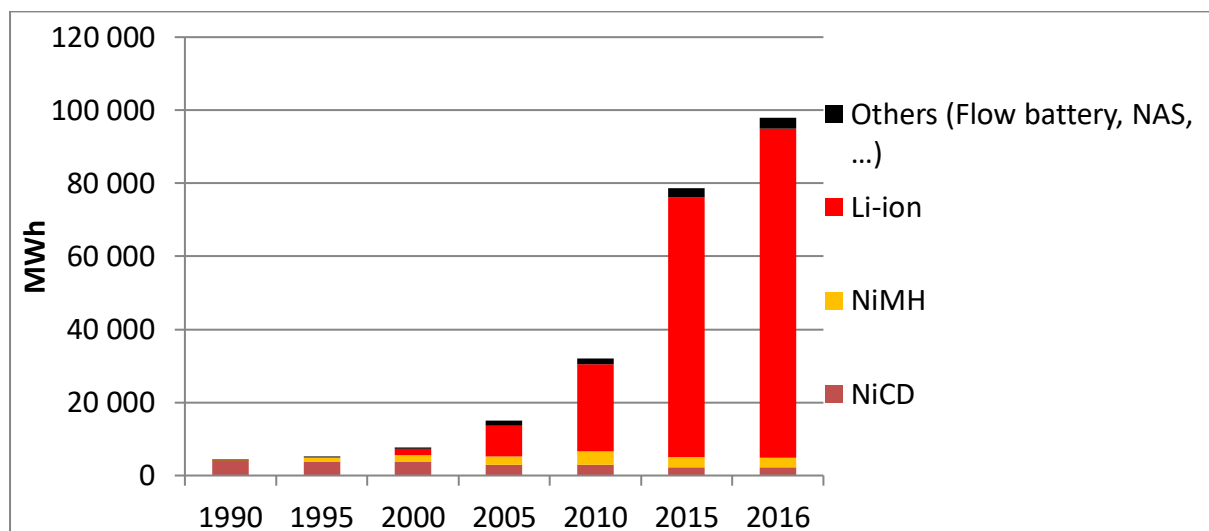
En matière de recyclabilité, c'est la nature de l'électrolyte qui sera déterminant. Les électrolytes aqueux ou organiques posent a priori peu de problèmes. Les liquides ioniques qui pourraient permettre d'améliorer la densité d'énergie des supercondensateurs restent à évaluer vis-à-vis de leur toxicité et de leur élimination.

---

<sup>25</sup> En réalité, ces véhicules intègrent également une batterie en secours pour éviter d'être immobilisé en cas de défaut ou d'impossibilité d'accès aux points de recharge.

### 1.3 Les grandes tendances du marché des applications et impact sur le marché des batteries

#### 1.3.1 Croissance du marché des batteries (1990 – 2016)



**Fig 4** : Evolution du marché mondial des batteries (Hors Plomb/acide)<sup>26</sup>

Le graphique ci-dessus illustre la part prépondérante prise par le Li-ion dans la croissance du marché mondial (Hors Plomb-acide) au détriment des autres technologies. La dynamique s'est poursuivie en 2017 avec une forte croissance des batteries Li-ion à 118 GWh (90 GWh en 2016).

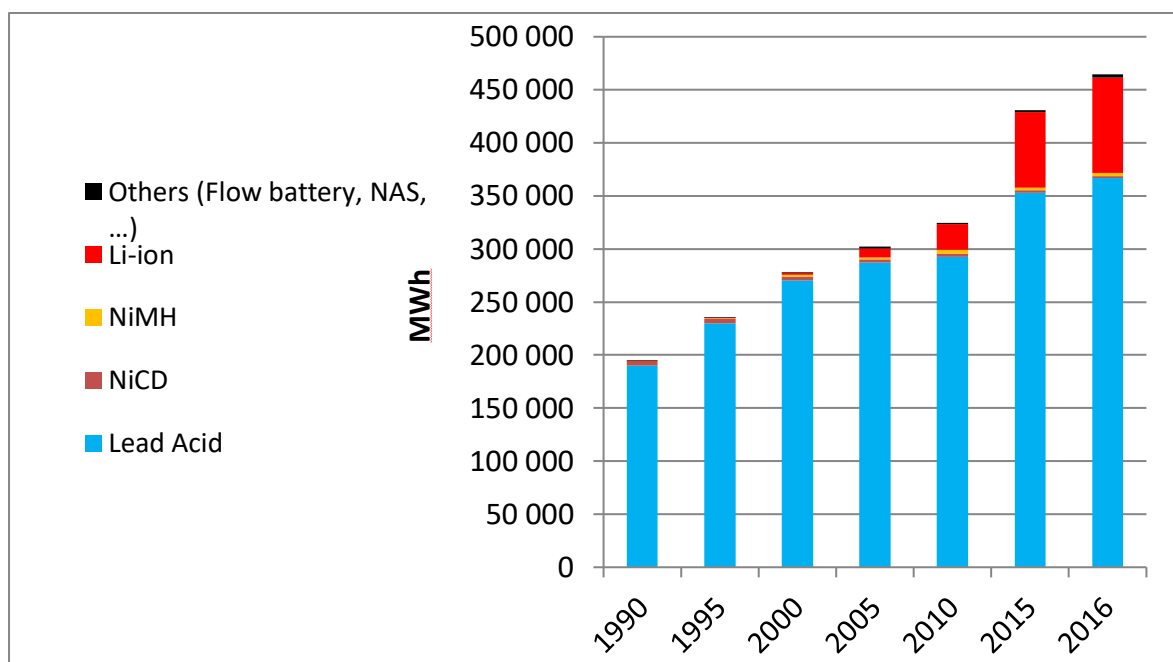
On peut noter la baisse du Ni-Cd à partir des années 2000 (du fait de restrictions d'utilisation) au profit du Ni-MH dans un premier temps (2010), partiellement remplacé par du Li-ion par la suite.

A partir de 2015, la part minoritaire des technologies Ni-Cd et Ni-MH semble stabilisée (les volumes se maintiennent en 2017).

On peut enfin noter sur ce graphique le développement de technologies alternatives... avec les batteries Na-S que nous avons déjà évoquées mais aussi les batteries à flux qui semblent également trouver leur place sur des applications de stockage de grande capacité.

Le graphique suivant, montre l'évolution globale du marché des batteries, cette fois-ci en intégrant la technologie Plomb-Acide. Même si les batteries Plomb /acide sont exclues du champ de l'étude, ce graphique a pour but de relativiser la croissance des batteries Li-ion sur le marché global des batteries. En effet, on constate que la technologie Plomb/acide reste largement prépondérante et sa dynamique de croissance au cours des dernières années démontre qu'elle le restera encore au moins à moyen terme. En effet, la technologie Pb/acide accapare encore une grande part de la croissance du marché mondial des batteries toutes applications confondues (en volume).

<sup>26</sup> Source AVICENNE ENERGY – Présentation au congrès batteries - Nice 2017



**Fig 5 :** Evolution du marché mondial des batteries<sup>27</sup>

### 1.3.2 Dynamiques de croissance en fonction des domaines d'applications

En revenant à la segmentation du marché proposée au chapitre 1.1, il est intéressant d'observer les dynamiques au sein des grandes familles d'application.

#### 1.3.2.1 Applications stationnaires en secours

Sur ce marché dont les clients sont principalement des professionnels et des industriels, les technologies Plomb/acide et Ni-Cd dominent largement. Au-delà des performances attendues (et la densité d'énergie massique n'étant généralement pas fondamentale ici), la facilité d'utilisation, la fiabilité et le prix sont les principaux critères de sélection.

Les technologies Li-ion ne présentent donc pas d'avantages déterminants sur ces applications. L'équilibre des parts de marché devraient rester relativement stable, sur un marché dont la croissance globale devrait être comparable à la croissance moyenne mondiale du secteur industriel.

#### 1.3.2.2 Applications stationnaires en cyclage

Ces applications concernent en très grande majorité le secteur du stockage de l'énergie sur des systèmes de productions à base d'EnR et/ou sur les réseaux de distribution.

Ces secteurs sont actuellement en pleine croissance et génèrent une demande pour les batteries Li-ion. En effet, Sur l'ensemble des projets de batteries à grande échelle (Parcs de production EnR, réseaux de distribution) mis en service en 2015, la part de marché du lithium-ion s'est établie à 90%<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> Source AVICENNE ENERGY – Présentation au congrès Batteries – Nice 2017

<sup>28</sup> BNEF Global Energy Storage Forecast 2016-2024

Sur les systèmes de production individuels (stockage en aval du compteur), eux-aussi promis à un fort développement les batteries plomb/acide restent privilégiées pour des raisons de prix et de facilité d'utilisation. La baisse des prix des batteries Li-ion pourrait favoriser cette technologie au détriment des batteries plomb /acide à moyen terme. Mais c'est surtout l'arrivée prochaine sur le marché d'une offre de batteries Li-ion en seconde vie avec des prix compétitifs qui pourrait modifier la situation. Toutefois, si ce phénomène entraîne un décalage de la fin de vie des batteries li-ion il ne créera pas une production supplémentaire. En revanche, il impactera la production de batterie plomb/acide qui perdront certainement des parts de marché sur ce segment. Le prix des batteries Li-ion en seconde vie sera un élément déterminant pour la croissance de ce marché.

Concernant les systèmes de stockage de grande capacité (> 1MW), les technologies Na-S, les batteries à circulation, les supercondensateurs, et les piles à combustibles semblent plus adaptées que le Li-ion. Chaque technologie ayant ses avantages et ses inconvénients en fonction des applications spécifiques (durée du stockage, lissage des pics de production/consommation, appel de puissance, modularité...). Ces technologies qui sont beaucoup moins sensibles à la chaleur que la technologie Li-ion peuvent également être intéressantes sur les micro-réseaux électriques en pays chaud ou ils ne nécessitent pas de conditionnement d'air, contrairement au Li-ion.

### **1.3.2.3 Applications mobiles : fonction secours**

Les technologies Plomb et Ni-Cd sont majoritaires pour les fonctions en secours dans les secteurs du transport. L'équilibre des parts de marché devrait rester relativement stable sur un marché en croissance. Ici encore, la fiabilité, la robustesse et la sécurité du Ni-Cd et du Plomb sont des éléments déterminants.

En revanche, le Li-ion s'impose de manière quasi unanime pour des applications mobiles de plus petite taille et dans un environnement contrôlé (secteur tertiaire).

Ainsi les dispositifs médicaux et les batteries d'appoint pour un usage individuel utilisent maintenant majoritairement la technologie Li-ion.

### **1.3.2.4 Applications mobiles : véhicules**

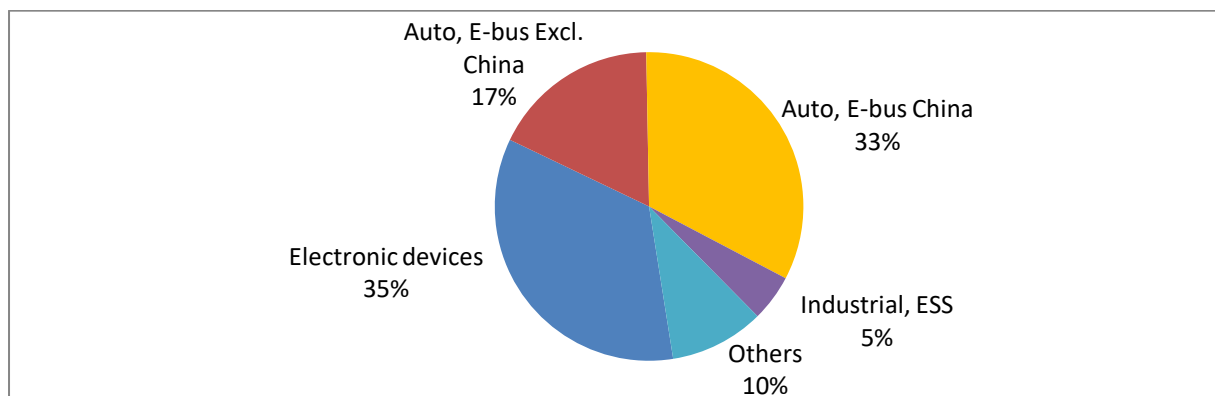
Le li-ion s'impose sur la plupart des segments de marché des véhicules électriques : véhicules tout électriques, véhicules hybrides, transports collectifs (bus électriques), voitures de golf... etc. Seul le secteur des transports collectifs expérimente encore quelques alternatives (supercondensateurs, pile à hydrogène...). Mais la domination du Li-ion favorise la baisse des prix liée à des économies d'échelle et accroît toujours plus son avantage sur les autres technologies rendant toujours plus difficile l'émergence d'une technologie concurrente à moyen terme.

A l'échelle mondiale, seules les solutions de mobilité électrique sur 2 roues (Véhicules à assistance électrique et dans une moindre mesure les scooters électriques), en croissance significative dans les pays en voie de développement peuvent encore utiliser des batteries au plomb, pour des raisons de coûts.

Encore très minoritaire dans ce secteur, le Li-ion commence même à concurrencer les batteries au plomb/acide sur les équipements de levage et manutention, les équipements de lavage industriel et les services aéroportuaires au sol.

Enfin, en Europe, les restrictions réglementaires accrues sur les batteries Plomb/acide ainsi que l'obligation pour les voitures de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à 95 g/km dès 2022 (associée à des pénalités financières de 95 € / g supplémentaire) pourraient favoriser l'utilisation de la technologie Li-ion pour les batteries de démarrage grâce au gain de poids qu'elle permet.

De manière générale, le secteur de la mobilité électrique est aujourd'hui le principal débouché pour les batteries Li-ion. 50 % des cellules de batteries lithium-ion produites en 2016 étaient destinées au marché des VEH et bus électriques, cette proportion va encore s'accroître à l'avenir.



**Fig 6** : Applications du Li-ion en 2016 (Marché total = 90 GWh)- Source AVICENNE ENERGY (2017)

### **1.3.2.5 Applications mobiles : équipements électroniques portables**

Le secteur des équipements portables utilise en grande majorité des batteries Li-ion. Ce secteur a bénéficié d'une très forte croissance à partir des années 2000, tiré notamment par la téléphonie mobile, les laptop et tablettes ainsi que les applications Bluetooth en général.

Après une augmentation importante du taux d'équipement, la croissance de ce secteur marque le pas depuis 2014 mais reste encore un des principaux débouchés pour les batteries Li-ion. En effet, 35 % des cellules de batteries lithium-ion produites en 2016 étaient destinées aux équipements électroniques nomades (fig 6)

### **1.3.2.6 Applications mobiles : autres fonctions en autonomie**

Cette catégorie d'application, dans laquelle on retrouve notamment les systèmes d'instrumentation en milieu industriel, le secteur du commerce (terminaux de paiement), les dispositifs médicaux et l'outillage sans fil est également en croissance et représente encore un débouché pour les technologies Li-ion.

### **1.3.2.7 Conclusion sur les dynamiques de marché**

On peut distinguer deux types de marchés en fonction de leurs dynamiques de croissance :

1. Les marchés concernant la fonction secours sur applications stationnaires et mobiles et la fonction de cyclage sur applications mobiles et autres fonctions en autonomie qui sont des marchés matures. La croissance globale du marché des batteries sur ces segments d'application devrait donc suivre la dynamique de croissance économique globale. En revanche, les parts de marché des technologies actuelles devraient évoluer avec un avantage pour le Li-ion au détriment du Plomb/acide et du Ni-MH et une stabilisation des parts de marché pour le Ni-Cd. A moyen terme, cette dynamique a très peu de chance d'être modifiée par l'émergence de technologies alternatives (voir chap suivant - 1.3.3) qui viendraient concurrencer la domination du Li-ion et du Plomb/acide.



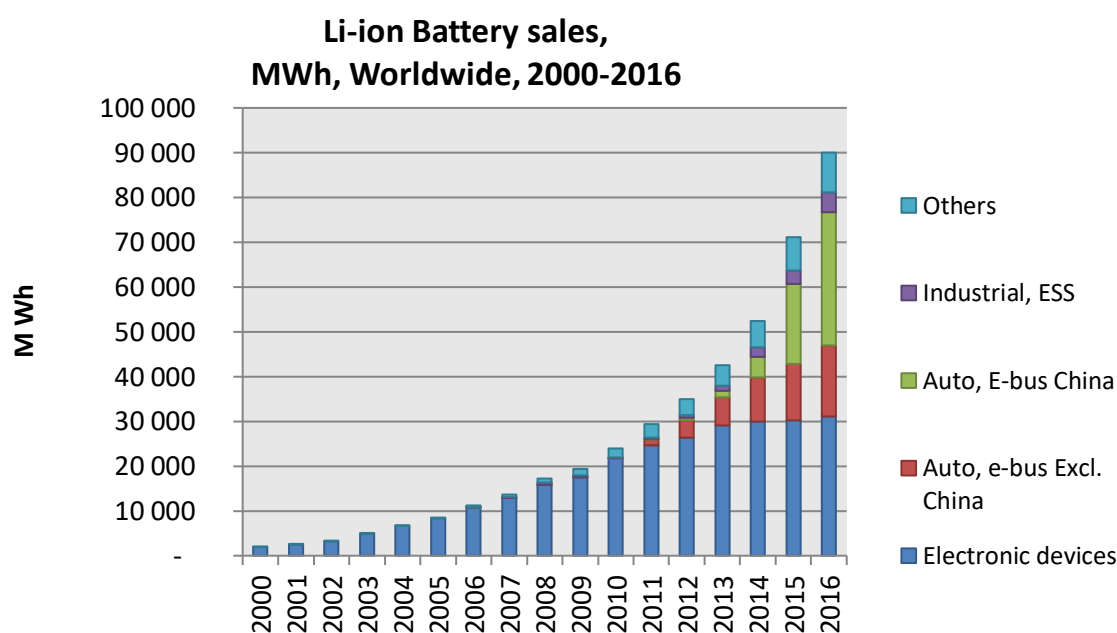
2. Les marchés de la mobilité électrique (VEH, VAE, Transports collectifs) ainsi que toutes les applications de stockage multiservices sur réseaux électriques (systèmes domestiques et industriels) sur lesquels on peut anticiper une croissance importante. Sur le marché de la mobilité électrique, les technologies Li-ion resteront très largement dominantes, la possibilité d'émergence d'une technologie concurrente étant quasi inexistante à moyen terme (voir chap suivant - 1.3.3).

Concernant les applications sur réseau électrique, même si la technologie Li-ion semble actuellement capter l'essentiel de la croissance, la multiplicité des services attendus et le niveau de maturité des technologies alternatives laissent entrevoir une place significative pour la technologie Na-S (qui a largement dominé le marché jusqu'ici et conserve près de 50 % des capacités installées), les batteries à circulation, voire piles à combustible et supercondensateurs notamment pour toutes les applications en « amont du compteur ». Les technologies Li-ion et Plomb/acide restent probablement dominantes sur les applications en aval du compteur (systèmes domestiques).

### 1.3.3 Dynamique de croissance de la technologie Li-ion et potentiel d'émergence de technologies concurrentes

#### 1.3.3.1 Bilan sur les 15 dernières années

Les chiffres d'évolution du marché des batteries Li-ion entre 2000 et 2016 communiqués par AVICENNE ENERGY (graphique ci-dessous) viennent illustrer et quantifier les dynamiques de croissance de cette technologie.



**Fig 7 :** Ventes de batteries Li-ion dans le monde 2000-2016  
Source: AVICENNE Energy 2017

**Others:** équipements médicaux, outillage sans fil (bricolage et jardinage), Vélo à assistance électrique (VAE)

**Industrial, ESS :** Levage et manutention, stockage sur réseau électrique, réseaux telecom, secours (éclairage de sécurité, transport, backup équipements industriels), équipements médicaux.

Même si les catégories d'analyse présentées dans ce graphique ne sont pas totalement alignées avec la segmentation que nous avons proposée, on y retrouve les principaux éléments de conclusions concernant le marché des batteries Li-ion à savoir que :

- Le marché est en forte croissance depuis 15 ans
- La croissance du marché des batteries Li-ion est essentiellement liée au développement des équipements électroniques portables jusqu'au début des années 2010 et atteint un palier à partir de 2014
- Le principal relais de croissance à partir de 2010 est lié au développement des VEH et bus électriques.
- Le Li-ion trouve également de plus en plus de débouchés sur l'ensemble des secteurs industriels que ce soit en secours, en cyclage, pour des applications mobiles ou stationnaires (catégories others et Industrial/Energy Storage System).

### **1.3.3.2 Potentiel d'émergence de technologies concurrentes**

Les progrès technologiques sur le marché des batteries sont lents (la densité d'énergie des systèmes électrochimiques a été multipliée par 5 à peine en 200 ans). Ceci est lié à la complexité des processus chimiques mis en jeu.

*« la mise au point de nouveaux dispositifs de stockage électrochimiques d'énergie, quels qu'ils soient, est un problème à plusieurs entrées, dont la complexité réside principalement (1) dans la formulation des électrodes, qui comprennent la matière active, un liant et un conducteur électronique, (2) dans le choix de la formulation de l'électrolyte liquide, gel ou polymère, mais surtout (3) dans la maîtrise des interfaces macroscopiques/microscopiques, qui sont les éléments clés de tout système électrochimique. Il va donc de soi que l'exercice allant de la conception du matériau de l'électrode à son utilisation dans un accumulateur nécessite une approche pluridisciplinaire, dans laquelle la chimie sous toutes ses formes – inorganique, organique ou chimie de surface – joue un rôle clé. »<sup>29</sup>*

La durée importante entre la mise au point d'une technologie et son développement commercial (Time to market) est démontrée par les faits sur les technologies les plus récentes :

Technologies	Mise au point	Commercialisation	Time to market (années)
Ni-MH	1975	1990	15
Li-ion	1978	1991	13
Li-Polymère	1979	1996	17

**Tab 4** : "Time to Market" des technologies récentes de batteries

Pour cette raison seule, les technologies non encore matures telles que Métal-Air, X-ion, Li-S (voir annexe 4 – Batteries du futur) peuvent difficilement prétendre concurrencer les technologies actuelles sur le moyen terme.

Mais il faut encore souligner que des investissements massifs ont déjà été réalisés au cours des dernières années sur la technologie Li-ion.

On constate ainsi que les investissements en R&D misent d'abord sur une amélioration des performances du Li-ion plutôt que l'émergence de technologies concurrentes. L'objectif prioritaire

<sup>29</sup> Jean Marie Tarascon (CNRS-RS2E) – Leçon inaugurale au collège de France (9/12/2010)

étant de fabriquer des batteries qui permettent de produire des véhicules électriques au prix d'un véhicule thermique (un véhicule électrique coûte environ 30 % de plus qu'un véhicule thermique et la batterie compte actuellement pour un tiers du coût total d'un véhicule électrique), et avec une autonomie comparable. En effet, le marché des véhicules électriques est vu à juste titre comme le principal vecteur de croissance du marché des batteries Li-ion<sup>30</sup>.

La R&D a donc fortement investi sur :

- ✓ L'amélioration de la densité énergétique pour augmenter l'autonomie des VEH,
- ✓ L'amélioration de la sécurité, même au prix d'une baisse de performance (technologie LFP), pour lever les réticences du marché sur ce point.
- ✓ L'augmentation de la rapidité de charge qui est un autre moyen de compenser une moindre autonomie (même si la répétition de cycles de charges rapides nuit dans tous les cas à la cyclabilité),
- ✓ L'utilisation de matériaux permettant de baisser le coût de fabrication.

Après la mise au point des batteries Li-ion NCA et surtout des différentes variantes de NMC, les marges de progrès liés aux matériaux constitutifs de la cathode sont maintenant réduites, la R&D se concentre aujourd'hui principalement sur la mise au point de batteries à électrolyte solide et dans une moindre mesure sur les anodes au silicium qui présentent une plus grande capacité d'insertion.

Mais les investissements concernent surtout les capacités de production. AVICENNE ENERGY indique que 10 à 12 Milliards de \$ US ont été investis entre 2011 et 2014 dans le monde pour la fabrication de batteries li-ion, correspondant à une capacité de production de 50 GWh.

7 Milliards de \$ USD supplémentaires ont été investis entre 2014 et 2017 par 3 acteurs : TESLA (5 Mds), BYD (1,2 Mds) et ATL (1 Mds).

D'après BNEF (Bloomberg New Energy Finance)<sup>31</sup>, 116 GWh de capacités de production de batteries Li-ion sont actuellement en commandes dans le monde et un total de 289 GWh supplémentaires sont annoncés pour 2030 par rapport à 2017.

Les investissements dans les capacités de production sont aujourd'hui, avant la R&D, le principal facteur de baisse du coût du Li-ion grâce aux économies d'échelle qu'ils permettent de réaliser. Et c'est avant tout le développement du marché des véhicules électriques qui sert de débouché aux batteries Li-ion.

Les deux déterminants du marché sont la performance et le coût. Le coût du Li-ion est aujourd'hui autour de 200 USD/KWh et offre encore quelques marges d'amélioration de performance aussi bien en matière de densité d'énergie que de sécurité (avec les technologies tout solide). BNEF estime que le coût pourrait encore décroître à 100 USD/KWh en 2025. Aujourd'hui aucune technologie concurrente n'offre un rapport coût performance équivalent dans le domaine des applications mobiles. Un hypothétique développement d'une technologie concurrente nécessiterait des investissements importants, captés aujourd'hui par la technologie Li-ion.

Pour les fabricants, les enjeux financiers sont considérables et ce n'est pas un hasard si ce sujet occupe une part importante dans le secteur automobile et les médias. En effet, imposer la technologie Li-ion sur un marché du véhicule électrique qui ne pèserait que 10 % du marché total des véhicules

---

<sup>30</sup> Si on considère qu'une batterie de VEH est dimensionnée en moyenne pour une capacité de 35KWh, la vente d'un million de véhicules électriques nécessite une capacité de production de batteries de 35 GWh !

<sup>31</sup> Présentation par James Frith au congrès de Nice le 5/10/2017

représente déjà un marché équivalent à près de 350 GWh<sup>32</sup>, soit quatre fois le marché actuel de toutes les batteries Li-ion !

Il est intéressant de noter que les investissements massifs déjà réalisés face à un marché du véhicule électrique qui décolle moins vite qu'espéré entraînent des surcapacités de production. Ceci semble expliquer le succès du Li-ion en matière de stockage sur réseau électrique, cette technologie s'étant octroyé 85 % des systèmes installés en 2015 dans le monde<sup>33</sup> alors que le poids et l'encombrement réduit du Li-ion sont ici des critères moins importants que le prix. Les fabricants feraient donc preuve d'une forte agressivité commerciale pour vendre leur surproduction<sup>34</sup>.

Le comportement des investisseurs et leur attente en matière de retour sur investissement est probablement encore un obstacle supplémentaire à l'émergence de technologies concurrentes au Li-ion dans les années à venir en particulier sur le marché des véhicules électriques qui est potentiellement le principal levier de croissance.

Les politiques publiques favorisent également le développement des VEH à batteries à travers le financement de l'infrastructure de recharge (investissements directs et incitations fiscales) ainsi que des mesures d'interdiction des voitures à moteurs thermiques (Norvège en 2025, Pays-Bas, Inde en 2030, France et Royaume Uni en 2040, Chine avec un calendrier qui reste à établir...)

Le Li-ion conservera donc son leadership sur la grande majorité des applications où il est utilisé aujourd'hui et notamment le VEH car c'est un choix technologique mais aussi industriel de la part des principaux acteurs publics et privés.

Les batteries Li-ion continueront (avec le Plomb) à s'accaparer la majeure partie de la croissance du marché des batteries. Selon Avicenne Energy, en 2016 le Li-ion s'arroge 30% des 60 Mds de \$ US du marché total des batteries. Et cette technologie a accaparé 60 % de la croissance en valeur du secteur au cours des cinq dernières années.

#### **1.4 Conclusion sur l'évolution du marché des batteries en volume**

Dans cette partie nous continuons à quantifier le marché des batteries par sa capacité de stockage (exprimée en GWh) qui est l'indicateur utilisé par les analystes. En revanche, lorsque nous aborderons la partie recyclage, nous proposerons des équivalences en poids pour évaluer le marché du recyclage en tonnes (voir § 4.4).

Ni-Cd :

Les dynamiques de marché sont identifiées. Les atouts spécifiques de la technologie Ni-Cd lui assurent des débouchés stables sur plusieurs segments du marché industriels, malgré les restrictions réglementaires sur son utilisation.

En 2016, le marché mondial des batteries Ni-Cd représente 2,2 GWh pour 1,5 Mds USD.

Ce marché devrait rester relativement stable sur les années à venir, voire évoluer à la hausse en suivant la progression des segments de marchés industriels qui utilisent cette technologie.

---

<sup>32</sup> Les données de l'OICA (Organisation Internationale des Constructeurs automobiles) indique que 94 Mi de véhicules (tous types confondus dont moins d'1 Mi de VEH) ont été vendus en 2016 (64 Mi en 2005) – Moins de 3 Mi de VEH sont en circulation dans le monde fin 2016 (0,1 % du parc en circulation de véhicules légers)

<sup>33</sup> La course aux batteries électriques – IFRI – Juillet 2017

[https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu\\_course\\_batteries\\_2017\\_0.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu_course_batteries_2017_0.pdf)

<sup>34</sup> <https://www.usinenouvelle.com/editorial/le-roi-li-ion.N473148> et

[http://m.lesechos.fr/redirect\\_article.php?id=0203704300561](http://m.lesechos.fr/redirect_article.php?id=0203704300561)

## Ni-MH

Les atouts spécifiques du Ni-MH lui assurent des débouchés stables sur quelques segments de marché. Cependant, cette technologie devrait encore se faire grignoter quelques parts de marché par le Li-ion sur certaines applications, notamment l'outillage sans fil.

En 2016, le marché mondial du Ni-MH représente 2,8 GWh / 1,5 Mds USD

Ce marché devrait évoluer légèrement à la baisse sur les années à venir

## Li-ion

Nous avons vu que l'utilisation de la technologie Li-ion est en forte croissance sur les 15 dernières années. Elle domine plusieurs segments de marché sur lesquels elle ne trouvera pas de technologie concurrente à moyen terme.

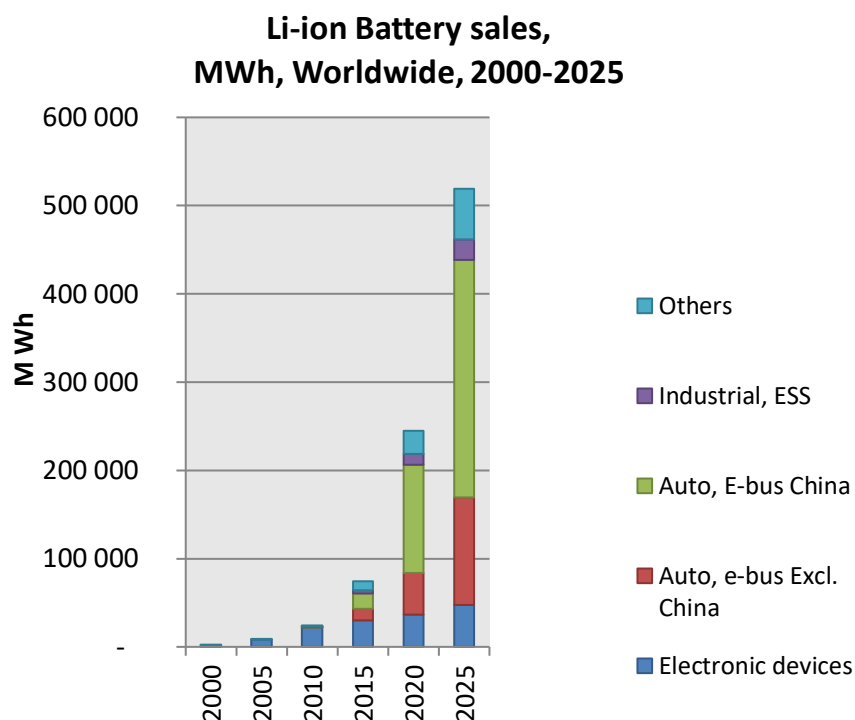
En 2017, le marché mondial des batteries Li-ion représente 120 GWh pour près de 40 Mds USD. (dont 70 GWh pour la mobilité électrique, 30 GWh pour les équipements électronique portable et 20 GWh pour le reste).

Le Li-ion va continuer à gagner des parts de marché (sur le Ni-MH et le Plomb/acide) sur certains segments d'applications (outillage sans fil, levage et manutention...) dont la maturité limite le potentiel global de croissance.

Le Li-ion devrait également se développer sur le stockage stationnaire de petite capacité (notamment en aval du compteur) mais ce marché ne devrait pas représenter plus de 10% du volume des ventes par rapport au marché de la mobilité.

C'est la croissance annoncée du marché des VEH qui sera le principal vecteur de croissance. C'est donc lui qui détermine également la trajectoire de performance et de coûts des batteries Li-ion.

D'après AVICENNE ENERGY, le marché global des batteries Li-ion pourrait atteindre 520 GWh en 2025. Nous verrons cependant dans la partie prospective que cette estimation nous semble plutôt optimiste et surestime notamment la croissance du marché des VEH. Les scénarii que nous étudierons évoluent entre 365 GWh et 408 GWh en 2025.



**Fig 8** : les prévisions de ventes de batteries Li-ion en fonction des segments d'application  
Source Avicenne Energy – Congrès de Nice Octobre 2018

### Na-S / batteries à circulation

La technologie Na-S reste la plus utilisée pour le stockage de grande capacité (> 1MW) sur réseau électrique. Les batteries à circulation devraient trouver leur place sur ce marché grâce à leur modularité.

Ces technologies sont particulièrement adaptées pour les systèmes insulaires, sites isolés et micro-grids.

En 2016, le marché mondial sur ce type de batteries représente 3 GWh pour 1,6 Mds USD et la mise en service de la même capacité est d'ores et déjà contractualisée d'ici fin 2019.

Dans une étude parue en Novembre 2017 et concernant l'analyse des coûts de stockage d'énergie Lazard<sup>35</sup> prévoit 5 à 8% de croissance par an pour le marché des batteries à flux sur les 5 années à venir.

### Piles à combustible et Supercondensateurs

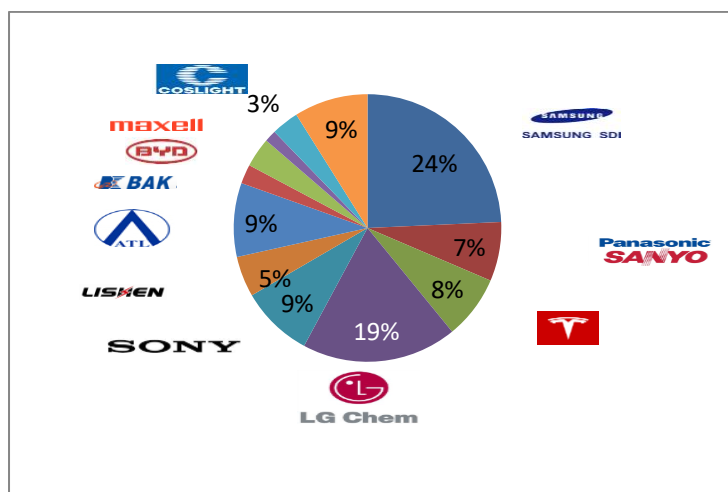
Le marché des piles à combustibles et des supercondensateurs devrait connaître une progression lente. Ces technologies n'ayant pas trouvé leur marché sur la mobilité électrique face au Li-ion, elles sont encore chères et devraient rester cantonnées en tout cas à moyen terme sur des applications spécifiques à vocation essentiellement démonstratives.

<sup>35</sup> Levelized cost of Storage Analysis – LAZARD Novembre 2017  
<https://www.lazard.com/media/450338/lazard-levelized-cost-of-storage-version-30.pdf>

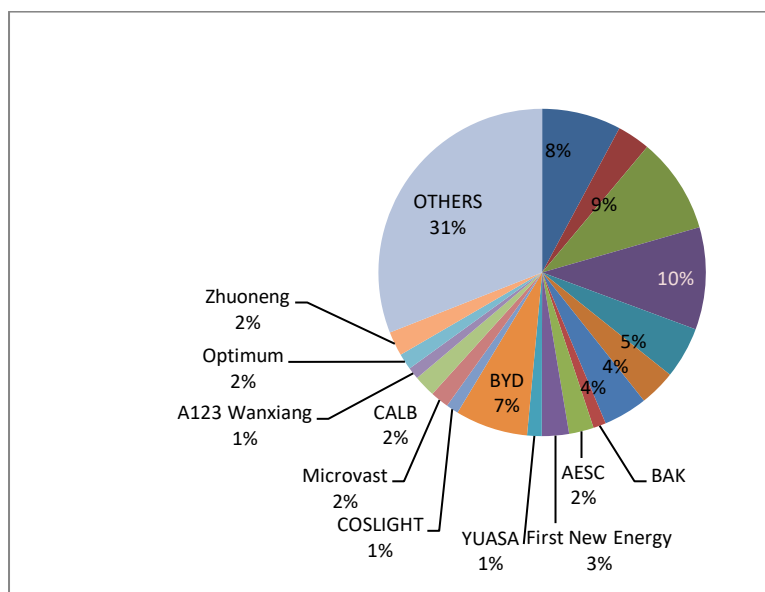
## 1.5 Les acteurs du marché des batteries

Les graphiques suivants montrent les parts de marché en volume et en valeur des leaders sur le marché de la fabrication des batteries Li-ion (Source AVICENNE ENERGY – Congrès de Nice 2017).

(NB : En 2018, les parts de marché des fabricants Chinois se sont encore accrues<sup>36</sup>)



**Fig 9** : PDM Li-ion - marché total 6,4 Mds de cellules en 2016



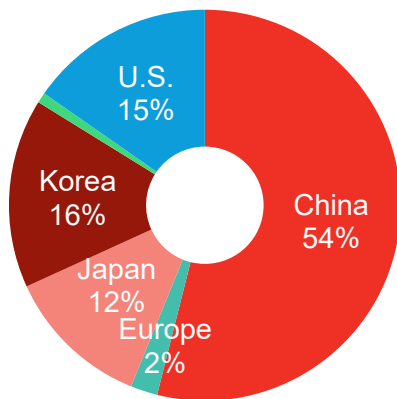
**Fig 10** : PDM Li-ion – marché total 31 Mds de USD en 2016

Le marché mondial de la fabrication des batteries est largement dominé par le continent asiatique et notamment par la Chine. Ceci est particulièrement vrai pour les batteries Li-ion qui génèrent des investissements massifs sur les dernières années. Au regard des plans d'investissement, le déséquilibre devrait encore s'accroître dans les années à venir comme le montrent les prévisions de BNEF (présentation au congrès de Nice – octobre 2017)

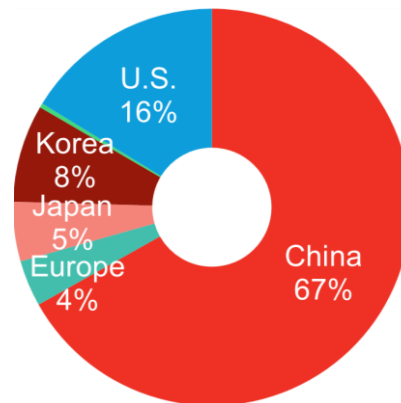
Fabricants	Pays d'origine
Samsung SDI	Corée du Sud
LG Chem	Corée du Sud
Panasonic-sanyo	Japon
Sony	Japon
Tesla	US
CATL	Chine
BYD	Chine
BAK	Chine
Lishen	Chine
Maxell	Japon
Coslight	Inde
AESC	Japon
First New Energy	Chine
YUASA	Japon
Microvast	Chine
CALB	Chine
A123	Chine
Zhuoneng	Chine

**Tab 5** : pays d'origine des principaux fabricants de batteries Li-ion

<sup>36</sup> <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20190208000483>



**Fig 11** : Répartition des capacités de production de batteries Li-ion sur un total de **116 GWh** en production ou en construction **en 2017**



**Fig 12** : Répartition des capacités de production de batteries Li-ion sur un total de **289 GWh** annoncées (incluant les prévisions d'investissements) **en 2021**

Malgré les capacités excédentaires actuelles de production de batteries Li-ion, le marché continue à parier sur une croissance importante des VEH (et EnR dans une moindre mesure) et les fabricants poursuivent leur politique d'investissement massif.

La domination des entreprises asiatiques sur le marché des batteries Li-ion est fortement liée à des stratégies nationales, elles-mêmes portées par des politiques publiques de soutien financier et d'emménagement du cadre réglementaire.

Pour tous les pays leaders, le soutien à un développement du marché domestique contribue fortement à l'émergence de champions nationaux qui s'imposent ensuite sur le marché mondial.

Ainsi la situation insulaire du Japon, la mise à l'arrêt et le lent redémarrage de sa production d'électricité d'origine nucléaire suite à la catastrophe de Fukushima a nécessité un développement rapide des EnR. Le gouvernement a mis en place des politiques de subventions qui incitent à la fois au développement du stockage domestique et sur réseau afin de réguler les variations de production. Le Japon est aujourd'hui le premier marché pour le stockage stationnaire sur réseau électrique et l'entreprise NGK Insulators, détient près de 50 % de part de marché dans le monde pour le stockage stationnaire de grande capacité avec sa technologie de batteries Na-S. De la même manière, Panasonic, un des principaux fabricants mondiaux de batteries Li-ion étend sa base de client au-delà de l'électronique portable en s'appuyant sur ce marché domestique du stockage stationnaire.

La Corée du Sud, confrontée à une forte augmentation de sa consommation électrique du fait de la croissance de son secteur industriel, n'ayant pas d'interconnexions transfrontalières (comme c'est le cas pour les pays européens) permettant de pallier à sa consommation et souhaitant limiter sa dépendance aux importations d'énergies fossiles mise également sur un fort développement du secteur éolien et photovoltaïque. Là aussi les politiques incitatives offrent de larges débouchés aux champions nationaux tels que LG Chem ou Samsung SDI et favorisent également leur extension à l'international (LG Chem termine actuellement la construction d'une usine de fabrication de batteries Li-ion en Pologne, Samsung en Hongrie)

La Chine affiche de son côté un volontarisme très fort concernant le marché du véhicule électrique. En s'appuyant là encore sur la taille de son marché domestique et des politiques publiques incitatives, la Chine représente plus de 50 % du marché des VEH dans le monde. Dans le cas de la Chine, le développement du marché des VEH répond aussi à des problématiques nationales dont la nécessité de réduire la pollution atmosphérique dans les zones urbaines ainsi que la réduction de sa dépendance au pétrole qui est à 60 % liée au secteur du transport<sup>37</sup>. Le développement du véhicule

<sup>37</sup> La course aux batteries électriques – IFRI – Juillet 2017



électrique représente également pour la Chine, une opportunité de propulser des entreprises nationales sur le marché mondial de l'automobile. Ainsi, le *vehicle traction battery Industrial development action plan* publié en Mars 2017 vise une capacité de production nationale de 100 GWh en 2020, encourage la R&D et favorise la consolidation du secteur.

Conscients de leur retard, les Etats-Unis ont mis en œuvre plus récemment des politiques de soutien à la R&D dans le domaine des batteries pour le stockage stationnaire et la mobilité (en particulier au travers de l'Advanced Research project Agency – Energy appartenant au DOE<sup>38</sup>), des politiques financières incitatives pour développer l'autoconsommation (Self generation incentive program en Californie), le marché du véhicule électrique (crédit d'impôt fédéral de 7500 USD) ainsi que l'aide au développement de capacités de production dont TESLA est aujourd'hui un des principaux bénéficiaires. Les politiques incitatives mises en œuvre au niveau fédéral sont accompagnées par des incitations complémentaires décidées au niveau des états soit pour favoriser le développement des « énergies vertes » (Californie) ou pour attirer les investissements (le Nevada a consenti près de 1,3 Mds d'USD d'avantages fiscaux à TESLA pour l'installation de sa *Gigafactory*)

L'Europe de son côté, malgré un potentiel important sur son marché domestique lié à la fois à la taille de son marché automobile et au développement du stockage stationnaire associé aux énergies renouvelables a pris un retard significatif dans la fabrication de batteries. L'Europe dispose pourtant de ressources avancées en R&D au travers notamment du CEA en France ou de l'institut Fraunhofer en Allemagne et d'un tissu industriel sur lequel s'appuyer avec des champions de l'industrie automobile et des énergéticiens de classe mondiale.

Cependant, les investissements massifs déjà réalisés ailleurs et les surcapacités actuelles laissent peu de place à l'émergence de fabricants européens de taille mondiale à court/moyen terme sur le marché de masse des batteries Li-ion. Seuls les projets Northvolt en Suède avec 4 Mds d'€ d'investissement pour une capacité de production de 32 GWh/an (2024) et TERRA-E en Allemagne (34 GWh en 2028) affichent une ambition comparable aux principaux acteurs mondiaux.

En dehors de ces projets, les autres investissements sur des capacités de fabrication en Europe sont principalement portés par des entreprises asiatiques qui souhaitent se positionner à proximité de marchés potentiels (Samsung SDI en Hongrie – 300 Mi € / LG Chem en Pologne – 320 Mi €).

Cependant, ceci n'empêche pas l'existence d'acteurs européens de taille mondiale qui restent positionnés sur des marchés plus spécifiques et à haute valeur ajoutée (tels que SAFT parmi les leaders mondiaux sur les batteries Ni-Cd et qui reste encore un des principaux fabricants de cellules Li-ion en Europe)

Malgré une apparente volonté politique concernant la mise en place d'un « Airbus de la batterie » ou d'une « Batteries Alliance » on peine à identifier une réelle stratégie industrielle européenne sur le sujet. Le PDG de Saft lui-même (interview du 4/02/2019) reconnaît que l'Europe a déjà perdu l'avantage vis-à-vis de la Chine. Il ajoute cependant que le recyclage des batteries Li-ion reste un enjeu fort qui n'est pas encore correctement adressé et que la maîtrise de ce secteur pourrait servir à établir des standards de recyclage qui pourraient eux-mêmes servir de levier pour contraindre les fabricants Chinois.

A plus long terme, La mise au point des batteries Li-ion « tout solide » portée notamment par SAFT (avec un objectif de commercialisation à partir de 2023), si elle apporte une réelle rupture technologique pourrait représenter une opportunité pour l'Europe de se replacer sur le marché de la fabrication des batteries. Mais faudrait-il encore que les acteurs du marché aval (les constructeurs automobiles européens) s'engagent à leur côté pour sécuriser de lourds investissements... A l'heure

---

<sup>38</sup> Department of Energy

actuelle Volkswagen Ford, Daimler, Renault et Nissan utilisent des batteries fabriquées par CATL et BYD tous les deux chinois.

A plus long terme, la mise au point de la technologie Li-Air qui apporte elle aussi une rupture technologique pourrait offrir l'opportunité pour repositionner l'industrie européenne sur le secteur de la fabrication... mais pas avant 2025/2030 dans le meilleur des cas.

## 2 Enjeux et déterminants du marché des batteries et de leur recyclage

Au-delà des applications et de leurs exigences en matière de stockage et restitution d'énergie qui conditionnent le marché des batteries comme nous l'avons vu dans la première partie de cette étude, d'autres facteurs peuvent influencer ce marché et surtout celui du recyclage. Il s'agit notamment de la réglementation, de l'écoconception, de la sécurité (batteries Lithium), du potentiel de seconde vie (batteries Li-ion), du coût et de la disponibilité des métaux.

Les futurs enjeux étant liés essentiellement à la technologie Li-ion, la suite de l'étude, sans ignorer totalement les autres technologies, se concentrera principalement sur celle-là.

### 2.1 Synthèse réglementaire

A l'échelle internationale, le transport des batteries usagées est réglementé pour des raisons de sécurité.

Les batteries Lithium-ion sont réglementées pour tous types de transport (y compris lorsqu'elles ne sont pas usagées dans le cas du transport aérien). Elles sont soumises aux réglementations suivantes<sup>39</sup> :

- Aérien (IATA DGR : International Air Transport Association, Dangerous Goods Regulations),
- Maritime (IDMG Code : International Maritime Dangerous Goods Code)
- Terrestre (route /rail) (ADR / RID : ADR / International Statutory Order on the Conveyance of Dangerous Goods by Rail).

En Europe, les batteries usagées au Ni-Cd et au Ni-MH sont également réglementées pour leur transport terrestre (règlement ADR : European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road).

Ces obligations qui s'appliquent, concernent en particulier l'étiquetage et le conditionnement. Les réglementations nationales peuvent éventuellement renforcer la réglementation internationale.

Concernant le recyclage des batteries en fin de vie la réglementation varie d'un pays (ou continent) à l'autre. La synthèse réglementaire ne propose pas un tour d'horizon exhaustif de tous les pays du monde. On peut cependant mentionner qu'en dehors de l'OCDE, la plupart des pays n'ont aucune réglementation spécifique concernant la fin de vie des batteries. Parmi les pays ayant mis en place une réglementation, seule l'Europe, le Japon et quelques états canadiens s'appuient sur le principe de la responsabilité élargie du producteur. La Chine, qui concentrera les plus gros tonnages de batteries

---

<sup>39</sup> Shipping guidelines for Li-ion batteries : <https://www.texim-europe.com/getfile.ashx?id=108643>

en fin de vie dans les années à venir exprime sa volonté de mettre en place une réglementation sur un modèle comparable afin de structurer une filière de recyclage efficace.

En ce qui concerne le périmètre « produit », les supercondensateurs sont toujours exclus du champ réglementaire des batteries puisqu'ils ne sont pas un système de stockage chimique.

## **Europe**

### Cadre général

La réglementation européenne définit un déchet comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (Art.3 de la directive-cadre déchet 2008/98/CE).

La nomenclature européenne des déchets permet de classer les déchets d'accumulateurs.

<b>N° rubrique</b>	<b>Déchet</b>
<b>CHAPITRE 16 : DECHETS NON DECRITS AILLEURS DANS LA LISTE</b>	
16 06 01*	Accumulateurs au plomb
16 06 02*	Accumulateurs Ni-Cd
16 06 03*	Piles contenant du mercure
16 06 04	Piles alcalines (sauf rubrique 16 06 03*)
16 06 05	Autres piles et accumulateurs
16 06 06*	Electrolytes de piles et accumulateurs collectés séparément

Alors que les batteries au Plomb et au Ni-Cd sont classées en tant que déchet dangereux (l'étoile « \* » accolée au code de nomenclature définit le caractère dangereux du déchet), on note que les autres batteries (et notamment Li-ion et Ni-MH) n'ont pas d'entrée spécifique. Ces types de batteries en fin de vie sont ainsi classifiées sous le code 16 06 05 qui ne leur attribue pas automatiquement un caractère dangereux. La question de la dangerosité des batteries autres que Plomb et Ni-Cd n'est donc pas tranchée par la nomenclature.

En l'absence de classification clairement établie via la nomenclature des déchets, et considérant que ces batteries contiennent un certain nombre de substances dangereuses, il est nécessaire d'approfondir la question de leur classement en tant que déchet. Pour cela, la réglementation prévoit que la dangerosité d'un déchet doit être étudiée au regard des 15 propriétés de danger (HP1 – HP15) codifiées et précisées par le règlement UE n° 1357/2014 du 18/12/2014.

Après analyse de la présence de substances dangereuses en fonction des seuils réglementaires et une analyse d'accidentologie pour différentes typologies de batteries au Lithium, un rapport de l'INERIS<sup>40</sup> conclut qu'un classement automatique et officiel des déchets de batteries au lithium comme dangereux, via la proposition d'une entrée spécifique de la nomenclature pourrait être justifié.

En l'état actuel, le classement des batteries (hors Pb et Ni-Cd) en fin de vie en tant que déchet non dangereux facilite leur exportation. Au-delà des recommandations de l'INERIS, la volonté de sécuriser les approvisionnements en métaux stratégiques au sein de l'UE, pourrait également encourager à un classement en déchets dangereux.

---

<sup>40</sup> « Déchets de batteries au lithium : classement et état des lieux des filières de gestion » (INERIS-DRC-14-141681-06454A – Juillet 2014)

Quoiqu'il en soit, le transport de batteries en fin de vie reste soumis au règlement ADR (transports par route de matières dangereuses).<sup>41</sup>

### La réglementation spécifique sur les batteries en fin de vie

Les obligations réglementaires spécifiques concernant les batteries en fin de vie sont dictées par la directive 2006/66/CE qui met en place une filière à responsabilité élargie du producteur<sup>42</sup>. La directive « batteries » définit également le périmètre produit en nommant batterie, « toute source d'énergie électrique obtenue par transformation directe d'énergie chimique » (Art. 3 de la directive). A ce titre, les piles à combustible entrent donc dans le champ de la directive.

La réglementation définit :

- Les batteries portables, susceptibles d'être portées à la main qui sont principalement les batteries d'usage courant que l'on trouve notamment dans tous les produits informatique, bureautique, télécom, outillage électroportatif. Leur gestion est assurée par des organisations mutualisées (des éco-organismes) mises en œuvre dans chaque état membre par les producteurs. Ils ont une obligation de résultat (en 2016, ils doivent collecter l'équivalent de 45 % en poids de la moyenne des quantités mises sur le marché au cours des trois années précédentes). Selon Eurostat, 97 000 tonnes ont été collectées en 2017 (sur 217 000 tonnes mises sur le marché)
- Les batteries automobiles qui sont destinées à alimenter un système de démarrage, d'éclairage ou d'allumage automobile. L'organisation de leur gestion est laissée à l'initiative des metteurs sur le marché. Celle-ci est particulièrement efficace puisque ces batteries sont exclusivement des batteries au plomb utilisées pour les véhicules à moteur thermique dont la valeur intrinsèque finance largement l'ensemble du circuit de reprise.
- Les batteries industrielles qui sont utilisées à des fins exclusivement industrielles ou professionnelles ou utilisées dans tout type de véhicule électrique. C'est sur cette catégorie de batteries qu'on assiste à la plus forte croissance puisqu'on y trouve aussi bien les batteries de VEH que les batteries associées au développement des EnR. Sur ce segment, les metteurs sur le marché s'organisent librement, de manière individuelle ou collective pour assurer la gestion de leurs batteries en fin de vie. A l'échelle européenne il n'existe pas de données consolidées comme pour la filière portable. Eurostat évalue à 190 000 tonnes les quantités mises sur le marché en 2017, ce qui semble sous-évalué (En France uniquement, les mises sur le marché de batteries industrielles représentent 62 905 tonnes en 2017<sup>43</sup>).

La directive interdit en outre l'usage de batteries Ni-Cd pour les applications portables.

Enfin, la réglementation européenne a des exigences sur l'efficacité des procédés de recyclage (rendement de recyclage) :

- Un minimum de 65 % de leurs poids moyens pour les accumulateurs au Plomb
- Un minimum de 75 % de leurs poids moyens pour les piles et accumulateurs au Ni-Cd
- Un minimum de 50 % de leur poids moyen pour toutes les autres piles et accumulateurs

Malgré le règlement 493/2012 qui complète la directive 2006/66/CE en clarifiant les modalités de calcul des rendements de recyclage afin qu'elles soient homogènes pour l'ensemble des pays membres, la situation n'est pas encore clarifiée. Selon Eurostat, plusieurs états membres affichent des

---

<sup>41</sup> Les batteries Li-ion, Ni-MH appartiennent à la classe 9 de l'ADR : « Matières et objets divers dangereux pour l'environnement »

<sup>42</sup> <http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/legislation.htm>

<sup>43</sup> Rapport 2018 (données 2017) du registre SYDEREP

rendements > 80 % et qui frôlent parfois les 100% sur la catégorie « autres piles et accumulateurs ». Alors que la France ou la Belgique qui ont des installations réputées performantes affichent des rendements de 75 % en 2017 sur cette catégorie (61 % en 2016).

Ceci est dû à des différences d'interprétation concernant la prise en compte des différentes fractions dans le bilan de recyclage (les scories, les matières carbonées lorsqu'elles servent d'agent réducteur dans les procédés thermiques, l'enveloppe extérieure, etc.). En effet, bien que la DG Environnement ait publié des « guidelines » pour clarifier les modalités de calcul<sup>44</sup>, celles-ci n'ont pas de caractère obligatoire puisque seule la Cour Européenne de Justice a la compétence pour statuer de manière contraignante sur l'interprétation d'une directive.

Les recycleurs partenaires de la filière française de gestion des piles et accumulateurs en fin de vie communiquent annuellement leurs données au Ministère chargé de l'environnement (actuellement le Ministère pour la Transition Ecologique et Solidaire - MTES). En 2017, les rendements de recyclage moyens à l'échelle nationale sont de 79 % pour le Ni-Cd et 75 % en données agrégées sur les autres catégories (hors Plomb)<sup>45</sup>. Le MTES dispose de données plus précises (rendement de recyclage par installation, par couples chimiques détaillés au sein de la catégorie « autres P&A » mais aussi la destination des fractions sortantes).

Les rendements de recyclage exigés par la directive sont donc dépassés en France et par les principaux acteurs européens du secteur du recyclage qui drainent des volumes sur l'ensemble de l'Europe (Umicore, Accurec, Redux...) mais le sujet n'est pas épuisé. Par exemple, Accurec publie sur son site le calcul du rendement de son procédé de recyclage sur le Li-ion<sup>46</sup>, validé par un audit. Ce rendement atteint 65,2 %, ce qui est relativement élevé pour un procédé pyro-métallurgique. Mais on peut noter qu'Accurec inclut dans ce calcul 12,2 % correspondant au graphite utilisé comme agent réducteur des oxydes métalliques en phase de pyrolyse, ce qui peut prêter à discussion.

La réévaluation des rendements de recyclage pourrait être envisagée dans le cadre de la révision de la directive batteries (nouvelle directive prévue pour 2022), au risque d'augmenter le cout des procédés et créer des distorsions de concurrence sur un marché du recyclage mondialisé.

Dans l'exemple ci-dessous de la composition moyenne d'une batterie Li-ion de type LCO, on note par exemple que sans la récupération des matières organiques (séparateurs, anode, électrolyte et autres), qui ne sont généralement pas récupérés par les procédés actuels, et même avec un rendement de recyclage de 100 % sur tous les autres composants (casing, cathode et collecteurs Al et Cu), il est impossible d'atteindre plus de 63 % de taux de recyclage.

Battery component	Product data sheets in mass-%	Self-determined
Casing	~20-25	~25
Cathode material (LiCoO <sub>2</sub> )	~25-30	~25
Anode material (graphite)	~14-19	~17
Electrolyte	~10-15	~10
Copper electrode foil	~5-9	~8
Aluminium electrode foil	~5-7	~5
Separator	-	~4
Others	Balance	Balance

Tab 6 : Composition moyenne d'une batterie LCO (de type portable)<sup>47</sup>

<sup>44</sup> <http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/Guidelines%20on%20RE.pdf>

<sup>45</sup> Rapport Annuel du Registre SYDEREP pour la filière piles et accumulateurs (Données 2017)

<sup>46</sup> [https://accurec.de/wp-content/uploads/2018/04/Li-ion-RE\\_2018.pdf](https://accurec.de/wp-content/uploads/2018/04/Li-ion-RE_2018.pdf)

<sup>47</sup> « Development of a recycling process for Li-ion batteries » (T. Georgi-Maschler, B. Friedrich, R. Weyhe, H. Heegn, M. Rutz) Février 2012

Notons aussi que dans le cadre des travaux en cours concernant la révision de la directive européenne, les modalités de gestion des batteries industrielles pourraient être renforcées afin de garantir une gestion et une traçabilité plus efficace, dans un contexte de croissance importante des volumes et face à un enjeu important lié à la récupération de métaux considérés comme stratégiques.

Enfin, l'évolution de la réglementation européenne en matière de recyclage des batteries de VEH ne peut pas ignorer la directive VHU 200/53/EC (véhicules hors d'usage). La prise en compte éventuelle des taux de recyclage de la batterie d'un VEH (qui représente environ 1/4 du poids du véhicule) peut fortement impacter le taux de recyclage global du véhicule.

## **Etats-Unis**

Au niveau fédéral, il n'existe pas de réglementation spécifique sur les batteries en fin de vie. Les déchets solides et dangereux sont encadrés par le Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Ce document qualifie les déchets dangereux soit par leur désignation, soit par leurs caractéristiques présentant un caractère de dangerosité qui est déterminé par analyse. Quatre critères de dangerosité sont examinés : le caractère inflammable, corrosif, réactif ou toxique (potentiel de lixiviation).

En dehors des batteries au plomb, seules les batteries au Ni-Cd en fin de vie sont spécifiquement définies comme des déchets dangereux.

Il existe quelques systèmes de collecte organisés sur une base **volontaire** (Exemple Call2Recycle<sup>48</sup>) généralement financés par les fabricants de batteries ou de téléphones mobiles mais ils ne prennent en charge que les batteries portables (avec une forte proportion de LCO dont le recyclage est rentable).

En 2017, seuls 3 états (New York, Californie, Minnesota) interdisent l'enfouissement des batteries au Lithium. Mais leurs réglementations ne prévoient aucune sanction.

L'état de New York a mis en place en 2010 une réglementation spécifique de type REP (Responsabilité Elargie du Producteur) sur les batteries rechargeables (NYS Rechargeable Battery Recycling Act) avec obligation pour les fabricants de financer la collecte et le traitement des batteries en fin de vie.

On estime qu'à peine 5% des batteries Li-ion sont recyclées aux Etats-Unis.

## **Canada**

La réglementation sur les déchets est mise en œuvre au niveau des provinces. 4 d'entre elles (sur 10) ont mis en place une réglementation pour les batteries en fin de vie sur un modèle de Responsabilité Elargie du Producteur (Québec, Manitoba, Ontario, Colombie Britannique) inspiré de la réglementation européenne et ne concerne que les batteries de moins de 5 Kg.

Elle fixe également des objectifs en matière de taux de collecte et de taux de valorisation, variables en fonction des provinces et évolutif (Pour le Québec, 50 % de taux de collecte – et 45 % de taux de valorisation en 2019 qui doit évoluer de 5 % par an jusqu'à un maximum de 65 %).

---

<sup>48</sup> L'organisation Call2Recycle, à but non lucratif fondée par les metteurs sur le marché en 1994 et qui opère aux Etats Unis et au Canada a collecté 59 000 tonnes de batteries depuis sa création.

## Chine

En Chine la gestion des déchets dangereux est encadrée par le Catalogue National des Déchets Dangereux. Les batteries en fin de vie dépassant un certain seuil en nickel, mercure, (plomb), entrent dans ce catalogue et doivent être traitées de manière spécifique. Dès 2003, à travers le « Policy on Pollution Prevention Techniques from Waste Batteries », la réglementation chinoise impose au fabricant un marquage spécifique ainsi que la mise en place d'un système de reprise des batteries en fin de vie, sans en préciser les étapes suivantes.

En 2015, une nouvelle réglementation concernant les batteries lithium-ion industrielles encourage les fabricants de VEH à développer leurs propres infrastructures de recyclage.

Au début de l'année 2018, les autorités chinoises ont fait part à nouveau de leur volonté de mettre en place un plan d'envergure afin d'assurer la gestion des batteries de VEH en fin de vie avec une mise en application d'un certain nombre d'obligations à partir d'Aout 2018.

Ce plan prévoit que la responsabilité des batteries en fin de vie incombe aux fabricants de véhicules électriques qui doivent mettre en place des systèmes de collecte adaptés et provisionner les couts de collecte et de recyclage associés. Il est également prévu de mettre en œuvre un système de traçabilité des batteries (au travers d'un code individuel), de leur production jusqu'à leur fin de vie.

Afin de faciliter le recyclage (y compris la seconde vie), les fabricants chinois de batteries devront adopter des modèles standardisés, faciles à démonter, et communiquer des informations sur les modalités de démontage, de stockage des batteries mais aussi sur les interfaces des systèmes de contrôle et leurs protocoles de communication (Battery Management Systems). En revanche aucun objectif n'est mentionné à ce stade ni sur le taux de collecte, ni sur les rendements de recyclage.

Concrètement, le ministère de l'industrie et des télécommunications Chinois a sélectionné en juillet 2018, 17 grandes métropoles et régions pour mettre en place des programmes pilotes associant constructeurs automobiles, fabricants de batteries et acteurs du recyclage qui doivent unir leurs efforts pour mettre en œuvre une solution globale de recyclage des batteries avec l'appui des autorités locales.

Les principaux fabricants de téléphone mobiles (China mobile, Nokia, Motorola) et de VEH (BYD, Lichen, ...etc) ont déployé des points de collecte sur le territoire chinois. 2 entreprises majeures exploitent des infrastructures de recyclage de batteries : GEM (5 sites) et BRUNP. Lichen et BYD ont établi des partenariats avec BRUNP pour faire le lien entre les volumes collectés et leur recyclage.

L'entreprise China Tower (qui gère l'infrastructure de transport d'électricité), associée aux projets pilotes, a signé un partenariat avec 16 des principales entreprises de fabrication de VEH et de batteries afin de développer des solutions pour la seconde vie. China Tower a un potentiel d'utilisation de 54 GWh de stockage stationnaire, soit près de 2 Millions de batteries de VEH usagées. Aujourd'hui 98 % de son parc est formé de batteries au plomb mais China Tower prévoit d'utiliser de plus en plus de batteries Li-ion en seconde vie, du fait de leur durée de vie plus importante, une meilleure densité d'énergie et un prix actuellement équivalent (environ 100 USD/ kWh)<sup>49</sup>

D'autres sociétés sont mentionnées<sup>50</sup> pour la prise en charge de batteries Li-ion en fin de vie, telles que Bangpu Ni/Co High Tech Co qui produit des précurseurs pour cathodes NMC en intégrant en partie des batteries Li-ion et Ni-MH en fin de vie dans son procédé, ou Umicore (installation basée à Jiangmen) qui produit des matières premières pour la fabrication de cathodes de batteries Ni-MH (10000 T) et Li-ion (5000 T) et semble également intégrer des déchets de batteries en fin de vie dans son process de production.

---

<sup>49</sup> Analyse par IDTechEx – consulting / Juillet 2018

<sup>50</sup> Zeng, X., Li, J., Liu, L., 2015. Solving spent lithium-ion battery problems in China : opportunities and challenges. Renew. Sustain. Energy Rev. 52, 1759–1767.

## **Japon :**

Au Japon, la gestion des batteries rechargeables en fin de vie est régie dans le cadre de la « Loi pour la promotion de l'utilisation efficace des ressources » de 2000.

Le système est basé sur le principe de la Responsabilité Élargie du Producteur. Il est piloté par le JBRC (Japanese Battery Recycling center), équivalent d'un éco-organisme, créé en 2004 et constitué par les fabricants de batteries et d'équipements utilisant des batteries. Cet organisme a mis en place 8000 points de collecte. La réglementation ne fixe pas d'objectif en matière de taux de collecte mais fixe des objectifs concernant les taux de recyclage (Ni-Cd 60% // Ni-MH 50 % et Li-ion 30 %). Ce taux de recyclage se calcule en comparant la totalité du tonnage entrant avec le tonnage sortant de matière première secondaire, la valorisation énergétique n'entre pas dans le calcul.

Si on fait le parallèle avec la réglementation européenne, ce système ne concerne à ce jour que les batteries rechargeables « portables »<sup>51</sup>. Les batteries issues de véhicules électriques ne sont pas soumises à la réglementation et la gestion de leur fin de vie est laissée à l'initiative des acteurs du marché.

## **Australie**

A ce jour, il n'y a pas de réglementation spécifique en Australie concernant le recyclage des batteries même si des systèmes de collecte existent sur une base volontaire (notamment pour les batteries Ni-Cd).

Les différentes juridictions ont des réglementations qui obligent à porter une attention générale à la protection des sols et des nappes phréatiques. Mais la gestion des batteries en fin de vie n'est pas définie de manière spécifique.

Certaines batteries entrent dans le champ du règlement sur le stockage et la manutention des matières corrosives et des matières dangereuses.

En dehors des batteries au plomb et au Ni-Cd l'essentiel des batteries (portables notamment) terminent aujourd'hui en enfouissement.

En 2016, sur les 3 300 tonnes de batteries Li-ion en fin de vie, seulement 2% ont été collectées et expédiées à l'étranger pour recyclage<sup>52</sup> car l'infrastructure de recyclage des batteries Li-ion était inexistante localement. L'entreprise Envirostream Australia a ouvert en Avril 2018 Le premier site de recyclage pour batteries Li-ion au Nord de Melbourne.

A noter que l'Australie est un des principaux pays producteurs de Lithium, sous forme d'hydroxyde, utilisé dans la fabrication de batteries neuves.

## **Amérique Latine**

Les réglementations sur les déchets se mettent en œuvre également en Amérique latine. Les batteries y sont classées comme déchets dangereux.

On estime qu'en 2022, près de 80 % des pays du continent Sud-Américain auront mis en place une réglementation concernant la gestion des batteries en fin de vie sur la base d'une responsabilité élargie du producteur<sup>53</sup>, et qui devrait couvrir au moins 60 % du territoire de chaque pays d'ici 2025.

---

<sup>51</sup> La réglementation japonaise parle de « compact rechargeable batteries ».

<sup>52</sup> Lithium Battery Recycling in Australia – CSIRO Report - Sarah King, Naomi J. Boxall, Anand I. Bhatt (April 2018)

<sup>53</sup> <https://incompliancemag.com/article/latin-america-regulators-embracing-e-waste-and-battery-collection-laws/>



Cependant, avec un taux de collecte estimé actuellement à 3%, les volumes sont trop faibles pour permettre le développement d'une industrie locale du recyclage. La plupart des pays ont des réglementations qui interdisent l'importation de déchets dangereux ne permettant pas non plus de consolider des volumes à l'échelle du continent. Actuellement, les batteries rechargeables collectées et ayant une valeur sont triées et exportées pour traitement en Europe ou aux Etats Unis.

### **Bilan des réglementations concernant la gestion des batteries en fin de vie**

	Réglementation spécifique sur les batteries en fin de vie	Filière REP	Objectif de collecte	Rendement de recyclage / valorisation
Europe	Oui	Oui pour toutes les batteries	Oui (45 % sur les batteries portables à partir de 2016)	Oui (de 50 à 75% de rendement de recyclage selon les couples chimiques)
Etats-Unis	Partielle (en fonction des états)	Non	Non	Non
Canada	Partielle (en fonction des Provinces)	Oui (3 états sur 10 et uniquement sur les batteries < 5 kg)	Oui (variable en fonction des provinces)	Oui (variable en fonction des provinces)
Chine	Partielle (En cours d'évolution)	Non	Non	Non
Australie	Non	Non	Non	Non
Japon	Oui	Oui uniquement sur les batteries "compactes" (équivalent des "portables")	Non	Oui (de 30 à 60 % de rendement de recyclage selon les couples chimiques)
Amérique du Sud	Non	Non	Non	Non

**Tab 7** : Périmètre des réglementations relatives à la gestion des batteries en fin de vie

La mise en place d'une réglementation contraignante est le principal levier de développement d'une filière de recyclage.

## **2.2 Etat des lieux sur l'Ecoconception**

### ***2.2.1 Définition***

« L'écoconception consiste à intégrer l'environnement dès la conception d'un produit ou service, et lors de toutes les étapes de son cycle de vie » (AFNOR, 2004).

L'écoconception a pour volonté de concevoir des produits respectant les principes du développement durable et de l'environnement, recourant « aussi peu que possible aux ressources non renouvelables en leur préférant l'utilisation de ressources renouvelables, exploitées en respectant leur taux de renouvellement et associées à une valorisation des déchets qui favorise le réemploi, la réparation et le recyclage » (ADEME).

Historiquement, les pratiques d'écoconception se sont surtout intéressées aux processus de production et à la phase d'utilisation des produits en optimisant en premier lieu les consommations de matière et d'énergie, les intérêts économiques rejoignant dans cette approche, l'intérêt environnemental (dans le domaine des batteries, on peut aussi mentionner l'amélioration de la durée de vie en cyclage qui réduit généralement l'impact environnemental). De manière générale, l'écoconception permettant de favoriser le recyclage des produits est un domaine qui reste peu exploré. En effet, cette approche de l'écoconception ne présentant pas d'intérêt économique à court terme, en l'absence de contrainte réglementaire elle reste souvent ignorée. En rendant les fabricants (et metteurs sur le marché) responsables de la gestion de fin de vie de leurs produits, la responsabilité élargie du producteur a pour ambition, entre autres, de répondre à cette lacune. De fait, l'écoconception en vue d'améliorer la « recyclabilité » est un axe de réflexion peu abordé hors du continent européen.

### **2.2.2 Ecoconception, recyclabilité et réglementation européenne**

Concernant le domaine particulier des batteries, il faut rappeler que ce sont des produits destinés à être intégrés dans un équipement et doivent donc d'abord répondre au cahier des charges des OEM (Original Equipment Manufacturer). Or, leurs exigences concernent en premier lieu la performance (densité d'énergie, cyclage, efficacité de charge/décharge) ainsi que la forme et le prix.

Si en Europe, les OEM n'ignorent pas l'impact environnemental des batteries qu'ils utilisent, cet aspect reste encore secondaire. Ils s'assurent à minima que leurs batteries pourront être recyclées et respecter les critères de la réglementation.

Soulignons enfin que la notion de recyclabilité n'a pas de définition réglementaire ou normative. Lorsqu'on parle d'amélioration de la recyclabilité d'une batterie, s'agit-il d'optimiser effectivement le tonnage total recyclé par rapport à la quantité de batteries en fin de vie disponibles ? Du potentiel de recyclage d'une batterie dans le cadre de procédés restant à développer (et qu'il faut encourager) ? Ou simplement d'améliorer le rendement de recyclage des procédés existants comme l'aborde la directive européenne ?

Selon la manière dont cette notion de recyclabilité est abordée, elle peut favoriser l'une ou l'autre des technologies de batteries. Ainsi, les batteries au plomb sont aujourd'hui les mieux recyclées (près de 95 % des batteries au plomb en fin de vie sont recyclées à l'échelle mondiale), les rendements de recyclage les plus élevés concernent les batteries au plomb et les batteries Ni-Cd. Doit-on pour autant privilégier ces technologies ?

De manière générale, les systèmes chimiques basés sur des métaux à valeur (le plomb, le Nickel, le Cobalt) sont fortement recyclés car ils présentent un intérêt économique. Doit-on favoriser ces systèmes chimiques, avec le risque d'un transfert de pollution vers une autre étape du cycle de vie ?

Des analyses de cycle de vie et des mesures d'empreinte environnementale sont donc nécessaires afin de comparer l'impact global des différentes technologies (dans un périmètre d'interchangeabilité). Ceci concerne les batteries portables et industrielles, dont les différentes technologies Li-ion qui dominent le marché des VEH (NMC, NCA, LFP...).

Des travaux sont actuellement en cours à l'échelle européenne parallèlement à la révision de la directive 2006/66/CE sur les batteries, afin de déterminer des critères objectifs et vérifiables pour mener ces études<sup>54</sup>. Le but final étant de définir des mesures concrètes pouvant être mises en œuvre pour favoriser une approche d'écoconception dans la perspective d'une meilleure recyclabilité. Au-

<sup>54</sup> PEFCE - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications – RECHARGE - Février 2018.  
[http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCE\\_Batteries.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCE_Batteries.pdf)

delà des objectifs de protection de l'environnement, ces travaux s'insèrent dans la stratégie mise en œuvre pour sécuriser les approvisionnements en matières premières<sup>55</sup>, et plus particulièrement pour les métaux dits « stratégiques »<sup>56</sup>.

### **2.2.3 Etat des lieux et perspectives**

Aujourd'hui, dans le cas où les procédés de recyclage ne seraient pas encore au point pour de nouvelles technologies apportant un gain en performance, les OEM considèrent presque toujours que les recycleurs devront et sauront s'adapter. Au pire sans consultation (c'est souvent le cas dans le domaine des batteries portables pour lesquelles il y a peu de coordination entre recycleurs d'un côté et fabricants & OEM de l'autre), au mieux avec échange d'information entre acteurs comme c'est le cas par exemple entre l'industrie automobile (fabricants de VEH) et recycleurs européens régulièrement engagés dans des contrats de partenariat à long terme. Quoique ces partenariats présentent également des limites puisque les constructeurs européens de VEH ne sont pas les fabricants de batteries et ne maîtrisent pas entièrement leur composition. Celles-ci étant fabriquées en Chine pour une grande partie, sans contrainte spécifiques liées à la recyclabilité et sans une totale transparence sur leur composition exacte.

De leur côté, les recycleurs confirment qu'ils sauront toujours adapter leurs procédés aux différentes batteries en fin de vie qui arrivent dans leurs installations... puisqu'en fine, ce n'est généralement qu'une affaire de coûts.

En observant la filière européenne de recyclage des piles et accumulateurs, on peut donc constater que le principe de responsabilité élargie du producteur n'est pas suffisant à lui seul pour inciter les fabricants à prendre réellement en compte les problématiques de recyclage au moment de la fabrication. D'ailleurs, les réflexions en cours dans le cadre de la révision de la directive européenne pour la mise en place d'une éco-modulation sur la filière portable (principe consistant, au travers de bonus/malus impactant le prix de vente, à inciter financièrement les fabricants à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie et favoriser la recyclabilité des batteries mises sur le marché) prennent acte de cette situation.

Concernant les batteries industrielles et en particulier les batteries de VEH, c'est la taille des enjeux qui a permis d'ouvrir le dialogue sur l'écoconception entre industriels de l'automobile (qui assemblent eux-mêmes leurs batteries, ou déterminent à minima le cahier des charges) et recycleurs. Les premiers, soumis à la REP, conscients que les capacités de recyclage sont insuffisantes et voulant s'assurer qu'il existera une solution de recyclage pour les tonnages importants de batteries arrivant en fin de vie au cours des prochaines années, et les second réclamant des garanties de tonnages avant d'investir dans des nouveaux procédés de recyclage coûteux. La nécessité de sécuriser les volumes, les prix, mais aussi l'opportunité d'améliorer la rentabilité des batteries en les valorisant en seconde vie et l'opportunité de sécuriser l'approvisionnement en matières premières (dans le cas où un recyclage en boucle fermée serait possible) sont autant de raisons justifiant une contractualisation de long terme entre les acteurs et un dialogue qui ne peut être que bénéfique.

Ainsi, l'existence d'une REP même si elle n'est pas suffisante apparaît cependant comme un élément nécessaire dans la prise en compte des enjeux du recyclage par les fabricants de batteries. On constate, qu'en dehors de l'Europe et en l'absence de filière REP, les volumes de batteries collectées/recyclées restent faibles et limitées aux technologies à forte valeur intrinsèque (batteries au plomb en premier lieu et technologies à forte concentration en Cobalt et/ou en Nickel).

---

<sup>55</sup> [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy\\_fr](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy_fr)

<sup>56</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0297&from=EN>

Concernant les leviers disponibles en matière d'éco-conception, nous avons vu que les « lois » de l'électrochimie limitent les marges de manœuvre concernant le choix des matières actives et donc la composition interne des batteries (électrodes, séparateurs, électrolytes). Dans ce domaine, l'argument de la recyclabilité sera généralement négligeable au regard des exigences de performance et de coûts de fabrication. Les choix des matières actives ne sont pas dictés par les problématiques de recyclage même si ces choix peuvent avoir un impact significatif.

Sur les technologies matures telles que Ni-MH et Ni-Cd, les évolutions possibles restent très marginales (le choix des matières actives est optimisé, seules des innovations marginales concernant principalement les électrolytes peuvent encore apparaître) et sans grande incidence sur des procédés de recyclage, eux aussi matures, mis en œuvre à une échelle industrielle et ayant démontré leur efficacité dans le cadre des obligations actuelles.

En revanche, dans le domaine des technologies Li-ion, nous assistons à des évolutions significatives concernant les matières actives utilisées. Elles évoluent vers une diminution de la quantité de cobalt pour des raisons liées, au départ, à une anticipation de fortes contraintes d'approvisionnement (disponibilité et coût du cobalt) ... à l'arrivée, les technologies de remplacement (NMC, NCA) s'avèrent également plus performantes (meilleure densité d'énergie notamment) et les technologies à forte concentration de cobalt sont aujourd'hui en baisse régulière.

Ceci impacte directement la rentabilité des procédés de recyclage (la valorisation du cobalt étant source de revenu) et augmente donc le coût global qui, dans le cas d'une REP, est finalement répercuté au fabricant. Cet accroissement de la diversité des technologies Li-ion peut en outre réduire le rendement de certains procédés de recyclage et renchérir des coûts annexes (au niveau du tri par exemple).

Sur les technologies Li-ion encore, des produits ignifugeants, retardateurs de flamme peuvent être intégrés par certains fabricants sans information spécifique (pour des questions de confidentialité), surtout si cette amélioration de la sécurité des batteries peut dégager un avantage concurrentiel.

Au bilan, en matière d'écoconception dans l'objectif d'améliorer la recyclabilité, les marges de manœuvre liées à la partie active de la batterie restent donc limitées, les enjeux liés à la performance et au coût de fabrication dépassant largement ceux liés au recyclage.

En revanche, il y a plus de latitudes lorsqu'on aborde une batterie dans son ensemble. En particulier lorsqu'on s'intéresse aux problématiques de désassemblage et de démontabilité.

Il s'agit d'une part de pouvoir séparer facilement une batterie de son équipement (désassemblage) et d'autre part de pouvoir démonter facilement la batterie elle-même (démontabilité) afin d'en extraire les cellules. Dans la plupart des cas, le premier point n'est pas du ressort des fabricants de batteries (le choix de sceller les batteries comme c'est le cas par exemple pour certaines marques de téléphone portable appartient au fabricant d'équipement). Si on souhaite une amélioration sur ce point c'est donc par des incitations réglementaires ou économiques en direction des OEM et non des fabricants de batteries (dans le cas des batteries de VEH il peut s'agir par exemple de prévoir des dispositifs qui facilitent le lavage et la manutention).

Pour les batteries portables, compactes et qui subissent en matière de recyclage, un premier traitement par broyage et/ou pyrolyse (sans phase de démontage préalable), la démontabilité ne présente pas d'intérêt. En revanche, il existe un champ d'investigation intéressant pour les batteries industrielles et notamment pour les batteries Li-ion pour VEH / EnR qui seront les principaux tonnages à recycler dans les années à venir. Les fabricants (et/ou les assembleurs) pourraient dès la conception de leurs batteries, prendre en compte les contraintes des opérateurs de recyclage afin de faciliter le démontage des batteries en elle-même.

Les opérations de démontage concernent les éléments extérieurs de la batterie (Battery Management System principalement) ainsi que la séparation des packs par rapport à l'enveloppe (casing) et enfin, la séparation des modules entre eux.

En matière de recyclage, la partie extérieure des batteries Li-ion (BMS et Casing) est un enjeu important puisqu'elle peut représenter jusqu'à 50 % du poids total de la batterie.

Même si certaines exigences mécaniques limitent les choix (les batteries doivent répondre à un certain nombre de critères concernant la résistance aux vibrations ou la résistance aux chocs), les marges de manœuvre des concepteurs restent beaucoup plus importantes que dans le domaine de l'électrochimie.

On peut également inclure dans cette approche d'écoconception, tout ce qui permettra de faciliter les tests en vue d'une réutilisation. Cela implique un transfert d'information des fabricants vers les recycleurs concernant les interfaces des systèmes de contrôle (BMS) et leurs protocoles de communication.

**Pour conclure**, au regard des volumes de batteries de VEH attendus dans les années à venir, il est souhaitable de pouvoir automatiser les procédés de recyclage. Pour cela, il est impératif que l'avis des recycleurs puisse être pris en compte dans les choix de conception des batteries. En particulier, il est souhaitable de prévoir des dispositifs facilitant les opérations de levage et manutention des batteries, de standardiser autant que possible les dispositifs de fixation des batteries et les méthodes d'assemblage des packs/cellules afin de pouvoir automatiser les procédés de démantèlement, principal levier d'optimisation des process.

Il n'est pas sûr que les logiques de marché soient suffisantes pour cela, et la main du législateur pourrait être nécessaire.

A ce stade, seule la Chine dans le cadre des réglementations annoncées par le ministère de l'Industrie et des télécommunications semble prendre en compte la mesure de ces enjeux. En prévoyant d'imposer un marquage pour identifier les technologies de batteries, une standardisation des modèles, une facilité de démontage et un échange d'informations entre fabricants et recycleurs, les autorités chinoises introduisent de fait la notion d'écoconception et obligent les acteurs à se coordonner pour la mise en place d'une filière de recyclage efficace.

Cette approche « avant-gardiste » est bien entendu en lien direct avec la politique volontariste de la Chine sur le développement des VEH qui place le pays très en avance sur ce marché (en nombre de VEH et donc en volume de batteries à recycler dans les années à venir).

## **2.3 Etat des lieux sur la sécurité des batteries Lithium**

Les technologies de batteries utilisées actuellement sur le marché ne présentent pas de problèmes de sécurité spécifique en dehors des technologies au lithium. Il faut cependant rappeler que les risques liés à ce type de batterie sont pris en compte par les fabricants et que les batteries mises sur le marché restent sûres et non dangereuses pour le consommateur dans un cadre d'utilisation normal.

Les batteries Lithium présentent des risques spécifiques qui diffèrent selon que les batteries utilisent une technologie lithium sous forme métallique (type LMP) ou Lithium ionique (Li-ion, Li-Po).

### ***2.3.1 Batteries Lithium-Métal Polymère***

Les premières batteries au Lithium utilisaient ce métal sous forme solide. Cette technologie a été ensuite abandonnée au profit du Lithium-ion qui permettait de résoudre la formation de dendrites (à la surface de l'électrode en Lithium) entraînant des courts-circuits. L'entreprise Blue Solutions (groupe

Bolloré), seul acteur à produire aujourd'hui ce type de batterie au travers de deux usines dans le monde (une en France et une au Canada) a résolu ce problème notamment par l'utilisation d'un électrolyte polymère (solide) qui empêche la progression de dendrites. C'est d'autre part sa maîtrise de la fabrication de films ultraminces qui a permis la mise au point de ce type de batteries.

Dans la phase de vie de la batterie, l'électrolyte polymère utilisé apporte un réel avantage en termes de sécurité (par rapport au Li-ion) puisqu'il évite l'utilisation de solvants potentiellement dangereux en cas de surchauffe. De telles batteries peuvent être soumises à de hautes températures sans risques d'emballement thermique ou d'explosion.

Il faut toutefois mentionner que cet avantage de sécurité reste valable sous réserve que l'intégrité de l'enveloppe soit préservée en toutes circonstances et notamment en cas de choc. En effet, le Lithium métallique présente une très forte réactivité à l'air et à l'eau (pour produire de l'hydrogène et de l'hydroxyde de lithium, un puissant agent caustique)

De ce fait, ce type de batterie présente de fortes contraintes à la fabrication mais aussi potentiellement en phase de recyclage. A ce jour Il n'existe pas de procédé connu pour le recyclage de ces batteries<sup>57</sup>, même si Blue solutions affirme travailler sur ce sujet et ne pas être inquiet ni sur la faisabilité technique, ni sur le respect des exigences réglementaires concernant les rendements de recyclage.

Suite à la fin du contrat « Autolib » avec la ville de Paris, le groupe Bolloré a retiré près de 4000 bluecar.<sup>58</sup> Les informations disponibles dans la presse indiquent que ces véhicules ont été acheminés à Romorantin sur un site de l'INDRA (acteur spécialisé dans le recyclage des véhicules hors d'usage). Quelques centaines auraient été revendues à des particuliers sans qu'il soit fait mention d'un éventuel diagnostic préalable sur la batterie. Sollicités sur les modalités de gestion des batteries de ces véhicules, ni l'INDRA ni la société Blue Solutions n'ont souhaité répondre à nos questions.

### **2.3.2 Batteries au Lithium ionique**

Dans les batteries lithium ionique, on peut retrouver des risques similaires aux LMP. En particulier, lorsque les batteries ne sont pas totalement déchargées, des ions Li restent intercalés dans l'anode en graphite et peuvent réagir à l'eau pour former de l'hydroxyde de Lithium et de l'hydrogène. Il peut aussi y avoir du lithium métal déposé à la surface de l'anode provenant de surcharges répétées (liées à des charges rapides). Les risques liés au lithium-métal ne peuvent donc pas être totalement écartés dans le cas de batteries au lithium ionique.

Mais en matière de sécurité, le principal risque des batteries li-ion provient de la composition de l'électrolyte qui est un solvant organique contenant des sels de lithium au fluor ou au chlore.

Cet électrolyte est instable, inflammable et il réagit facilement avec l'eau pour produire des gaz toxiques. En cas d'échauffement, il peut subir un emballement thermique provoquant un incendie violent (voire une explosion) accompagné d'émission gaz fluorés ou chlorés selon la nature de l'électrolyte. Cet échauffement peut être provoqué par une température extérieure excessive mais aussi par un accroissement interne de la température lié à une surintensité. En règle générale, les batteries au lithium ionique présentent un certain nombre de risques de dégradation accélérée ou d'emballement thermique dès lors qu'elles sortent de leur plage de fonctionnement typique (température, niveau de charge, tensions mini et maxi...etc) C'est pourquoi toutes les batteries Li-ion sont équipées d'un système électronique de pilotage (Battery Management System) qui permet de

---

<sup>57</sup> Les brevets déposés (par exemple WO2002023651) sur le sujet concerne des batteries LMP constituées d'une cathode en oxyde de vanadium lithié, or les batteries « blue solutions » sont en oxyde de fer lithié.

<sup>58</sup> <https://www.20minutes.fr/rennes/2451595-20190215-bretagne-autolib-retrouvent-seconde-vie>

contrôler en permanence (notamment en phase d'utilisation et en phase de recharge) les différents paramètres tels que la tension, l'intensité ou la température de chaque cellule.

Le BMS déconnecte chaque cellule individuellement dès lors que les seuils de sécurité sont dépassés.

Au sein de la famille des batteries Li-ion, la technologie LFP est réputée plus sûre du fait d'une meilleure stabilité thermique des cellules. Les batteries Li-Po ne sont pas intrinsèquement plus instables mais le fait qu'elles soient contenues dans une enveloppe souple les rend plus vulnérables aux chocs et à un écoulement de l'électrolyte qui pourra alors s'enflammer.

Même si plusieurs incidents (départs d'incendie, rappels de produits...etc) ont été largement médiatisés au niveau de l'utilisation, ils restent rares et le plus souvent associés à une mauvaise utilisation (rarement un défaut de conception comme dans le cas des tablettes SAMSUNG). En revanche les batteries Li-ion posent un réel problème de sécurité au niveau des installations de recyclage en étant régulièrement à l'origine de départs d'incendies.

Pour une batterie Li-ion, une mauvaise manutention, un perçage ou encore le broyage peut être à l'origine d'incendie ou d'explosion en raison d'un court-circuit (lorsque la batterie n'est pas complètement déchargée) et/ou de l'écoulement de l'électrolyte.

Aux Etats-Unis, des départs de feux ont pu être constatés dans les bennes compactrices de collecte des ordures ménagères, ainsi que dans des centres d'enfouissement (Randell Environmental Consulting, 2016 - Waste Lithium-ion Battery Projections). Plusieurs incendies sont rapportés dans des installations de traitement dont celui du 7/11/2009 sur l'installation Retrieval Technologies (ex Toxco) à Trail au Canada qui a fait l'objet d'une vidéo spectaculaire. Les causes précises de l'incendie ne sont pas connues comme le rapporte l'INERIS dans un document non public commandé par les éco-organismes de la filière portable en France et qui analyse 26 accidents sur une période allant de 1999 à 2017<sup>59</sup>.

L'analyse d'accidentologie (Pour la France car nous avons accès à des données exhaustives<sup>60</sup>) démontre cependant que les lieux de stockages spécifiques de batteries ne sont pas les plus sujets aux accidents<sup>61</sup>. Ceux-ci sont rares dans les installations de recyclage de batteries ou dans les déchetteries qui stockent des piles et batteries pour le compte des éco-organismes de la filière portable (Screlec et Corepile). En effet, pour ces acteurs spécialisés et formés à la gestion du risque incendie, les conditions de stockage (fûts métalliques, saches plastiques, utilisation de vermiculite pour isolation), de transport (ADR) et manutention, les procédés de prise en charge dans les centres de recyclage (décharge des batteries, prise en charge des batteries endommagées) ainsi que les procédés de traitement (broyage en atmosphère inerte), font l'objet de procédures spécifiques et adaptées.

En France, on constate que les principaux départs de feux liés à des batteries Li-ion sont recensés dans les installations de traitement et/ou de regroupement de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE). Ces incidents sont récurrents et interviennent dans la plupart des cas sur des zones d'entreposage en vrac de DEEE (20 accidents en 2018 sur centres de regroupement, centres de traitement et transport de DEEE – dont au moins 5 départs de feu dus avec certitude à des batteries li-ion). La DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) constate que le nombre d'accidents a ainsi été multiplié par trois par rapport à la moyenne des dix années précédentes.

---

<sup>59</sup> Etat de l'art des incidents et accidents survenus dans la filière de recyclage de batteries usagées (INERIS le 26/07/2018 – pour SCRELEC et COREPILE)

<sup>60</sup> Le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI) met à disposition la base de données ARIA (<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>) qui recense l'ensemble des accidents technologiques sur le territoire Français.

<sup>61</sup> Panorama de l'accidentologie des installations de gestion des déchets (Ministère de l'environnement – Octobre 2016) //

Il ressort que le mode de gestion des DEEE en vrac (stockage en alvéole, manutention au chargeur, transport en bennes ou camions à fonds-mouvants... etc) est un facteur de risque important. En effet il est de nature à endommager les batteries Li-ion encore présentes dans les équipements. Dans ce cas, l'électrolyte peut s'écouler et provoquer un départ de feu qui pourra facilement se propager au sein d'un amas de DEEE qui offre à la fois un combustible (forte proportion de plastique) et un comburant du fait de sa structure aérée. La chaleur extérieure est un facteur de risque aggravant et les incidents sont significativement plus nombreux au cours de la période estivale (14 sur les 20 recensés en 2018).

Les éco-organismes des filières DEEE et piles et batteries portables travaillent conjointement sur ce sujet afin d'améliorer la sécurité aussi bien par des actions en amont (inciter les détenteurs à retirer les batteries avant de se débarrasser de leurs équipements) que par des actions en aval (sécuriser les processus de prise en charge par les acteurs de la filière DEEE).

A plus long terme, on peut également estimer que les fabricants apporteront des innovations permettant d'améliorer la stabilité thermique des batteries Li-ion. Ceci pourrait provenir de la mise au point des batteries à électrolyte solide qui font l'objet actuellement de nombreux travaux de recherche. Au-delà des gains de performance, ces batteries apporteraient une nette amélioration en matière de sécurité puisque contrairement aux électrolytes liquides organiques, les électrolytes solides sont moins inflammables voire pas du tout dans le cas des électrolytes inorganiques.

D'autres pistes sont ouvertes dans le domaine des retardateurs de flammes même si leur utilisation présente encore des inconvénients. En effet, ajoutés à l'électrolyte ils diminuent les performances électrochimiques de la batterie. Afin de contourner ce problème, une publication récente propose d'intégrer du triphenyl phosphate (TFP) en l'encapsulant dans des microfibrilles de polymère constituant le séparateur<sup>62</sup>. Ainsi le TFP ne gêne pas le bon fonctionnement de la batterie mais si un échauffement a lieu, le polymère fond (à partir de 160°C) et libère le TFP, un ignifugeant qui permet d'empêcher la propagation d'incendie.

De manière générale, les améliorations en matière de sécurité occupent deux champs de recherche : améliorer la gestion des cellules et de l'électronique (BMS) ou diminuer les risques liés aux interactions chimiques (additifs divers, choix des matériaux...)

### **2.3.3 Gestion de la sécurité dans les installations de recyclage des batteries Li-ion**

Bien que cet aspect puisse être intégré dans les procédés de recyclage, il semble plus judicieux de l'aborder ici pour la continuité de la lecture.

La prise en charge de batteries Li-ion à recycler doit donc impérativement se faire dans des conditions de manutention adéquates permettant de préserver l'intégrité des batteries. La problématique est différente selon qu'on prend en charge des batteries de types portables ou des batteries industrielles type VEH.

En effet, les batteries de VEH, d'un poids moyen de 250 kg sont manutentionnées à l'unité et passent par une phase initiale de décharge (si on envisage une seconde vie, une phase de test préalable permet de séparer les flux de batteries à recycler des flux de batteries à reconditionner). Le processus de décharge peut se faire en saumure ou au travers d'une résistance. Dans le premier cas, il est impératif de ventiler du fait d'un dégagement possible d'oxygène (en fonction de la composition de la

---

<sup>62</sup> Materials for Li-ion battery safety (Kai Liu, Yayuan Liu, Dingchang Lin, Allen Pei and Yi Cui) - Stanford University - *Science Advances* - 22 Juin 2018



cathode) susceptible de créer une explosion mais aussi des risques d'émissions de fluorure d'hydrogène (généré par le contact de l'électrolyte avec de l'eau). Dans le deuxième cas, la phase de décharge doit être contrôlée pour éviter une montée en température > 90 ° susceptible de provoquer un emballement thermique. Une fois la décharge réalisée, le démantèlement doit être effectué dans un environnement ventilé pour limiter l'exposition au gaz toxiques pouvant émaner de l'électrolyte.

Les batteries portables ne passent pas par une phase de décharge qui serait trop coûteuse à mettre en œuvre. De plus, les charges résiduelles sont moins importantes que pour les batteries de VEH.

Pour les batteries portables, le risque d'emballement thermique ne pose pas de problème dans le cas d'un procédé de traitement pyro-métallurgique. En revanche, dans le cas d'un traitement strictement mécanique ou hydro-métallurgique, il sera nécessaire de réaliser la première étape de broyage en atmosphère inerte ou en milieu cryogénique.

## 2.4 Seconde vie

Lorsqu'une batterie de véhicule électrique (et hybride rechargeable) n'atteint plus que 70 à 80 % de sa capacité, elle ne permet plus d'assurer sa performance initiale (diminution de l'autonomie et de la puissance disponible).

Dans ce cas, on peut envisager une remise à niveau qui consiste à changer les cellules de la batterie n'assurant plus la demande en énergie du véhicule. Cette opération implique l'identification des cellules non performantes, leur désassemblage, et leur remplacement par des cellules nouvelles, provenant par exemple d'autres batteries usagées. Une batterie ainsi reconditionnée peut alors être utilisée à nouveau dans un VEH. Il s'agit donc d'un réemploi au sens de sa définition réglementaire.

Le MNTRC<sup>63</sup> estime dans un rapport de 2014 que le coût d'un tel reconditionnement représenterait le quart du prix d'acquisition d'une batterie neuve. L'entreprise Renault qui travaille sur le sujet estime plutôt qu'il serait de l'ordre de 60 à 80 % du prix d'une batterie neuve.

On peut aussi envisager une réutilisation de la batterie pour une application différente, et notamment pour du stockage stationnaire. Cette opération nécessite le désassemblage de toutes les cellules de la batterie, leur test et leur réassemblage selon une configuration spécifique, et le développement d'un système de commande adéquat<sup>64</sup>.

### Remarque :

*Sollicitée sur le sujet, la DGPR considère que l'utilisation d'une batterie en stockage stationnaire ou à des fins de propulsion dans un VEH relève d'un usage identique (le stockage d'énergie). De ce fait les définitions réglementaires de réemploi et de préparation en vue de réemploi s'appliqueraient aussi dans le cas de la reconversion d'une batterie de VEH en batterie pour stockage stationnaire.*

C'est-à-dire qu'une batterie issue de VEH dans le but d'être reconditionnée pour un usage en VEH ou en stockage stationnaire ne transiterait pas par le statut de déchet (ce qui permettrait de pratiquer cette activité en dehors d'une ICPE).

*Par ailleurs, la DGPR précise qu'il est envisagé de prévoir dans le droit national que les opérations de préparation en vue de la réutilisation d'un objet ou composant d'un objet destiné au même usage que*

<sup>63</sup> Mineta National Transit Research Consortium (2014). Remanufacturing, repurposing, and recycling of post-vehicle application lithium-ion batteries. MNTRC Report 12-20. <http://transweb.sjsu.edu/mntrc/>

<sup>64</sup> L'entreprise Renault mentionne qu'une réutilisation en stationnaire peut être envisagée sans modification

*l'usage initial permettent une sortie du statut de déchet automatique<sup>65</sup> dès lors que l'objet ou composant d'objet est conforme aux réglementations produits applicables.*

Alors que la durée de première vie d'une batterie de VEH est estimée entre 6 et 10 ans<sup>66</sup>, ces batteries pourraient potentiellement avoir une seconde vie qui pourrait durer entre 5 et 10 ans de plus.

On comprend bien entendu l'intérêt environnemental mais également économique d'un tel allongement de la durée de vie. Le prix des batteries étant encore un frein au développement des VEH, une valeur de revente pour une application en seconde vie permettrait de modifier la chaîne de valeur, la valeur de revente pour une application en seconde vie participant alors à l'amortissement des coûts de fabrication (de manière directe lorsque la batterie est en location par le constructeur ou de manière indirecte lorsque l'utilisateur du VEH en est propriétaire).

Dans le cas de véhicules hybrides (rechargeables et à fortiori non rechargeables), la durée de vie du véhicule étant supérieure à celle de la batterie, on peut penser que les propriétaires conserveront leur véhicule malgré une performance dégradée du moteur électrique (dans ce cas, le véhicule reste parfaitement utilisable avec son moteur thermique). De ce fait, et aussi parce qu'elles ont des capacités inférieures, le potentiel de seconde vie pour ces batteries sera certainement plus faible.

En revanche la dégradation de performance de la batterie de véhicules « tout électrique » entraîne rapidement la nécessité de changer de batteries (ou de véhicule). Il existe donc un important gisement potentiel de batteries aptes à une seconde vie.

Les possibles applications stationnaires en seconde de vie concernent essentiellement :

- Le stockage résidentiel (sur installations EnR individuelles) / autoconsommation
- Le stockage et la régulation sur réseau électrique (EnR)
- La fonction secours (substitution aux groupes électrogènes) / alimentation sans coupure (hôpitaux, télécommunications, datacenter...)
- Le remplacement de batteries Plomb/acide (chariots élévateurs...)

Au regard des prévisions de croissance du marché des VEH d'une part et des EnR d'autre part, l'enjeu est important même s'il reste assez lointain pour la plupart des pays (pas de volume de batteries de VEH en fin de vie réellement importants avant 2025 – 2030) en dehors de la Chine et la Norvège (2020 – 2025). C'est pourquoi de nombreux acteurs se penchent sur le sujet.

En Chine, l'entreprise China Tower a signé un partenariat avec 16 des principales entreprises de fabrication de VEH et de batteries afin de développer des solutions pour la seconde vie avec un potentiel d'utilisation de 54 GWH soit 2 Millions de batteries de VEH.

Au Japon, Nissan a créé en 2010 une joint-venture, 4R Energy Corporation avec l'entreprise Sumitomo dans le but d'effectuer des recherches et conduire des tests sur la seconde vie des batteries qui ont précédemment été utilisées dans les modèles Nissan LEAF. Après 8 ans de recherche, 4R Energy Corporation a annoncé en Mars 2018 l'ouverture d'une usine dédiée au recyclage et la réutilisation des batteries de Nissan LEAF. Les premiers modèles ont été lancés en 2008 et le nombre de véhicules en fin de vie reste encore anecdotique.

---

<sup>65</sup> Cet allègement consiste à supprimer l'obligation de traitement dans une installation classée (ICPE) comme préalable à cette procédure de sortie.

<sup>66</sup> Les premiers retours d'expérience de la part des fabricants de batteries et VEH semblent indiquer que la durée de vie des batteries aurait été jusqu'ici sous-estimée (un scénario de durée de vie plus importante est abordé dans la partie prospective de l'étude).

En Europe, la plupart des constructeurs automobiles annoncent des projets sur ce thème. En collaboration avec Eaton, Nissan a aussi lancé le X Storage Building pour développer le stockage énergétique industriel en utilisant des batteries en seconde vie. Ils ont équipé le stade Amsterdam Arena d'un nouveau système d'électricité de secours, composé de 280 batteries de Nissan LEAF branchées sur une installation photovoltaïque et qui remplace les groupes électrogènes de secours.

Renault et PowerVault ont également signé un partenariat pour l'utilisation de batteries issues de la Fluence ZE en stockage domestique au Royaume Uni. Renault fournit également des modules issus de ces batteries pour des applications mobiles (mini bateaux de loisirs par exemple).

En France, l'entreprise SNAM, spécialiste du recyclage des batteries a également annoncé en 2018 un investissement de 25 Millions d'€ pour fabriquer des batteries « neuves » destinées à du stockage stationnaire et contenant 80 % d'éléments issus de batteries de VEH usagées. Le potentiel annoncé est de 10 à 20 MWh de batteries en 2019 et un objectif de 250 MWh/an à partir de 2023. La SNAM travaille avec plusieurs constructeurs automobiles en Europe dans le cadre de partenariats de longue durée (certains contrats sont signés pour 10 ans).

Un consortium d'entreprises européennes participent au projet ELSA (Energy local storage advanced system) qui vise à développer des solutions innovantes pour un stockage d'énergie bon marché en donnant une seconde vie aux batteries Li-ion de VEH. La particularité du projet est de vouloir développer un système qui permet d'intégrer, sans reconditionnement, tous les modèles de batteries présents dans les VEH. Ce projet regroupe 10 entreprises et universités de 5 pays européens (Coordonnées par Bouygues énergie services). Financé par le programme européen horizon 2020, il s'est terminé début 2019 avec 6 prototypes installés en Europe qui semblent démontrer le potentiel de la solution. Les démonstrateurs représentent plusieurs contextes d'application et couvrent des services divers tels que l'atténuation de la congestion du réseau, l'équilibrage local du réseau, le soutien de la tension ou la régulation.

Si l'idée d'utiliser des batteries de VEH en seconde vie pour du stockage stationnaire semble parfaite. Elle n'est pas si simple et se heurte à un certain nombre de difficultés techniques, économiques et réglementaires<sup>67</sup>. L'ensemble des initiatives mentionnées restent à un stade d'expérimentation et la seconde vie cherche encore son modèle économique.

### **2.4.1 Des difficultés techniques**

- **La diversité du gisement**

L'absence de standardisation facilite l'innovation chez les fabricants de batteries, mais constitue un frein au développement de la seconde vie. En effet, la variété des technologies à la fois sur les batteries Li-ion et sur les BMS posent des problèmes de compatibilité. Pour les usages requérant plusieurs batteries, il est en effet nécessaire d'assembler des batteries ayant des caractéristiques électriques homogènes (même tension, même puissance, système de gestion compatible).

Cet aspect faisait partie des axes de recherche du programme ELSA qui affirme pouvoir « *intégrer, sans reconditionnement, tous les modèles de batteries présents dans les véhicules électriques aujourd'hui* ». Celles des véhicules Renault (200.000 véhicules électriques vendus en à fin 2018) mais aussi celles utilisées par les autres constructeurs automobiles. Cette flexibilité réduit considérablement les coûts, à la moitié du prix d'une batterie neuve, selon Nicolas Schottey, expert chez Renault. Ce qui permet de devenir compétitif face à d'autres technologies de stockage.

---

<sup>67</sup> Voir synthèse du projet Abatt-relife (ADEME – Octobre 2015)

L'entreprise Renault confirme que les solutions élaborées dans le cadre du projet ELSA permettent aujourd'hui de proposer à la vente des systèmes modulaires par « briques » de 24 KW et 96 KW et que les premiers contrats commerciaux ont été signés début 2019.

- **Un vieillissement non linéaire**

En ce qui concerne le comportement au vieillissement des batteries de véhicules électriques, des études<sup>62</sup> et <sup>68</sup> montrent la présence de « caractéristiques de vieillissement non linéaires » ce qui compromet une seconde vie simple à mettre en œuvre pour ces batteries. Le vieillissement est fortement influencé par l'usage et notamment le kilométrage moyen par an ainsi que les profils de charges et décharges (fréquence, niveau de décharge, puissance de recharge, ...), mais aussi par la durée de vie calendaire.

Il semble alors nécessaire de réaliser des tests au niveau de chaque cellule prise individuellement. Dans ce cas, ces tests doivent pouvoir être mis en œuvre de manière rapide et standardisée. C'est la raison pour laquelle l'accès aux informations du BMS (Battery Management System) est stratégique pour les acteurs de la seconde vie des batteries de VEH

De son côté, l'entreprise Renault indique que d'après ses propres mesures sur des batteries 2<sup>ème</sup> vie, il n'est pas constaté à ce stade d'écart de vieillissement des cellules au sein d'un même pack. Et que les premiers résultats des mesures en cours en 2019 avec le CEA sur des packs Renault confirment ce constat.

Quoiqu'il en soit, rapidité du diagnostic et garantie de l'efficacité de la reconfiguration sont des enjeux clés pour la seconde vie des batteries.

#### **2.4.2 Des difficultés économiques**

Sur le plan économique, de nombreuses inconnues demeurent ;

- Incertitudes sur le gisement réellement disponible : quelle part des batteries restera en utilisation dégradée dans les véhicules ? quel pourcentage de cellules seront réutilisables ? et pour quelle application (nouvelle batterie pour VEH ou stockage stationnaire) ?
- Incertitudes sur le développement des EnR, le coût de l'électricité et les modalités d'intégration des EnR au réseau qui influencent les besoins en stockage (les deux applications les plus prometteuses d'un point de vue technico-économique étant le stockage d'énergie en habitation et l'utilisation pour des services auxiliaires)
- Incertitudes sur l'évolution des performances et du prix des batteries neuves dans les années qui viennent : les batteries en seconde vie seront-elles compétitives face aux batteries neuves ?

La stratégie des acteurs sera également déterminante. La seconde vie nécessite de fortes compétences (sur le diagnostic et le réassemblage) qui sont du domaine des fabricants et intégrateurs (constructeurs automobiles). Ces acteurs semblent les mieux placés car ils maîtrisent le fonctionnement de la batterie et son vieillissement mais uniquement sur leur marque propre.

---

<sup>68</sup> « Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications "véhicule électrique" : Combinaison des effets de vieillissement calendaire et de cyclage. » - THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON - Eduardo REDONDO-IGLESIAS (Octobre 2017)

Les recycleurs ont des compétences complémentaires indispensables à la fois pour valoriser les gisements non réutilisables mais aussi pour la mise en œuvre de process industriels typiques des acteurs du recyclage : la collecte et le tri. Pour s’implanter sur cette activité, ils doivent être capables de gérer toutes les marques de batteries de VEH afin d’avoir un avantage concurrentiel sur les acteurs amonts (fabricants / intégrateurs).

Des partenariats productifs doivent se nouer entre recycleurs, constructeurs automobiles et intégrateurs, et enfin, développeurs et utilisateurs potentiels de batteries de seconde vie pour la production ou le stockage d’énergie comme l’encourage par exemple le gouvernement chinois.

Certains acteurs pourraient également être tentés par une intégration de la filière. Blue Solutions par exemple, seul fabricant de batteries LMP semble vouloir développer en interne le recyclage de ses batteries. L’entreprise aurait dans ce cas tous les atouts pour gérer la seconde vie de ses batteries sachant qu’un des axes de son développement est le stockage stationnaire. On assiste à une stratégie similaire de la part de BYD en Chine.

L’entreprise TESLA, constructeur automobile qui a choisi d’assembler ses batteries envisage également d’intégrer l’aval. La réutilisation pourrait alimenter son activité sur le stockage stationnaire et à long terme cela pourrait également sécuriser en partie ses approvisionnements en matières premières.

Cependant, à l’heure actuelle la seconde vie des batteries cherche encore son modèle économique.

### **2.4.3 Des difficultés réglementaires**

Une première difficulté réglementaire concerne la responsabilité du metteur sur le marché. Cette responsabilité concerne l’usage de la batterie.

Dans le cas d’une batterie en seconde vie, il est donc impératif de pouvoir identifier et encadrer les acteurs de la réutilisation, il faut également pouvoir assurer une garantie sur la seconde vie..., etc.

Concernant la fin de vie des batteries dans le cas d’une filière REP, il s’agit de mettre en place un mécanisme qui annule la responsabilité de fin de vie du premier fabricant et met en œuvre la responsabilité de l’entreprise qui met sur le marché des batteries en seconde vie.

Dans la réglementation européenne actuellement, un produit « réemployé » ne passe pas par la case « déchet », la responsabilité du premier metteur en marché reste donc engagée (ce qui n’est pas le cas pour les produits « réutilisés »).

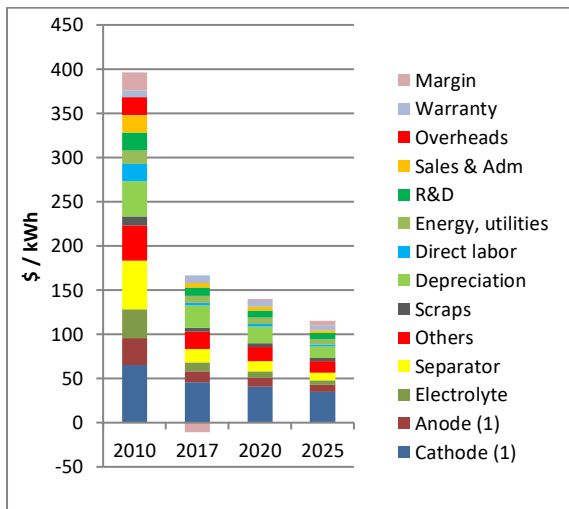
La réglementation devra clarifier l’ensemble de ces points et mettre en place les mécanismes de contrôle et de responsabilités adéquats. La position de la DGPR en France (voir plus haut) semble aller dans le sens d’une facilitation de toutes les activités de réemploi et réutilisation des batteries de VEH en évitant le classement en déchets (ou en facilitant la sortie du statut de déchet), ouvrant ainsi la voie à ces activités en dehors du champ de la réglementation contraignante des ICPE. Si on peut saluer cette approche qui facilite la seconde vie des batteries des VEH, il convient cependant de prévoir un cadre réglementaire qui prennent en compte les enjeux environnementaux (toxicité) et de sécurité, associés aux batteries Li-ion et permettent de garantir la traçabilité des produits en seconde vie au regard de la responsabilité des metteurs sur le marché.

Une autre difficulté réglementaire est liée aux opérateurs de réseau. En effet, ils ne peuvent pas posséder leurs propres systèmes de stockage d’énergie puisqu’ils seraient alors considérés comme des fournisseurs d’énergie. Or, la législation européenne impose aujourd’hui de séparer les deux types d’activité...

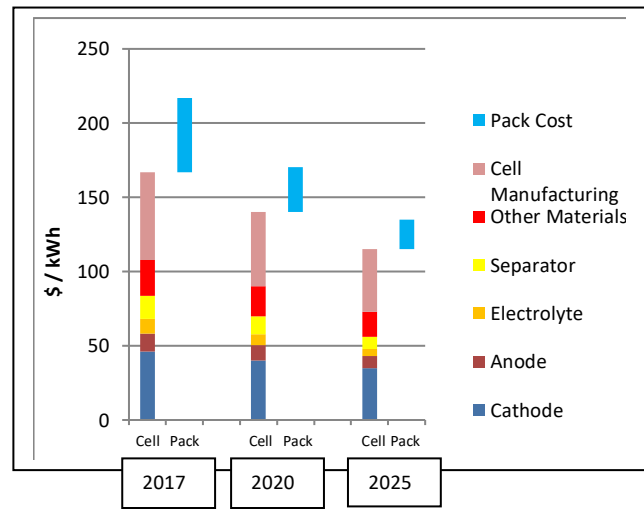
## 2.5 Coûts et disponibilités des métaux

La croissance du marché des batteries Li-ion et les économies d'échelle associées ont permis depuis 2010 d'optimiser les procédés et de réduire fortement les coûts de fabrication. Les coûts directement liés aux matières premières (cathode, anode, électrolyte et séparateur) représentent près de 50 % du coût total de fabrication. À elle seule, la cathode représente 30 % du coût de fabrication des batteries Li-ion.

Les autres coûts, déjà fortement optimisés, deviennent de plus en plus incompressibles (voir figures ci-dessous). D'où une sensibilité accrue (même si elle reste limitée – voir en conclusion du paragraphe) du coût de fabrication des batteries au cours des matières premières, et en particulier les métaux qui constituent les cathodes.



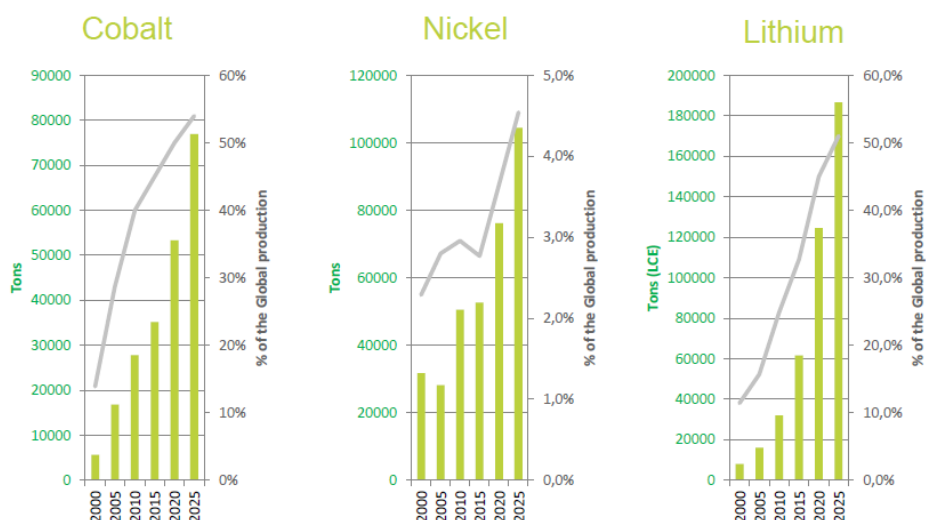
**Fig. 13** : Evolution du coût moyen de fabrication d'une cellule pour batterie Li-ion (technologie NMC) – source AVICENNE ENERGY (2018)



**Fig. 14** : Coût moyen de fabrication des cellules et des packs pour la technologie NMC – Source AVICENNE ENERGY (2018)

**NB** : En 2017, la majorité des fabricants de cellules ne dégagent pas de rentabilité sur les marchés de masses (cellules pour VEH)

Sur un marché où les prix sont le reflet d'un ajustement entre l'offre et la demande, on peut penser que des tensions peuvent apparaître sur certaines ressources dont la demande est en forte augmentation. Les acteurs du marché partagent leurs inquiétudes concernant en particulier le coût et la disponibilité du Lithium, du Cobalt et du Nickel, bien que ce dernier ne soit pas identifié comme un métal critique par l'Union Européenne.



Sources: AVICENNE ENERGY 2017

1

**Fig 15** : Evolution des besoins en métaux pour la fabrication de batteries par rapport à production totale

Le graphique ci-dessus montre que le marché des batteries n'affiche pas la même dépendance à ces trois métaux. A partir de 2021, le marché des batteries captera plus de 50 % de la production de Lithium et de Cobalt. Alors que moins de 5% du Nickel produit dans le monde sera utilisé pour la fabrication de batteries (alors même qu'il est de plus en plus utilisé dans les batteries de VEH au détriment du Cobalt)

De ce fait, on peut déjà souligner en premier lieu qu'il existe une forte sensibilité des cours du Lithium et du Cobalt au marché des batteries. Ce qui n'est pas vrai pour le Nickel.

Concernant le Manganèse, son utilisation pour les batteries (LMO, NMC) ne représente que 2 % de la consommation mondiale soit environ 35 000 tonnes en 2018 et ne dépassera pas les 70 000 tonnes en 2021 (source OFI Asset Management). Au regard des réserves disponibles (le Manganèse constitue environ 0,1% de la croûte terrestre, ce qui en fait le 12e élément le plus abondant sur la planète), les couts et la disponibilité de ce métal n'auront pas d'influence sur le marché des batteries. La suite propose d'étudier plus en détail les marchés du Lithium, du Nickel et du Cobalt.

### 2.5.1 Le Lithium

Les batteries rechargeables Li-ion représentent aujourd'hui le principal segment de consommation du marché du lithium (37% en 2015 et 46 % en 2017)<sup>69</sup>. Le Lithium étant un métal instable, il n'existe pas à l'état naturel. Sur le marché il est commercialisé principalement sous forme de carbonate, d'oxyde ou d'hydroxyde de Lithium.

<sup>69</sup> <http://www.panorama-ifpen.fr/criticite-du-lithium/>

• Part des différents secteurs dans la consommation de lithium en 2017

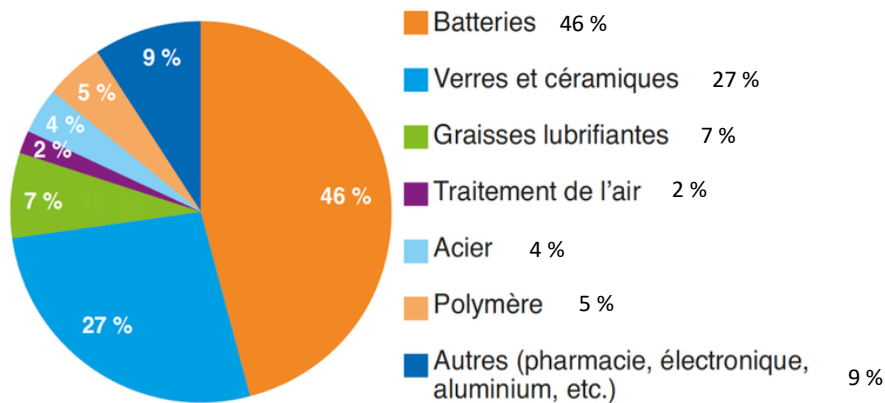


Fig 16 : part des différents secteurs d'activité dans la consommation de lithium (2017) – Source E. HACHE/IPPEN

Dans une batterie de VEH, le Lithium est contenu sous forme ionique dans le matériau actif de la cathode (95 %) et dans le sel de l'électrolyte (5%). Pour une batterie de 250 kg, il faut compter environ 15 kg de carbonate de Lithium (correspondant à environ 3 kg de lithium-métal), soit un coût d'environ 200 USD au cours de 2017. Or une batterie coûte environ 7700 USD (pour une batterie de 35 kWh à 220 USD / kWh). Le Lithium représente donc moins de 3% du coût de fabrication d'une batterie.

Bloomberg a calculé en 2017<sup>70</sup> qu'un triplement du cours du Lithium aurait pour conséquence une augmentation de 2 % du prix des batteries (alors que ce chiffre monte à près de 13 % dans le cas du Cobalt), ce qui est relativement faible.

La demande en Lithium augmente continuellement. Elle est de 43 000 T (USGS, 2017<sup>71</sup>) équivalent Lithium-métal et pourrait être multipliée par 3 d'ici 2025 (soit environ 130 000 T équivalent Lithium-métal). Cette augmentation est étroitement liée à la demande croissante des batteries rechargeables (voir graphique ci-dessous)

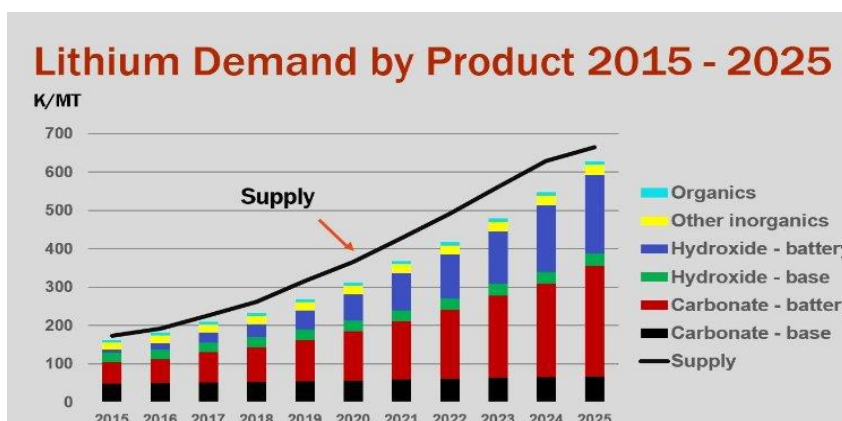


Fig 17 : Evolution prévisible de la demande en lithium (sous différentes formes)  
Source : Closeloop<sup>72</sup>

<sup>70</sup> <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-lithium-battery-future/>

<sup>71</sup> Mineral commodities summary 2018 (USGS)

<sup>72</sup> Closeloop : Raw Material for Li-ion and Redox flow batteries – Dr Pertti Kauranen (Nordbatt 2017 – 1-3 Nov 2017, Kokkola)

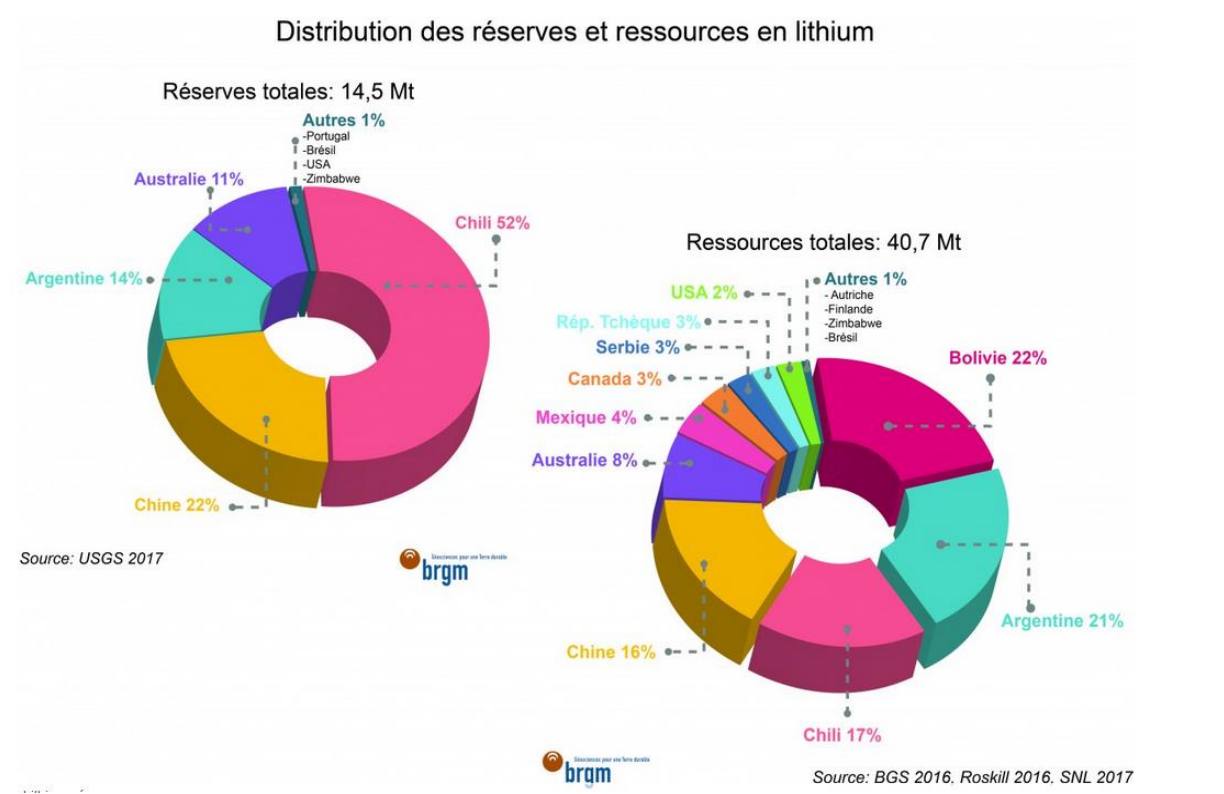


La production mondiale de Lithium est historiquement partagée entre deux principales sources lithinifères :

- Les saumures, tels que les *salars* d'Amérique du Sud situés dans le « triangle du lithium », partagés entre l'Argentine, le Chili et la Bolivie. Ils représentent 55% de la production mondiale en 2015 (cependant seuls le Chili et l'Argentine les exploitent actuellement).
- Les minéraux lithinifères issus des, pegmatites, greisens et coupoles de granites à métaux rares, tels que Greenbushes en Australie – représentant 45% de la production mondiale en 2015.

Cependant, depuis quelques décennies, de nombreuses ressources dites « non-conventionnelles » présentant de nouveaux axes potentiels de production ont été identifiées.

L'USGS estimait en 2017 les réserves mondiales en Lithium à 14,5 Mt équivalent Lithium-métal (le Chili, la Chine et l'Argentine étant les principaux pays hôtes) alors que les ressources<sup>73</sup> sont estimées à 40,7 Mt équivalent Lithium métal (la Bolivie, l'Argentine et le Chili étant les principaux acteurs).



**Fig 18 :** Distribution des réserves et ressources en Lithium

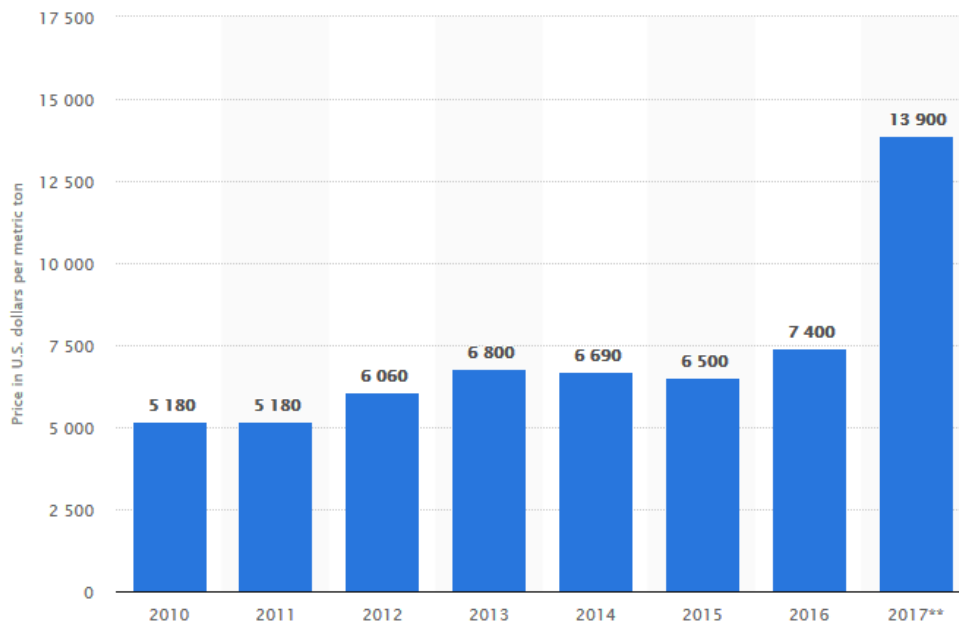
Au regard de ces éléments, on peut conclure qu'il n'existe pas de tensions à long terme sur le Lithium. Les réserves étant suffisantes pour combler l'accroissement de la demande. Il ne devrait pas non plus exister de tension à court terme puisque l'USGS estime dans son rapport annuel (2018) sur les ressources que les capacités mondiales de production sont de 58 000 tonnes équivalent Lithium-métal en 2016 (Pour une demande de 43 000 T en 2017).

De plus la société ERAMET confirme la possibilité de développer des capacités supplémentaires de production en moins d'un an pour la séparation/évaporation de saumure. Un projet d'investissement

<sup>73</sup> Les réserves constituent la partie économiquement exploitable des ressources aux conditions technico-économiques du moment.

de 400 Millions USD est actuellement à l'étude pour produire annuellement 20 000 tonnes équivalent carbonate de lithium en Argentine à compter de 2021.

Pourtant le cours du carbonate de Lithium a fortement augmenté en 2017 avec un quasi doublement en 1 an.



**Fig 19** : Evolution du cours du carbonate de Lithium – source statista.com

Après être monté à près de 18 000 USD/T en début d'année, le cours du carbonate de Lithium est retombé à 13 000 USD/T en Aout 2018 et reste relativement stable depuis.

La volatilité des cours du carbonate de Lithium semble donc alimentée par de la spéculation et évoluer au gré des annonces des acteurs de la production qui constituent actuellement un oligopole. En effet, 3 acteurs FMC, Albermale (Etat-Unis) et SQM (Chili) détiennent 50 % de parts de marché et 40 % supplémentaires sont détenues par des entreprises chinoises. A l'avenir, la concentration géographique des réserves, celle des acteurs de la production et celle des marchés utilisateurs (la Chine dominante très largement le marché des VEH) rendent le cours du Lithium principalement dépendant de facteurs géopolitiques.

Enfin, seul 1% du Lithium est actuellement recyclé... cette source d'approvisionnement est donc au moins à moyen terme un facteur négligeable pour le marché global du Lithium.

## 2.5.2 Le Nickel

Les quantités de nickel utilisées dans la fabrication de batteries sont beaucoup plus importantes que celles de Lithium. La technologie NMC (Nickel/Manganèse/Cobalt) s'imposant de plus en plus sur les batteries Li-ion, la demande en Nickel a tendance à s'accroître. D'autant plus qu'au sein de la technologie NMC, le pourcentage de nickel a également tendance à augmenter (De 33 % sur les premières technologies NMC-111, à 80 % sur les dernières technologies NMC-811).

Bien que le Nickel ne soit pas considéré comme un métal critique par l'union européenne, il préoccupe les constructeurs de batteries du fait de l'importante volatilité de ses cours.

Il coûtait 5000 USD/tonne au début des années 2000, 10000 USD/t en 2002, 15000 USD/t en

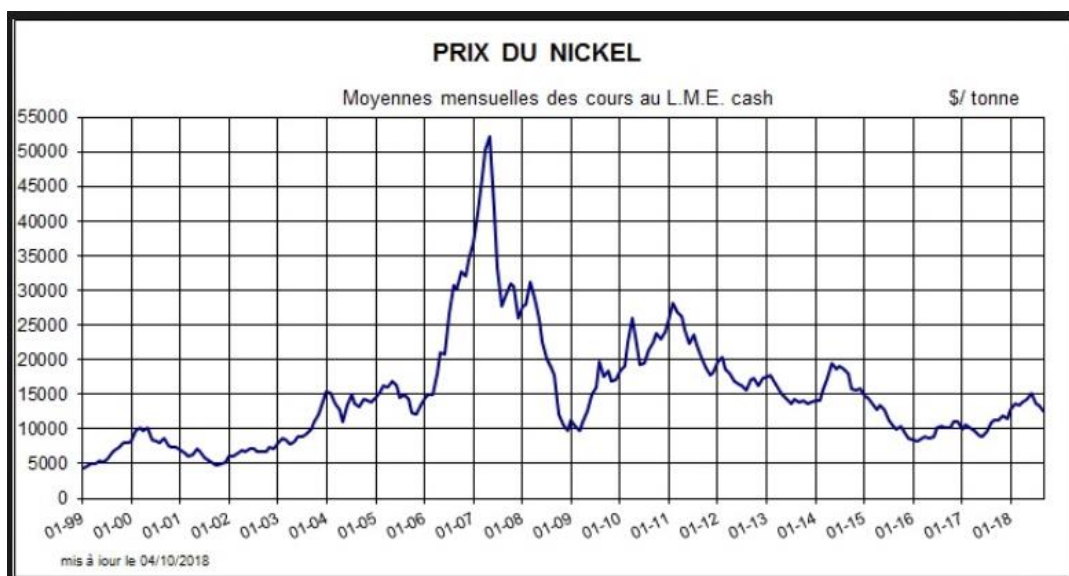
2005. Il a culminé à 50000 USD/t en 2007 avant de subir les effets de la crise de 2008.

Le prix du Nickel a fluctué depuis entre 27 000 et 9 000 USD/tonne (en 2017). Il est actuellement autour de 13 000 USD/ tonne.

Cependant, cette volatilité n'est pas liée au marché des batteries électriques qui absorbent moins de 5 % de la production mondiale de Nickel.

Au-delà de quelques inquiétudes justifiées sur les capacités d'exploitation, la très forte poussée de 2005/2006 est avant tout le fruit d'une forte spéculation<sup>74</sup> sur un potentiel déséquilibre entre l'offre et la demande.

Les décisions des états ont également une forte influence sur les cours. Ainsi le cours a subi une poussée à la hausse à près de 20 000 USD / T en 2014 lorsque l'Indonésie a mis en œuvre des restrictions à l'exportation afin d'encourager le développement de sa filière aval. Si cette politique a effectivement permis de développer le raffinage en Indonésie (avec l'aide notamment d'investissements chinois), les difficultés des entreprises minières et l'état des finances publiques ont finalement conduit le pays à renoncer à une large partie de ces mesures. En 2016, les cours du Nickel<sup>75</sup> avait rechuté.



**Fig. 20** : Evolution des cours du nickel – Source A3M

Outre l'Indonésie, les Philippines (1<sup>er</sup> producteur mondial avec 20 % de parts de marché), le Canada, l'Australie, la Russie et la France (Nouvelle Calédonie) sont les principaux producteurs mondiaux de Nickel avec des parts de marché oscillant autour de 10 % chacun.<sup>76</sup>

En se basant sur les capacités de fabrication de batteries Li-ion (Voir fig 13, Chap 1.5) annoncées en 2021 (incluant les prévisions d'investissement), soit environ 280 GWh, et en faisant des projections sur le type de technologies utilisées (50 % pour les batteries NMC- 622, 35% pour les NMC-111 et 15 % pour les NCA), la société française OFI Asset Management propose une estimation des besoins en Nickel dans les années à venir<sup>77</sup>.

<sup>74</sup> <http://news.goldseek.com/GoldSeek/1183932000.php>

<sup>75</sup> « Indonesia Eases Export Ban on Nickel Ore, Bauxite », Reuters 12 Janvier 2017

<sup>76</sup> La transition énergétique face au défi des métaux critiques – Etude de l'IFRI (Gilles LEPESANT – Janvier 2018)

<sup>77</sup> <https://www.ofi-am.fr/support/voiture-electrique-quel-impact-sur-la-demande-de-metaux-5a995d8498029#metaux>

Cette approche, bien qu'imparfaite car elle considère que la technologie LFP sera négligeable alors qu'elle reste utilisée actuellement pas les constructeurs Chinois notamment pour les bus électriques et elle considère que les capacités de production seront utilisées à leur maximum, permet d'évaluer la demande maximale de Nickel à l'horizon 2021.

Pour le secteur des VEH, cette demande passerait ainsi de 22 000 tonnes en 2017 à 158 000 tonnes en 2021. A cet horizon, tout million de véhicule électrique supplémentaire générerait un surcroît de demande de 34 000 tonnes de Nickel, ceci en raison de la généralisation des types de batteries à haute teneur en Nickel.

Sachant que la production annuelle de Nickel est actuellement d'environ 2 Mi de tonnes, même en ne prenant en compte que la production de Nickel de Classe 1 (seul adapté pour la fabrication de batteries) qui représente 40 % de la production mondiale, la hausse de la demande représente 8,75 % / an sur ce segment.

Considérant que la production de Nickel de classe 1 restera probablement stable sur les années à venir (au regard des projets d'investissements miniers), on pourrait assister à une éventuelle hausse des cours. Celle-ci entraînerait un rapide ajustement de la demande par des effets de substitution. Par exemple, le Nickel est aujourd'hui utilisé en décoration pour le placage de certains objets. La demande, estimée pour cette activité à 130 000 tonnes en 2016, pourrait ainsi totalement disparaître au profit de l'utilisation d'autres solutions moins onéreuses.

Le Nickel est déjà un des métaux les plus recyclés au travers du recyclage des ferrailles qui en contiennent. En Europe on recycle environ 300 000 T de Nickel chaque année à partir de 3 Millions de tonnes de ferrailles (en moyenne dans l'union européenne, les ferrailles contiennent 10% de Nickel)<sup>78</sup>. Aux Etats Unis 90 000 T de Nickel sont recyclées (soit 39 % de la consommation annuelle américaine)<sup>79</sup>.

Les réserves de Nickel sont actuellement estimées à 74 Mi de tonnes pour les gisements conventionnels (130 Mi de tonnes pour les ressources correspondant à une teneur > 1 % et 174 Mi de tonnes en tenant compte d'une teneur > 0,5 %).

En conclusion, sauf apparition d'éventuels facteurs géopolitiques, il ne devrait pas y avoir de problème d'approvisionnement sur le Nickel, même si l'ajustement entre offre et demande devrait générer une hausse sur les années à venir.

### **2.5.3 Le Cobalt**

Le Cobalt est un matériau indispensable à la constitution des batteries de véhicules électriques. Si les nouvelles générations de batteries (LFP, NCA, NMC) en utilisent moins que les premières (LCO), il reste néanmoins un produit incontournable même sur les technologies les plus récentes.

Les batteries portables utilisent encore largement la technologie LCO même si on observe une migration vers le NMC qui lui-même évolue vers des compositions de moins en moins riches en Cobalt (et de plus en plus riche en Nickel).

Les batteries de VEH utilisent de plus en plus des technologies à forte teneur en nickel telles que NCA (utilisé par TESLA) et NMC (utilisée de plus en plus par la plupart des constructeurs automobiles).

---

<sup>78</sup> Le nickel dans l'Union Européenne (Nickel Institute) - [https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/MediaCenter/NilnEU/NICKEL\\_EUROPE\\_FR\\_FINAL.ashx](https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/MediaCenter/NilnEU/NICKEL_EUROPE_FR_FINAL.ashx)

<sup>79</sup> Données USGS -2018

En parallèle, la technologie LFP reste utilisée par les constructeurs automobiles chinois et en particulier pour les batteries de bus électriques. Mais le gouvernement ayant annoncé en Décembre 2016, sa volonté de modifier sa politique de subventions aux bus électriques afin de soutenir le développement de batteries de meilleure qualité, cela devrait jouer en faveur du NMC au détriment du LFP<sup>80</sup>.

Le secteur des batteries reste le premier utilisateur de Cobalt puisqu'il absorbe déjà près de 50 % de la production mondiale et continue à progresser. Les fabricants de cathode recherchent généralement des produits intermédiaires du cobalt (sous forme d'hydroxyde –  $\text{Co}(\text{OH})_2$  - ou de sulfate –  $\text{CoSO}_4$ ). Ce marché des intermédiaires est en forte croissance avec un mécanisme de fixation des prix qui reste opaque. Pour y remédier, le LME prévoit d'ouvrir une cotation sur ces intermédiaires du Cobalt (aujourd'hui seul le Cobalt métal est coté au LME).

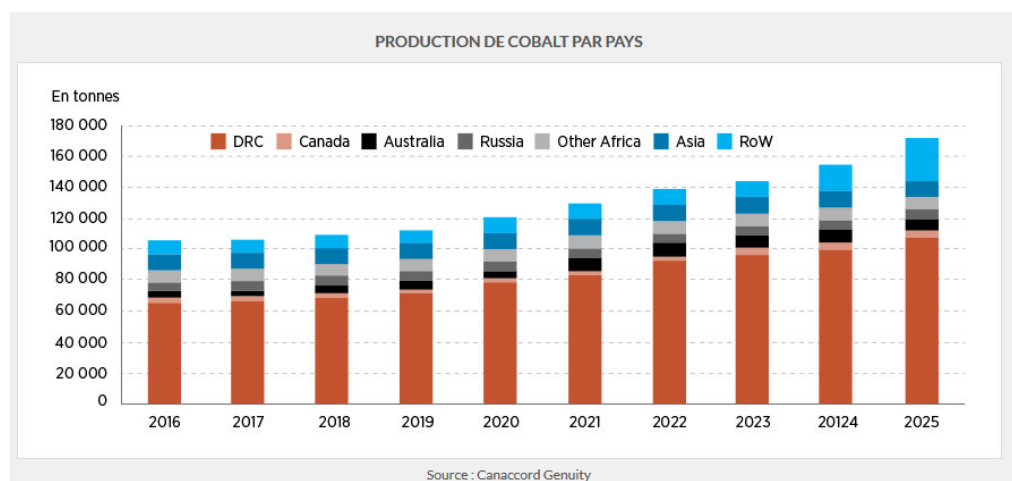
Après une flambée des cours en 2007 qui avait porté le Cobalt à 50 000 USD/tonne, le cours du métal était ensuite retombé et naviguait jusqu'en 2016 entre 15 000 et 35 000 USD/tonne. Les cours ont triplé entre 2016 et début 2018 (22 000 USD/T en 01/2016 et 96 000 USD/T en 01/2018). Après une stabilisation autour de 60 000 USD/tonne au second semestre 2018, les cours chutent à nouveau depuis début 2019 (il est actuellement sous la barre des 30 000 USD/tonne).

A ce prix, près de 50 % des producteurs (exploitants miniers) ont des coûts d'exploitation qui ne permettent pas d'être rentable<sup>81</sup> (Source BRGM – décembre 2018).

Le risque potentiel sur la ressource ainsi que la volatilité des cours du Cobalt est un risque majeur identifié par les industriels depuis plusieurs années. C'est une des motivations pour le développement des technologies Li-ion à forte teneur en Nickel qui ont également démontré la possibilité d'améliorer la densité d'énergie.

La production de Cobalt est très concentrée géographiquement. Avec 66 000 tonnes de Cobalt produites en 2016, la République Démocratique du Congo devance largement la Chine (7 700 tonnes), le Canada (7 300 tonnes) et la Russie (6 200 tonnes). La France est présente dans le Top 10 grâce à la Nouvelle-Calédonie, neuvième producteur mondial avec 3 300 tonnes en 2016.

La RDC détient également 50 % des réserves mondiales évaluées à un peu plus de 7 Mi de tonnes (USGS – 2018)



**Fig. 21** : Production de cobalt par pays

<sup>80</sup> <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/metals/120417-cobalt-prices-seen-rising-sharply-as-deficit-balloons-bmo>

<sup>81</sup> <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/structure-traditionnelle-marche-cobalt-bouleversée-besoins-mobilite-electrique>

Cette situation entraîne un risque relativement important dû à l'instabilité politique de la RDC mais aussi à sa volonté d'augmenter les taxes sur l'export de ce métal stratégique et éventuellement de court-circuiter les intermédiaires miniers (Glencore, CMOC...etc) en renationalisant les mines.

Les utilisateurs font également face à un risque d'image, les conditions d'extraction du Cobalt en RDC étant régulièrement dénoncées, notamment dans le dernier rapport Amnesty International<sup>82</sup>. Ce rapport documente les abus en matière de droits de l'homme dans l'extraction artisanale de Cobalt en RDC et souligne en évaluant les actions de 27 industriels (fabricants de cathode, de batteries, de produits électroniques, de VEH) le manque de traçabilité et de contrôle sur les sources d'approvisionnement de nombre d'entre eux.

Cette concentration est aussi industrielle puisque Glencore, 1<sup>er</sup> producteur mondial représente 35 % de la production avec 39 000 T en 2017, et China Molybdenum & Co Ltd (CMOC), deuxième producteur mondial représente 15 % du marché avec 16 500 tonnes.

Un autre facteur de risque est lié au fait que le Cobalt est un sous-produit de l'extraction d'autres minerais et en particulier le Nickel et le Cuivre. Or le cours de ces métaux reste actuellement sous pression alors que le Cobalt ne représente que 7% des revenus des producteurs de Nickel et 2% des revenus des producteurs de Cuivre. Cette situation ne favorise pas de nouveaux investissements.<sup>83</sup>

CMOC prévoit une demande totale de 112 000 T en 2018 (toutes industries confondues) et une croissance moyenne de 9% jusqu'en 2023<sup>84</sup> principalement tirée par les VEH.

On peut donc craindre des tensions sur le Cobalt et de nombreux analystes financiers anticipent une hausse des cours dans les années à venir. Face aux enjeux de volumes et d'éthique, de nombreux grands acteurs industriels tentent de sécuriser des accords d'approvisionnement avec les groupes miniers.

Par exemple, GEM<sup>85</sup> le fournisseur chinois de CATL (fabricant de batteries) a signé un contrat avec Glencore pour acheter 1/3 de sa production sur 3 ans – sous forme d'hydroxyde de Cobalt (13 800 T en 2018 / 18 000 T en 2019 et 21000 T en 2020). De leur côté, APPLE (les smartphones représentent aujourd'hui 25 % de la consommation mondiale de Cobalt – source Usine Nouvelle), mais aussi BMW, Volkswagen, ou encore Samsung ont entamé en 2018 des négociations avec Glencore également.

Pour pallier un possible déficit en Cobalt, le recyclage peut apporter des solutions. Cependant, au regard de la durée de vie des batteries, il faudra encore attendre quelques années pour que les quantités de Cobalt issues du recyclage puisse réellement peser significativement sur le marché.

En conclusion, le Cobalt est probablement le métal qui fait peser le plus d'incertitudes pour le développement des batteries Li-ion. En effet avec une production et des réserves très concentrées géographiquement dans une zone dont la stabilité politique est incertaine et le respect de normes sociales et environnementales est régulièrement questionné, la stabilité des approvisionnements pourrait être difficile à assurer. A cela s'ajoute le fait que le Cobalt est rarement un métal extrait seul, ce qui rend le développement de son extraction tributaire d'autres secteurs d'activité. Enfin, compte tenu de la durée de vie des batteries, le recyclage n'est pas une solution à court terme.

---

<sup>82</sup> "This is What We Die For": Human Rights Abuses in the Democratic Republic of the Congo Power the Global Trade in Cobalt [https://amnestyfr.cdn.prismic.io/amnestyfr%2F4db89ef9-168e-458f-9ff4-02d4fb280a03\\_time+to+recharge+report.pdf](https://amnestyfr.cdn.prismic.io/amnestyfr%2F4db89ef9-168e-458f-9ff4-02d4fb280a03_time+to+recharge+report.pdf)

<sup>83</sup> La transition énergétique face au défi des métaux critiques – Etude de l'IFRI (Gilles LEPESANT – Janvier 2018)

<sup>84</sup> CMOC Annual report 2017 - [http://www.chinamoly.com/06invest/DOC/2018/E\\_03993\\_04207.pdf](http://www.chinamoly.com/06invest/DOC/2018/E_03993_04207.pdf)

<sup>85</sup> L'entreprise chinoise GEM est à la fois un fabricant de cathodes et le plus important recycleur de batteries en Chine

## 2.5.4 Conclusion sur le cout et la disponibilité des métaux

Au regard des réserves, de l'évolution des besoins et des capacités de production actuelles, il n'y a pas de raison immédiate de craindre des tensions en ce qui concerne l'approvisionnement des métaux utilisés pour la fabrication des batteries, sauf dans le cas du Cobalt dont la disponibilité n'est pas assurée à court et moyen terme.

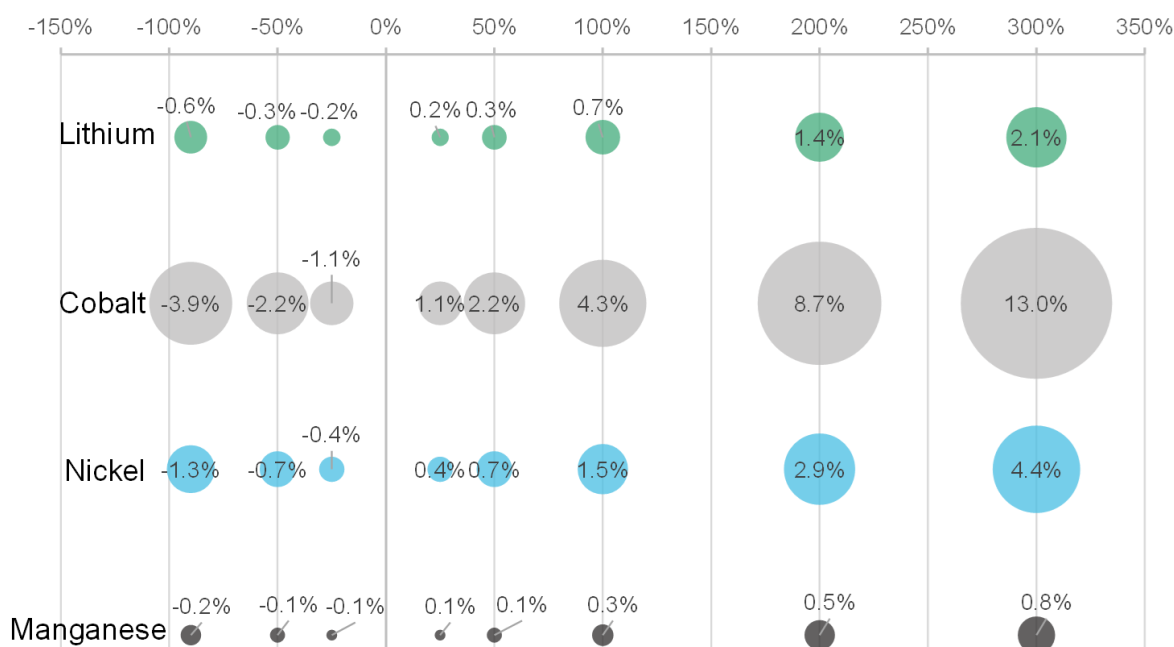
Cependant, cela ne permet pas de conclure avec certitude ni sur les prix, ni sur la disponibilité effective de ces métaux dans les années à venir. En effet, sur des marchés relativement faibles en volumes tels que celui du Lithium, des fonds spéculatifs ont la capacité d'acquérir des quantités physiques suffisamment importantes pour peser sur les cours.

De plus, la géographie des réserves et des zones de production étant relativement concentrée, des facteurs géopolitiques peuvent rapidement influencer sur le niveau production.

Enfin, de nombreuses incertitudes demeurent sur l'évolution de la demande (marché des VEH et plus généralement de la mobilité individuelle), l'évolution des réglementations environnementales, l'opposition des populations locales (concernant l'extraction).

Les seules certitudes restent que les ressources métalliques sont finies et que le recyclage, même adossé à des politiques volontaristes ne saurait répondre à court terme à un déficit d'approvisionnement du fait de la durée de vie des batteries. A plus long terme, le développement des activités de recyclage peut potentiellement représenter un apport important sur le marché du Cobalt (et dans une moindre mesure celui du Lithium, sous réserve que l'augmentation des cours permettent de rentabiliser sa récupération)

On peut souligner toutefois que l'impact du cours des matières premières sur le cout final des batteries reste limité (voir ci-dessous)



**Fig. 22** : Impact de la fluctuation du prix des métaux sur le cout total d'un pack de batterie NMC (111)

Source: Bloomberg New Energy Finance Note (2017) : NMC chemistry modelled here is NMC (111). NMC battery pack cost is \$223/kWh

## 3 Les procédés de recyclage des batteries

### 3.1 Introduction

Dans cette partie, nous aborderons les procédés de recyclage qui concernent les batteries Ni-Cd, Ni-MH, et plus en détail encore le Li-ion. Ce sont ces technologies qui sont les plus utilisées actuellement et le resteront à moyen terme.

Le marché du Ni-MH et du Ni-Cd restant relativement stable sur les années à venir et les procédés de recyclage étant éprouvés, nous les aborderons rapidement.

En revanche, les enjeux sont très importants en ce qui concerne la technologie Li-ion dont les volumes en fin de vie vont connaître une croissance rapide dans les années à venir. Ceci justifie que la partie finale de notre étude (les procédés de recyclage et ensuite la partie prospective) se focalise sur cette technologie.

Le recyclage des batteries Li-Po ne sera pas abordé de manière spécifique, ce type de batteries étant recyclé indifféremment dans le flux de batteries Li-ion.

Nous verrons également que les procédés de traitement des batteries Ni-MH sont similaires aux procédés Li-ion (hors LFP) et passent par les mêmes installations. Et ceci reste valable de manière générale pour toutes les batteries à base nickel (notamment les batteries Zebra au Sodium-Chlorure de Nickel) en dehors du Ni-Cd qui est traité de manière spécifique.

Nous ne reviendrons pas sur les procédés de recyclage qui concernent les autres types de batteries ou de stockages chimiques alternatifs. En effet, à ce jour aucun d'entre eux n'a dépassé le stade du laboratoire et nous les avons abordés rapidement dans les parties précédentes.

- Na-S en 1.2.5.5
- Piles à hydrogène en 1.2.6.1
- Batteries à circulation en 1.2.6.2
- Supercondensateurs en 1.2.6.1
- Batteries LMP en 2.3.1

Enfin, nous n'aborderons pas le recyclage des batteries du futur de type Métal-Air, X-ion (hors Lithium) et Li-S. En effet, ces batteries ne seront pas commercialisées avant plusieurs années (si elles sont commercialisées un jour...) et la question de leur recyclage ne se posera pas avant 2040 au mieux.

### 3.2 Généralités sur les procédés de recyclage des batteries

L'objectif des procédés de recyclage est de séparer les constituants en différentes fractions qui pourront être réintroduites dans un processus de production, en traitant les fractions dangereuses et en minimisant les déchets de process (effluents, émissions), la consommation d'énergie et les coûts.

Sur le plan technique, les procédés de traitement des batteries font pour la plupart d'entre eux appel aux méthodes traditionnelles d'extraction des métaux développées à l'origine par les industries minières et d'affinage de métaux. Il s'agit de traitement par voie pyro-métallurgique et/ou hydro-métallurgique, souvent connus et bien maîtrisés par les industriels. Les recycleurs reprennent ces méthodes et les adaptent à un flux entrant de batteries qui engendre des problèmes spécifiques liés à la sécurité (instabilité des électrolytes) et à l'élimination de certaines impuretés qui peuvent altérer l'efficacité des procédés hydro-métallurgiques notamment. De ce fait, si les procédés de recyclage



des batteries apportent des nouveautés, c'est plutôt dans les opérations amont de préparation des flux de matières (principalement des procédés mécaniques) que dans les phases d'extraction des métaux.

A l'issue de ces procédés, on obtient des métaux purs, des sels de métaux, des alliages qui sont revendus et des résidus (scories) qui sont la plupart du temps non valorisés.

De manière originale, certaines entreprises proposent des procédés principalement mécaniques, de « valorisation directe » permettant de séparer les matières actives d'une batterie (électrolyte, cathode, anode) et de les régénérer pour servir à la fabrication de batteries neuves. Dans une perspective d'économie circulaire, cette approche semble offrir un potentiel intéressant du fait de son faible impact environnemental mais ces procédés restent encore à l'état expérimental (par exemple On To Technology aux Etats-Unis)

Cependant, un recyclage en boucle fermée des matières constitutives des principaux éléments de batteries (électrolyte, cathode et anode) est un objectif difficile à atteindre du fait de l'exigence de pureté requis pour les matières actives entrant dans la composition des batteries. Il est d'autant plus difficile que le mix entrant peut fortement varier du fait de la diversité des compositions des batteries, en particulier la composition des cathodes des batteries Li-ion. Enfin, le recyclage en boucle fermée n'est pas forcément le but recherché par les industriels qui peuvent trouver une équation économique plus favorable avec des procédés moins coûteux qui produisent des fractions moins pures mais valorisables sur le marché en boucle ouverte.

Avant d'aborder les généralités sur ces différents types de procédés, n'oublions pas qu'un procédé de recyclage dans son ensemble, intègre des opérations en amont du traitement : la séparation des flux et la préparation au traitement.

### **3.3 Les principales étapes des procédés de recyclage des batteries**

#### **3.3.1 Séparation des flux**

Avant les opérations de traitement, une phase de séparation des batteries en fonction de leur chimie est indispensable.

Il s'agit à minima de séparer les flux non compatibles pour des raisons industrielles (par exemple les procédés de traitement du Ni-Cd ou du Plomb sont spécifiques et différents de celui des batteries Ni-MH ou Li-ion), et/ou parfois pour des raisons réglementaires car les centres de traitement de batteries n'ont pas toujours une autorisation pour accepter toutes les chimies de batteries.

Mais il peut aussi être intéressant de séparer les batteries destinées à un même procédé de traitement (séparer Ni-MH et Li-ion, séparer les Li-ion entre elles en fonction de la composition de la cathode). En effet, l'homogénéisation et la maîtrise de la composition matière du flux entrant permettent d'améliorer le rendement et de réduire les coûts de procédés puisqu'on peut optimiser la quantité de réactifs et d'énergie utilisée pour le recyclage. Cependant, comme la composition des cathodes n'est pas spécifiée sur les batteries, cette séparation peut s'avérer problématique.

Si le flux entrant n'est pas homogène, la technologie de recyclage doit alors être suffisamment robuste et tolérante pour traiter des batteries de natures chimiques différentes, ce qui est le cas des procédés reposant sur la voie pyro-métallurgique. A l'opposé, le rendement et la sélectivité des procédés hydro-métallurgiques seront rapidement pénalisés face à un mix entrant non maîtrisé.

On retrouve ici un principe universel de la gestion des déchets, plus le tri est réalisé en amont et plus le recyclage pourra être potentiellement performant et le coût des procédés réduit.

### 3.3.2 Préparation ou prétraitement

Avant la phase de traitement proprement dite, une phase de préparation (ou prétraitement) est nécessaire dans la plupart des cas. Cette phase de préparation sera variable en fonction du procédé ultérieur. Elle est minimisée en amont des procédés pyro-métallurgiques. En revanche elle sera plus importante en amont des procédés hydro-métallurgiques dans le but de préparer une « black mass » concentrant les matières actives des électrodes avec le moins d'impuretés possibles.

Ce prétraitement a pour but de préparer les batteries à leur prise en charge ultérieure et ceci dans des conditions garanties de sécurité pour les opérateurs et les installations.

On intègre aussi dans cette phase de préparation, toutes les opérations devant être réalisées dans la perspective d'une seconde vie pour la batterie ou dans la perspective de valorisation directe d'une partie de la batterie (régénération des électrodes, récupération de l'électrolyte...etc), ou dans la perspective d'un traitement ultérieur par pyro et/ou hydrométallurgie.

Cette phase de prétraitement pourra donc inclure :

1. Les tests et la décharge des batteries :
  - Détection du niveau de charge / diagnostic éléments par éléments.
  - Décharge des batteries qui pourra se faire à travers une résistance ou dans un bain au sein d'un liquide à forte conductivité (solution de NaCl, CaCO<sub>3</sub>, HCL...etc)<sup>86</sup>.
2. Les opérations liées à la seconde vie (réutilisation/ réemploi) :
  - Démontage, récupération des cellules en état de fonctionnement.
  - Réassemblage dans une nouvelle configuration et assemblage avec un nouveau BMS (réutilisation).
  - Remplacement des cellules défectueuses dans une configuration identique (réemploi).
3. Les opérations manuelles et/ou mécaniques de préparation aux traitements pyro et/ou hydro-métallurgiques :
  - a. Démantèlement des batteries :
    - i. Séparation des éléments extérieurs (BMS, casing) le cas échéant par démantèlement manuel ou automatisé.
    - ii. Démantèlement de la batterie à l'échelle des packs ou des cellules (opérations manuelles, mécanisées ou par chocs électromagnétiques).
  - b. Préparation aux traitements :
    - i. Broyage. Les opérations de broyage des cellules se feront généralement dans un environnement inerte et sec - CO<sub>2</sub>, Azote, Argon, Helium - ou cryogénique (pour éviter les réactions violentes du lithium à l'eau et la dissipation de solvants organiques fortement inflammables).
    - ii. Dissolution du PVDF par un solvant organique pour détacher les matières actives des électrodes de leurs collecteurs en utilisant de N-méthylpyrrolidone (NMP) – méthode efficace mais coûteuse (prix élevé et toxicité du NMP)<sup>87</sup>.

---

<sup>86</sup> A noter que cette deuxième option, mentionnée par la littérature présente deux problèmes pratiques majeurs : les batteries étant le plus souvent étanches, l'immersion est inefficace. De plus une telle immersion rend très compliquée la suite des opérations de démontage et de séparation (du fait de la corrosion engendrée)

<sup>87</sup> Cette méthode est plusieurs fois mentionnée dans la littérature mais ne fait pas l'objet d'une mise en œuvre industrielle.

- iii. Séparation mécanique (tamisage, tri densimétrique, tri magnétique, courants de Foucault, tri aérodynamiques...) des plastiques, métaux ferreux, Al et Cu des collecteurs, etc ... qui sont autant d'impuretés pour les procédés hydro-métallurgiques.
- iv. Traitements thermiques préalables :
  1. Décomposition des matières organiques (liant PVDF, solvants organiques, plastiques...) par calcination ou pyrolyse.
  2. Oxydation du carbone.
  3. Epuration des fumées.

Les prétraitements seront plus ou moins poussés en fonction de l'objectif final des procédés de recyclage. De manière générale, les procédés hydro-métallurgiques ou de « valorisation directe » (dont le but est de produire des fractions pures éventuellement réutilisables pour la fabrication de nouvelles batteries) intégreront des opérations de prétraitement plus complexes dans le but d'éliminer un maximum d'impuretés. On considère ici comme impureté, tout ce qui n'est pas constitutif de la matière active des électrodes. Il s'agit donc des solvants, matières organiques (liants, séparateurs), collecteurs en aluminium ou cuivre... etc

Aujourd'hui, le démantèlement des batteries se fait encore manuellement. Les progrès en matière de robotique et d'intelligence artificielle laissent envisager la possibilité d'automatiser un jour, le démantèlement jusqu'à isoler les cathodes. Le broyage des cathodes plutôt que des cellules complètes permettrait d'obtenir des fractions plus pures. Mais l'automatisation du démantèlement exige un flux entrant relativement uniforme et une standardisation des designs, or les batteries de VEH présentent aujourd'hui une trop grande variété de conception aussi bien dans leur forme que dans leur composition.

Le démantèlement par chocs électromagnétiques consiste à créer un arc électrique au sein d'un fluide qui provoque une séparation aux interfaces de matière. Cette technologie, déjà envisagée dans le domaine de la valorisation des DEEE est portée notamment par la société Allemande IMPULSTEC mais reste encore à l'état de pilote industriel.

### **3.3.3 Procédé de valorisation directe**

Plutôt que de récupérer des alliages métalliques (par pyro-métallurgie) ou des éléments métalliques (par hydrométallurgie) la valorisation directe consiste à récupérer l'électrolyte et les matières actives des électrodes en un composé utilisable directement pour la fabrication de nouvelles électrodes. Cette méthode encore au stade de l'expérimentation présente en théorie un réel avantage environnemental (moins de consommation d'énergie, faible émission, peu de déchets issus du process).

Aux Etats-Unis, la société OnTo technology travaille sur cette approche avec la volonté de régénérer la matière active des cathodes et anodes constituant les batteries Li-ion dans une logique d'économie circulaire et en s'appuyant uniquement sur des procédés mécaniques de tri/séparation. Le procédé requiert un flux d'entrée très homogène et donc une sélection des batteries en fonction de leur composition (De tels procédés ne peuvent pas fonctionner sur des technologies Li-ion en mélange)

### **3.3.4 Procédés Pyro-métallurgiques**

Les procédés pyro-métallurgiques sont tolérants sur la nature du mix entrant qui pourra être relativement hétérogène.

Ils utilisent les fractions organiques des batteries (plastiques-séparateur, électrolyte et anode en graphite) comme source de carbone dans le processus de réduction thermique ce qui permet de limiter l'apport en énergie. Le fait de ne pas récupérer les fractions organiques, limite le rendement de recyclage de tels procédés.

Les produits obtenus sont des alliages contenant du Cobalt, du Nickel, du Cuivre, du Fer et du Manganèse, en fonction de la nature du flux entrant de batteries. Ces alliages pourront éventuellement être valorisés directement dans l'industrie sidérurgique (ou la fabrication de superalliages) ou subir un traitement complémentaire par des procédés hydro-métallurgiques permettant de séparer les métaux constitutifs de manière sélective.

Les terres rares, le calcium, l'aluminium, une partie du manganèse et le lithium se retrouvent dans les scories.

Un des inconvénients des procédés pyro-métallurgiques réside dans le traitement des gaz émis lors du traitement ( $H_2$ , composés halogénés, dioxines, furanes...) qui est complexe et énergivore. En outre, les composés obtenus en sortie de procédés ne sont pas aussi purs que par voie hydro-métallurgique (sauf dans le cas d'une distillation comme pour le cadmium des batteries Ni-Cd). Enfin ils génèrent un résidu (les scories) dont la valorisation renvoie à des procédés hydro-métallurgiques coûteux.

### **3.3.5 Procédés Hydro-métallurgiques**

Les procédés d'hydrométallurgie consistent à récupérer les métaux de manière sélective.

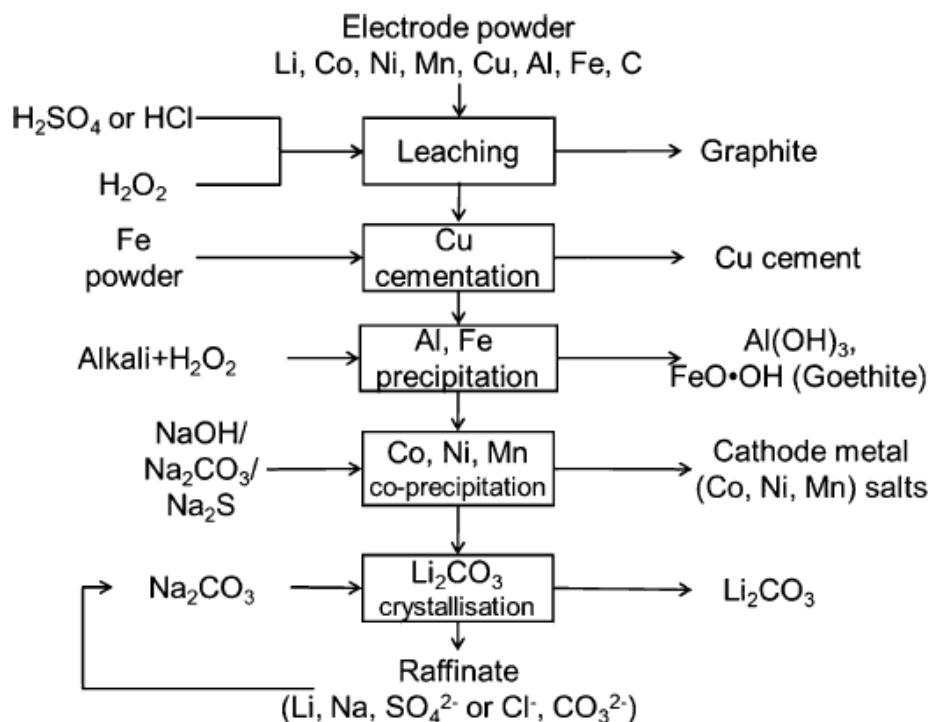
Ils sont mis en œuvre sur la fraction fine (blackmass) obtenue après tri, démantèlement, broyage des accumulateurs et prétraitement pour éliminer les impuretés pouvant nuire à leur rendement et à leur sélectivité.

Ils peuvent aussi concerner le traitement complémentaire des alliages, ou des scories obtenues par voie pyro-métallurgique pour en extraire les métaux de manière sélective.

Ils comportent plusieurs étapes :

- Mise en solution des différents métaux par lixiviation à l'aide d'un réactif. Ce réactif est le plus souvent un acide (principalement l'acide sulfurique, mais aussi des acides organiques tels que l'acide citrique, l'acide malique... moins impactant pour l'environnement...). Mais on pourra également utiliser un oxydant (chlore, peroxyde d'hydrogène) ou un composé ammoniacal.
- Séparation de phases (solide/liquide) par décantation/filtration ou par flottation,
- Purification et concentration (précipitation du fer et de l'aluminium, cémentation du cuivre, extraction par solvant du Co, Ni, Mn ...),
- Récupération des différents métaux (par électrolyse ou précipitation) y compris le lithium.

La figure ci-dessous est un résumé des différentes méthodes utilisées en hydrométallurgie pour le recyclage de batteries Ni-MH et Li-ion.



**Fig 23** : Méthodes et réactifs utilisables dans les procédés hydro-métallurgiques de recyclage des batteries Li-ion et Ni-MH<sup>88</sup>

L'efficacité de la lixiviation dépend de nombreux paramètres : le type d'acide utilisé, sa concentration, la température, le pH, le temps de réaction, l'agitation, la granulométrie et le ratio solide/liquide. A noter que moins le métal est soluble et plus il faut baisser le pH (et donc augmenter la concentration d'acide). Le Cobalt étant le métal le moins soluble, c'est lui qui détermine généralement la concentration d'acide.

Une filtration permet de récupérer le graphite ainsi que les autres impuretés n'ayant pas été dissoutes. La fraction obtenue est valorisable.

Le Cuivre doit absolument être écarté de la solution avant extraction du Co, Ni et Mn. Sinon l'extraction perdra en sélectivité et impactera négativement la pureté des composés.

A noter que la qualité du carbonate de Lithium en fin de procédé dépend de l'efficacité des procédés précédents.

L'avantage de l'hydrométallurgie est que les procédés se déroulent à des T° proches de la température ambiante et ne produisent pas de dégagement gazeux.

Cependant les procédés thermiques et mécaniques sont généralement plus économiques que les procédés hydro-métallurgiques qui enchainent de nombreuses opérations visant à réduire les niveaux d'impuretés, nécessitent une forte consommation d'eau et de réactifs, et génèrent des effluents.

Les traitements hydro-métallurgiques viennent souvent compléter les procédés pyro-métallurgiques pour améliorer la pureté des matières.

<sup>88</sup> Development of a Highly Efficient Hydrometallurgical Recycling Process for Automotive Li-Ion Batteries  
- Honggang Wang et Bernd Friedrich (J. Sustain. Metall. (Avril 2015) 1:168–178 - DOI 10.1007/s40831-015-0016-6

### 3.4 Comparaison des procédés de recyclage et impacts environnementaux

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des différentes familles de procédés.

A noter que les procédés pyro et hydro-métallurgiques sont des procédés éprouvés et utilisés à échelle industrielle alors que la valorisation directe n'est encore qu'à l'état expérimental et son efficacité à échelle industrielle reste à démontrer.

	Avantages	Inconvénients
Valorisation directe (Échelle pilote industriel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'altération de la composition matière</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte consommation d'énergie</li> <li>• Risques d'explosions, incendies</li> <li>• Très sensible aux flux entrants</li> <li>• Traitement des poussières</li> </ul>
Hydrométallurgie (Échelle industrielle)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible consommation d'énergie</li> <li>• Faibles émissions (poussières / gaz)</li> <li>• Bon rendement de recyclage</li> <li>• Qualité des fractions récupérées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexité des procédés</li> <li>• Gestion des effluents</li> <li>• Très sensible aux flux entrants</li> </ul>
Pyro-métallurgie (Échelle industrielle)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité des procédés</li> <li>• Tolérance des procédés</li> <li>• Hétérogénéité du flux entrant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de valorisation du lithium</li> <li>• Pas de récupération des fractions organiques</li> <li>• Forte consommation d'énergie</li> <li>• Gestion des émissions</li> </ul>

**Tab 8** : Avantages et inconvénients des différentes familles de procédés de recyclage des batteries

Le manque de données de la part des recycleurs de batteries ne permet pas de comparer les impacts environnementaux des procédés un à un. En revanche, les travaux réalisés en particulier par Anna Boyden<sup>89</sup> et Jan Engel<sup>90</sup> permettent de comparer les impacts selon les familles de procédés.

Ils montrent notamment que les procédés hydro-métallurgiques ont un impact environnemental près de deux fois plus important que les procédés pyro-métallurgiques au regard des émissions de gaz à effets de serre (hors collecte). Ceci étant dû principalement à l'impact environnemental lié à l'élimination des effluents. Les deux auteurs arrivent à ces conclusions mais soulignent eux-aussi leurs difficultés face aux réponses lacunaires obtenues auprès des recycleurs en dépit de l'anonymisation de leurs travaux.

Au regard de la toxicité pour les humains et pour l'environnement, les familles de procédés ont un impact comparable.

Ils soulignent également que les rendements de recyclage peuvent fortement varier en fonction des procédés. Ils visent tous à récupérer les fractions métalliques, la différence se fait sur les autres

<sup>89</sup> The environmental impact of recycling Li-ion portable batteries (Thèse Anna Boyden – Australian National University – Décembre 2014)

<sup>90</sup> Development perspectives on Li-ion recycling processes for VEH batteries (Jan Engel, University of Rhode Islands – 2016)

fractions et notamment l'électrolyte et les fractions plastiques (qui représentent ensemble entre 25 et 35 % en poids des batteries). Bien entendu, ce sont les procédés mécaniques de valorisation directe qui sont potentiellement les plus performants alors que les procédés pyro-métallurgiques sont les moins performants.

### **3.5 Les procédés de recyclage des batteries Ni-Cd**

La filière de recyclage des batteries Ni-Cd est spécifique, elle n'est pas compatible avec les autres chimies.

Il existe 2 types de traitement pour les batteries Ni-Cd :

- Par distillation (SNAM, SAFT-NIFE, Accurec, Inmetco, Nippon Recycle Center Corp, KOBAR)
- Par hydrométallurgie (Eurodieuze)

Les batteries de types portables sont traitées directement. Pour les batteries de grande taille, il est envisageable de passer par une étape de démantèlement manuel afin de séparer les cathodes en oxyde de nickel qui pourront être alors traitées séparément.

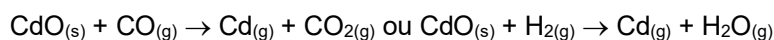
#### ***3.5.1 Traitement par distillation***

Le cadmium ayant un point d'ébullition relativement pas, il peut être distillé dans un cadre industriel.

Après récupération de l'électrolyte, cassage puis séparation des boîtiers (plastique et métal), les batteries sont broyées puis pyrolysées (décomposition des matières organiques) à 500°C.

Elles sont ensuite chauffées à 900°C pour vaporiser le Cadmium ( $T^{\circ}_{eb\ Cd} = 767^{\circ}C // T^{\circ}_{eb\ Ni} = 2730^{\circ}C$ ). Cette étape est réalisée dans une atmosphère réductrice (monoxyde de carbone ou mélange d'azote et d'hydrogène) afin de réduire les oxydes métalliques (y compris le nickel). Pour cela, on ajoute généralement du charbon ou du coke dès l'étape de préparation.

Réduction de l'oxyde de cadmium en présence de monoxyde de carbone :



Les vapeurs de Cadmium sont ensuite condensées et le métal liquide coulé en lingotière. Le cadmium obtenu, d'une pureté de 99,99 % est revendu sous forme de lingots et valorisé en boucle fermée dans l'industrie des accumulateurs Ni-Cd.

Le résidu qui est un alliage de ferro-nickel est réutilisé comme matière première en fonderie pour la production d'aciers inoxydables ou spéciaux.

#### ***3.5.2 Traitement par hydrométallurgie***

En France, Eurodieuze est le seul acteur à utiliser une méthode hydro-métallurgique pour le traitement des batteries Ni-Cd. En Europe, il ne semble pas exister d'autres acteurs utilisant un tel procédé.

Les accumulateurs sont broyés avant séparation mécanique des composants. La poudre obtenue lors du broyage (Black Mass), est passée sur un tamis vibrant. Une séparation physique est réalisée pour éliminer les copeaux ferreux (over-band magnétique), les non-ferreux (courant de Foucault), et les plastiques.

La black Mass est ensuite lixiviée avec de l'acide sulfurique.

Le cadmium est ensuite précipité sous forme de carbonate ( $\text{CdCO}_3$ ) par addition de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  puis le nickel est récupéré sous la forme d'hydroxyde de nickel  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  par addition de soude. La précipitation a l'avantage d'être peu coûteuse mais limite la pureté des produits obtenus du fait de problèmes de coprécipitation (du fer et du nickel en particulier).

Ce procédé permet de récupérer le cadmium avec un rendement et une pureté légèrement inférieure à la distillation (environ 98 %). Ce niveau de pureté est difficilement compatible avec une réutilisation en boucle fermée.

D'autres méthodes de séparation sélective pourraient être utilisées telles que l'électrolyse ou encore une extraction par solvant mais elles sont plus coûteuses.

### **3.6 Les procédés de recyclage des batteries Ni-MH**

Le recyclage des batteries Ni-MH présente un intérêt économique du fait de leur teneur en Nickel, Cobalt et en terres rares. Là encore, leur recyclage peut se faire par voie pyro-métallurgique et/ou hydro-métallurgique.

#### ***3.6.1 Procédés pyro-métallurgiques***

Ces procédés sont notamment utilisés par Umicore, SNAM, Sumitomo, Accurec, Inmetco et Glencore. Généralement ils traitent aussi bien les batteries Ni-MH que les batteries Li-ion (hors LFP) et plus largement ils peuvent prendre en charge tous les types de batteries à base de nickel telles que les batteries Ni-Fe, Ni- $\text{H}_2$ , Ni-Zn... mais surtout les batteries Sodium/chlorure de Nickel (Batteries Zebra), qui ont été utilisées au début des années 2000 pour des VEH. Inmetco aux USA et la SNAM en France recyclent ces batteries (environ 25 T traitées par SNAM en 2017).

Après une phase de démantèlement, complétée dans certains cas par une phase de broyage des cellules, les matières sont introduites dans un four de fusion (Umicore), ou de calcination à  $1000^\circ\text{C}$  (Sumitomo) ou un four à pyrolyse. Dans tous les cas, les matières organiques (électrolytes, solvants, plastiques) sont éliminées et participent à l'apport d'énergie et à la réduction des oxydes métalliques.

Après ces opérations, on obtient un alliage de cobalt, nickel, cuivre, fer qui peut ensuite être valorisé directement par la sidérurgie ou traité par voie hydro-métallurgique pour en extraire les métaux de manière sélective (le cuivre, le fer, puis le cobalt et le nickel).

Le lithium, l'aluminium, et les terres rares se retrouvent dans les scories. Ces scories peuvent éventuellement être traitées ensuite par voie hydro-métallurgique pour récupérer notamment les terres rares (Solvay) et le Lithium.

#### ***3.6.2 Procédés hydro-métallurgiques***

Certains acteurs (Retriev technologie ou Eurodieuze) mettent en œuvre des procédés strictement hydro-métallurgiques.

Après une phase de démantèlement manuel, les batteries sont broyées sous atmosphère neutre (pour éviter les risques liés au dégagement d'hydrogène). L'électrolyte est récupéré puis neutralisé, le broyat subit ensuite des étapes de séparation mécanique similaires à la phase de prétraitement des batteries Ni-Cd. Le résidu obtenu (Black Mass) est ensuite lixivié par un acide (généralement de



l'acide sulfurique, plus rarement de l'acide chlorhydrique) qui permet de dissoudre le Nickel, le Cobalt et les terres rares.<sup>91</sup>

La suite du procédé consiste à extraire de manière sélective les métaux en solution. Pour cela on pourra utiliser différentes méthodes : l'extraction par solvant et/ou électrolyse et/ou précipitation

L'entreprise Sumitomo récupère les terres rares par une électrolyse en sels fondus du mélange d'oxydes de terres rares. La récupération est de 80 % des terres rares initiales, présentant par ailleurs une pureté supérieure à 99 %, ce qui autorise leur réemploi comme matériau d'électrode pour de nouvelles batteries Ni-MH (recyclage en boucle fermée).

L'extraction par solvant ou extraction Liquide-Liquide permet le transfert d'un soluté initialement contenu dans une phase liquide vers une autre phase liquide non miscible. Plusieurs solvants sont classiquement utilisés dans les procédés de recyclage.

Le tableau ci-dessous résume les différents solvants utilisables et leur rendement

Leachate anion	REE (%)	Cobalt (%)	Nickel (%)	Extracting agent system
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	93,6	96	96	D2EHPA, Cyanex 272
	97,8	98,1	98,1	D2EHPA, Cyanex 272
	98,9	98,5	98,4	PC-88A
	99,5	99,5	99,6	Quaternary ammonium salts
Cl <sup>-</sup>	98	98	96	D2EHPA, TOA
	98,9	93,6	97	TBP, Alamine 336, PC-88A
	99,9	99	99	Cyanex 923

**Tab. 9** : taux de récupération des terres rares, Co et Ni par différents solvants<sup>92</sup>

Une fois les métaux extraits par solvant, reste à récupérer ces métaux sous forme métallique (par électrolyse) ou sous forme d'oxyde métallique (par précipitation avec de l'acide oxalique en général)

### 3.7 Les procédés de recyclage des batteries Li-ion

Les batteries li-ion ne présentent pas de caractéristiques standardisées (Cf Annexe 6 pour la variété des technologies Li-ion). Elles peuvent différer par leur taille, la nature chimique des éléments constitutifs et surtout ceux des électrodes. Si elles ne sont pas triées, la technologie de recyclage doit être suffisamment robuste pour traiter des batteries de natures chimiques différentes, ce qui est le cas des procédés pyro-métallurgiques.

Face à un flux entrant non homogène, les procédés hydro-métallurgiques sont moins performants. D'une part ils entraînent une surconsommation de réactifs et d'énergie, d'autre part le rendement et la sélectivité dans la récupération des métaux sont pénalisés. Il est donc nécessaire de mettre en place une phase préalable de tri/séparation et une phase de prétraitement plus longue et plus complexe.

<sup>91</sup> Pour les nombreuses combinaisons d'acide, temps de traitement, T° et rendement, cf la thèse de Philip Holmberg (Chalmers University of Technology – Sweden , 2017) <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249441/249441.pdf>

<sup>92</sup> Development of a Highly Efficient Hydrometallurgical Recycling Process for Automotive Li-Ion Batteries - Honggang Wang et Bernd Friedrich (J. Sustain. Metall. (Avril 2015) 1:168–178 - DOI 10.1007/s40831-015-0016-6

### 3.7.1 Procédés pyro-métallurgiques

Les procédés pyro-métallurgiques pour le traitement des batteries Li-ion sont généralement les mêmes que ceux qui traitent les batteries Ni-MH. L'évolution des technologies Li-ion vers des cathodes à forte proportion de Nickel renforcera cette pratique dans les années à venir.

Les composés organiques (solvants, électrolytes, plastiques) sont utilisés comme source de carbone dans la phase de réduction thermique à l'issue de laquelle on obtient un alliage de Cuivre, Nickel, Cobalt, Fer et Manganèse. Cet alliage pourra ensuite être valorisé directement dans la sidérurgie ou être traité par voie hydro-métallurgique pour extraire les métaux de manière sélective.

On retrouve dans les scories (résidus du traitement thermique) l'Aluminium, le Lithium et une partie du Manganèse. Aujourd'hui, ces scories sont rarement valorisées. Elles pourraient l'être par voie hydro-métallurgique mais cette opération est actuellement trop coûteuse.

### 3.7.2 Procédés hydro-métallurgiques

Les procédés hydro-métallurgiques ont l'avantage de pouvoir récupérer le Lithium. Ils sont mis en œuvre directement sur la blackmass après une phase de préparation (tri et séparation mécaniques) ou en complément des procédés pyro-métallurgiques pour récupérer de manière sélective les métaux au sein des alliages obtenus (principalement le Cobalt et le Nickel mais aussi le Manganèse).

Après une phase de lixiviation (acides forts, acides faibles ou composé ammoniacal), les métaux sont ensuite récupérés par différentes techniques (extraction par solvant et/ou électrolyse et/ou précipitation) sous forme de métaux ou de sels métalliques. On peut se reporter à nouveau à la figure 23 pour la diversité des méthodes et des réactifs utilisables.

Concernant l'extraction par solvant, on peut aussi se reporter au Tableau 9 pour les différentes possibilités. On pourra noter que le CYANEX 272, souvent utilisé comme agent d'extraction sélectif du Cobalt après lixiviation à l'acide sulfurique perd en efficacité dès lors que du Manganèse est présent dans la solution. Cette méthode sera donc moins performante sur les batteries Li-ion de type LMO ou NMC.

Les composés métalliques obtenus varient selon leur nature et leur pureté, ce qui conditionne leurs débouchés. Ils sont sous forme métallique ou sous forme de sels (carbonate, sulfate, oxyde, hydroxyde... de Nickel, de Cobalt, de Manganèse, de Lithium)

**Les procédés de recyclage des principaux acteurs du recyclage sont décrits en détail en ANNEXE 7.**

## 3.8 Quelques éléments concernant l'économie du recyclage des batteries Li-ion :

Comme toute activité économique, le recyclage des batteries est soumis à un impératif de rentabilité.

L'équation économique du recyclage dépend du coût d'exploitation (à noter que ce coût intègre de manière directe ou indirecte les coûts de collecte, il peut être amélioré par des économies d'échelle ou l'amélioration du savoir-faire industriel) et du revenu obtenu par la revente des métaux récupérés (sous différentes formes). Cette équation économique varie notamment en fonction de la qualité des fractions obtenues en sortie de procédé, du cours des matières premières (métaux, énergie) et des réglementations environnementales (qui font peser des obligations et donc des coûts additionnels sur

les exploitants en fixant notamment des normes sur les rejets/émissions). Et, cette équation dépend éventuellement de la seconde vie qui peut être source de revenu.

Si le revenu issu de la revente des fractions obtenues n'est pas suffisant pour couvrir l'ensemble des coûts et dégager une marge, alors le recyclage doit être financé. Il sera possible de facturer une prestation de recyclage dès lors que son prix reste inférieur à d'autres solutions alternatives (par exemple l'enfouissement s'il n'est pas interdit).

La composition chimique des batteries influe très fortement sur la rentabilité des procédés. Une publication de 2014<sup>93</sup> montre que la valeur potentielle des métaux contenus dans les cathodes de batteries Li-ion varie de 1 à 10 (860 USD/T pour les LMO à 8900 USD/T pour les LCO au moment de la publication).

Aujourd'hui, en dehors des batteries Ni-MH (fortes teneurs en Nickel, Cobalt et en terres rares) et des batteries Li-ion à forte teneur en Cobalt (LCO), le recyclage des autres types de batteries représente un coût. De plus, les technologies Li-ion en croissance (NMC et NCA) évoluent actuellement vers moins de Cobalt, ce qui réduira à terme les revenus issus du recyclage.

Quel que soit le procédé mis en œuvre, le coût de récupération du Lithium provenant de batteries en fin de vie reste supérieur au coût de production à partir de gisements naturels.

Actuellement on estime qu'à peine 5 % à 7 % du gisement mondial des batteries Li-ion en fin de vie est recyclé<sup>94</sup>. Dans ce contexte il apparaît impératif de mettre en œuvre des réglementations adéquates pour développer les activités de recyclage. Ces réglementations visent d'une part à interdire les solutions alternatives (et en particulier l'enfouissement) et d'autre part à organiser le financement des opérations (par l'intermédiaire d'une filière REP par exemple).

Le coût du recyclage devrait rester mesuré pour les technologies à forte teneur en Nickel qui domineront le marché à l'avenir. Une éventuelle augmentation des cours du Nickel, du Cobalt et du Lithium pourrait même à terme réduire les besoins de financement.

En revanche le coût du recyclage des technologies LMO et LFP, déjà élevé ne bénéficiera probablement pas d'une augmentation significative du cours des métaux contenus. Même si ces technologies auront tendance à disparaître, les volumes commercialisés entre temps seront loin d'être anecdotiques. Il y a peu de chance qu'ils soient recyclés en l'absence d'une obligation réglementaire.

### **3.9 Les acteurs du recyclage de batteries**

Les acteurs du recyclage de batteries se situent principalement en Europe, en Amérique du Nord, en Chine, au Japon, et en Corée du Sud.

---

<sup>93</sup> Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C.W., Richa, K., 2014. Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resour. Conserv. Recycl.* 83, 53–62.

<sup>94</sup> Estimation par le cabinet Schmueel De Leon Energy Ltd (présentation au congrès de Nice – Octobre 2018)

## Principales caractéristiques des acteurs majeurs identifiés dans le domaine du recyclage des batteries

(Localisation, capacités, types de procédés et nature des extrants)

Installations qui recyclent des batteries	Niveau de développement	Types de batteries					Capacité Totale / an (en T)	Capacité Li-ion/an (en T)	Type de procédés	Produits en sortie de procédés	Remarques
		Pays	Ni-Cd	Ni-MH	Na-Ni (Zebra)	Li-ion					
<b>EUROPE</b>											
Eurodieuze (Veolia)	Industriel	France	x	x		x	5000	2000	Mécanique et hydro	Oxyde et hydroxyde de Cobalt, CoSO4	
UMICORE	Industriel	Belgique		x		x	NC	7000	Pyro et hydro	Alliage Ni-Co-Cu (pyro) /// puis NiSO4 et CoSO4 (hydro)	Démantèlement à Hanau (All), pyro à Hoboken (Belg) et Hydro à Olen (Belg)
Accurec	Industriel	Allemagne	x	x		x	7000	4000	Pyro	Ferro-Nickel, Aluminium et Cuivre (des collecteurs) et alliage cobalté	Valorisation sidérurgie, fonderie de cuivre, d'aluminium et super-alliages
SNAM	Industriel (pyro seulement)	France	x	x	x	x	7300	300	Pyro (hydro en cours) / seconde vie	Alliage cobalté	
DUESENFELD (procédé LITHOREC II)	Industrialisation en cours	Allemagne				x	NC	NC	Préparation mécanique pour hydro	Electrolyte, blackmass	Procédé hydro en projet pour production de Li2CO3, NiSO4, MnSO4 et CoSO4 - Actuellement, envoi vers affinage
REDUX (Saubermacher)	Industriel	Allemagne				x	10000	NC	Pyro + préparation hydro	Concentré de métaux de cathodes	Envoi vers affinage (Nickelhütte)
Akku Ser	Industriel	Finlande		x		x	4000	NC	Préparation mécanique pour hydro	Blackmass Composés métalliques - LCO uniquement - NMC à partir de 2019	Envoi vers affinage
Sitrasa	Industriel	Espagne					NC	NC	NC	NC	
Nickelhütte Aue	Industriel	Allemagne		x		x	NC	NC	hydro	NiSO4, CoSO4	intègre des batteries mais aussi de nombreux concentrés de Nickel et Cobalt provenant d'autres recycleurs
							<b>TOTAL</b>	<b>&gt; 13300</b>			

<b>ETATS-UNIS / CANADA</b>											
On To Technology	Pilote industriel	USA				x	Pilote		Mécanique (valorisation directe)	électrolyte, poudre de cathode	
Immetco	Industriel	USA	x	x	x	x	NC	6000	Pyro	Alliage de Ni-Co-Fe	Valorisation en sidérurgie
KBI (Kinsbursky Brothers INTL)	Industriel	USA		x		x	NC	NC	NC		
Recycling coordinators	Industriel	USA		x		x	NC	NC	Pyro	Alliage Ni/Co	
Retriev Technologie (Ex-Toxco)	Industriel	Canada / USA	x	x		x	NC	3500	Mécanique puis hydro	Oxydes métalliques (Co, Ni) / Li2CO3 / Cu et Al (des collecteurs)	2 unités en exploitation
Glencore (Xstrata)	Industriel	Canada / USA				x	NC	3000	Pyro et hydro	Alliages Ni-Co-Cu	Le procédé hydrométallurgique permet ensuite de produire un composé cobalté envoyé en Norvège (Glencore) pour production de Cobalt métallique par électrolyse
							<b>TOTAL</b>	<b>&gt; 12500</b>			

Installations qui recyclent des batteries	Niveau de développement	Types de batteries					Capacité Totale / an (en T)	Capacité Li-ion/an (en T)	Type de procédés	Produits en sortie de procédé	Remarques
		Pays	Ni-Cd	Ni-MH	Na-Ni (Zebra)	Li-ion					
<b>CHINE / COREE Du SUD</b>											
Bangpu Ni/Co High Tech Co	Industriel	Chine				x	3600	3600	Mécanique puis hydro	précurseurs cathode NMC	Bangpu est en premier lieu un fabricant de précurseurs pour cathodes
Green Eco-Manufacture HI-Tech Co (GEM)	Industriel	Chine				x	20000	20000	Mécanique puis hydro	précurseurs cathode NMC (Co qualité batteries)	GEM exploite 5 plateformes de recyclage de batteries. Les procédés mis en oeuvre permettent de fermer la boucle. La quantité de matériaux cathodiques pour batteries Li-ion produite par GEM représente 20 % du marché Chinois
BRUNP Recycling Technology Co	Industriel	Chine				x	6000	6000	Mécanique puis hydro	précurseurs cathode NMC	BRUNP est aussi un fabricant de précurseurs pour cathodes
TAISEN - RECYTECH	Industriel	Chine				x	6000	6000	Mécanique puis hydro	NiSO4, CoSO4 et Li2CO3 / précurseur cathode NMC	Le site de Recytech (Corée du Sud) produit une black mass (Co, Ni, Cu, Mn) par séparation mécanique. Le produit est ensuite traité par hydrométallurgie par Taisen (Chine) qui fabrique des précurseurs pour cathodes de batteries Li-ion depuis 2014
KOBAR	Industriel	Corée du Sud	x	x		x	1000	NC	Pyro		
SungEel HiTech	Industriel	Corée du Sud				x	8000	8000	Mécanique puis hydro	Ni, Co métal et NiSO4 et CoSO4	Prévoit la construction d'une unité de 5000 T aux Etats-Unis en 2019
TES-AMM	Industriel	Singapour				x	1200	1200	Mécanique puis hydro		
							<b>TOTAL</b>	<b>&gt; 44 800</b>			

<b>JAPON</b>											
Nippon Tsuruga Recycle Co	Industriel	Japon				x	NC	NC	Pyro et hydro	Ni, Co et concentrés de Ni et Co	
Dowa Eco-system Co Ltd	Industriel	Japon				x	1200	1200	Pyro	Alliage Ni/Co	
Sumitomo Metal Mining (SMM)	Industriel	Japon		x		x	NC	150	Pyro et hydro	Alliage Co-Ni-Fe après pyro puis CoO et NiSO4 après hydro	La pyrométallurgie est réalisée sur le site de Saijo (spécialisé dans le raffinage du cuivre). L'hydrométallurgie est réalisée sur le site de Niihama spécialisé dans l'affinage du Nickel - boucle fermée pour le Nickel qui est réutilisé dans la fabrication de batteries.
Nippon Recycle Center Corp	Industriel	Japon	x	x		x	5000	2000	Pyro	Alliages pour la sidérurgie	
4R Energy Corporation (Sumitomo/Nissan)	Pilote	Japon				x	NC	NC	Seconde vie		Dédié au réemploi de batteries de NISSAN LEAF
							<b>TOTAL</b>	<b>&gt; 3350</b>			

Dans la typologie d'acteurs identifiés, on trouve des entreprises ayant des activités minières ou dans la métallurgie extractive et qui peuvent intégrer des batteries en fin de vie dans leur flux entrant sur des installations non dédiées au recyclage des batteries. C'est le cas de Glencore (Ex-Xstrata), en Amérique du Nord ou Sumitomo<sup>95</sup> Metal Mining au Japon qui ont des activités dans l'extraction de Nickel. Ces acteurs sont actuellement capables de traiter des batteries Li-ion et Ni-MH en mélange par voie pyro-métallurgique, suivi éventuellement d'un traitement hydro-métallurgique.

On trouve également des entreprises de recyclage ayant acquis un savoir-faire dans le traitement de déchets de l'industrie (boues contenant des métaux, catalyseurs usagés, pigments...etc). C'est le cas de l'entreprise allemande Nickelhütte Aue GmbH qui traite aujourd'hui des batteries Ni-MH et Li-ion ou sert d'exutoire à des acteurs du recyclage qui préparent une blackmass riche en Cobalt pour un traitement hydro-métallurgique. C'est le cas par exemple de Recupyl avant sa cessation d'activité ou encore de la société Redux en Allemagne.

Les premières installations dédiées au recyclage de batteries ont été généralement déployées en Europe et au Japon suite aux réglementations mises en œuvre (filière REP) garantissant un financement et un flux suffisant de batteries en fin de vie pour permettre à des acteurs privés d'investir sur des procédés de recyclage.

On trouve dans ce groupe d'acteur des entreprises qui opèrent depuis plusieurs années et qui gèrent des flux de batteries diversifiés (En Europe Accurec, Eurodieuze...), ou qui se constituent pour répondre spécifiquement à l'augmentation des flux de batteries Li-ion en fin de vie (On To Technology aux Etats-Unis).

Certains acteurs ont développé des procédés dédiés au recyclage de batteries en se basant sur des compétences historiques. C'est le cas d'Umicore (ex Union minière) en Belgique (aussi implanté en Chine), qui était jusqu'en 1990 un acteur significatif dans l'exploitation de mines de zinc avant de réorienter ses activités vers le recyclage de métaux à forte valeur et la production entre autres, de matières actives pour cathodes Li-ion.

Enfin, on assiste à une intégration du recyclage par des fabricants de cathodes ou de précurseurs de matière active pour cathodes. C'est le projet par exemple de l'entreprise canadienne Nemaska Lithium (production d'hydroxyde et de carbonate de Lithium pour les fabricants de cellules LFP à partir de minerai - spodumène) qui souhaite développer un procédé de recyclage. Mais c'est surtout en Chine qu'on observe cette intégration avec des entreprises comme GEM (Green Eco Manufacture High-Tech Co), ou encore Bangpu Ni/Co High Tech Co spécialisées dans la préparation de Nickel et Cobalt pour les fabricants de batteries. En Chine toujours, on observe des volontés d'intégration encore plus large avec un fabricant tel que BYD (fabricant de batteries et de VEH) qui annonce vouloir construire une usine de recyclage de batteries.

Certains acteurs agissent encore en bout de chaîne, sur des points très spécifiques. C'est par exemple le cas de Solvay qui récupère les terres rares dans les scories produites par Umicore (pyro métallurgie des batteries Ni-MH). Mais on considère qu'ils sont en dehors du périmètre de l'étude.

Ainsi on peut classer les acteurs du recyclage de batteries (Li-ion et Ni-MH) en 3 grandes catégories :

- **Des acteurs « amont » (miniers, métallurgistes)** qui, par opportunité, intègrent des batteries en fin de vie dans leurs flux entrants (minerais, concentrés de métaux). Ils utilisent des procédés pyro-métallurgiques (et pour certains un affinage par voie hydro-métallurgique), n'ont pas la capacité de prendre en charge l'ensemble des flux à venir et pourraient encore être limités si les réglementations en matière de recyclage des batteries

---

<sup>95</sup> SUMITOMO Mining exploite des gisements de Nickel aux Philippines et produit du Cobalt et des sels de Cobalt dans deux affineries situés au Japon.

se durcissent (concernant le rendement de recyclage et/ou l'obligation de récupération de métaux spécifiques tels que le lithium par exemple).

- **Des acteurs « aval » de la chaîne de fabrication des batteries Li-ion** (affineurs, fabricants de précurseurs, fabricants de cathodes... et jusqu'au fabricants de VEH) qui intègrent le recyclage en amont de leur process. En effet, ces acteurs maîtrisent les procédés hydro-métallurgiques d'affinage des métaux et l'intégration du recyclage en amont de leur procédé permet de sécuriser leur approvisionnement sur les plans quantitatif et qualitatif.
- **Des « pure players » du recyclage de batteries** avec des procédés plus ou moins élaborés et qui produisent des matières de qualités variables pouvant être valorisées en boucle ouverte ou potentiellement en boucle fermée (après reprise et affinage complémentaire par des intermédiaires). Pour cette catégorie d'acteurs, l'enjeu stratégique est de s'assurer des débouchés pérennes avec des niveaux de prix qui rentabilisent leur process. Dans cette optique, il n'y a pas obligatoirement un intérêt à fermer la boucle de recyclage (en produisant des composés métalliques de qualité « grade batterie ») tant qu'il existe des débouchés pour des extrants de moindre qualité (c'est le cas aujourd'hui pour les alliages de Cobalt et de Nickel). Ces acteurs, en forte compétition en Europe sont particulièrement discrets sur la nature et la qualité de leurs extrants ainsi que leurs exutoires.

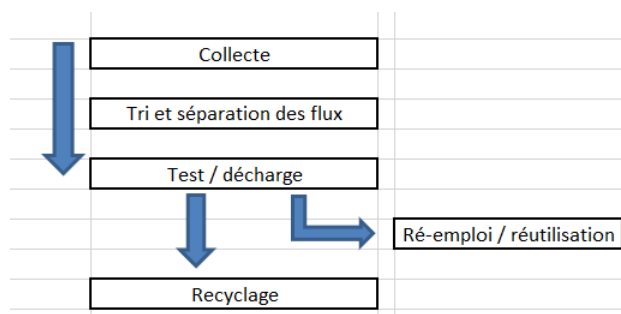
### 3.10 Recyclage des batteries Li-ion et stratégie des acteurs

Le recyclage des batteries Li-ion est un enchaînement d'opérations parfois complexes et faisant appel à des savoir-faire divers.

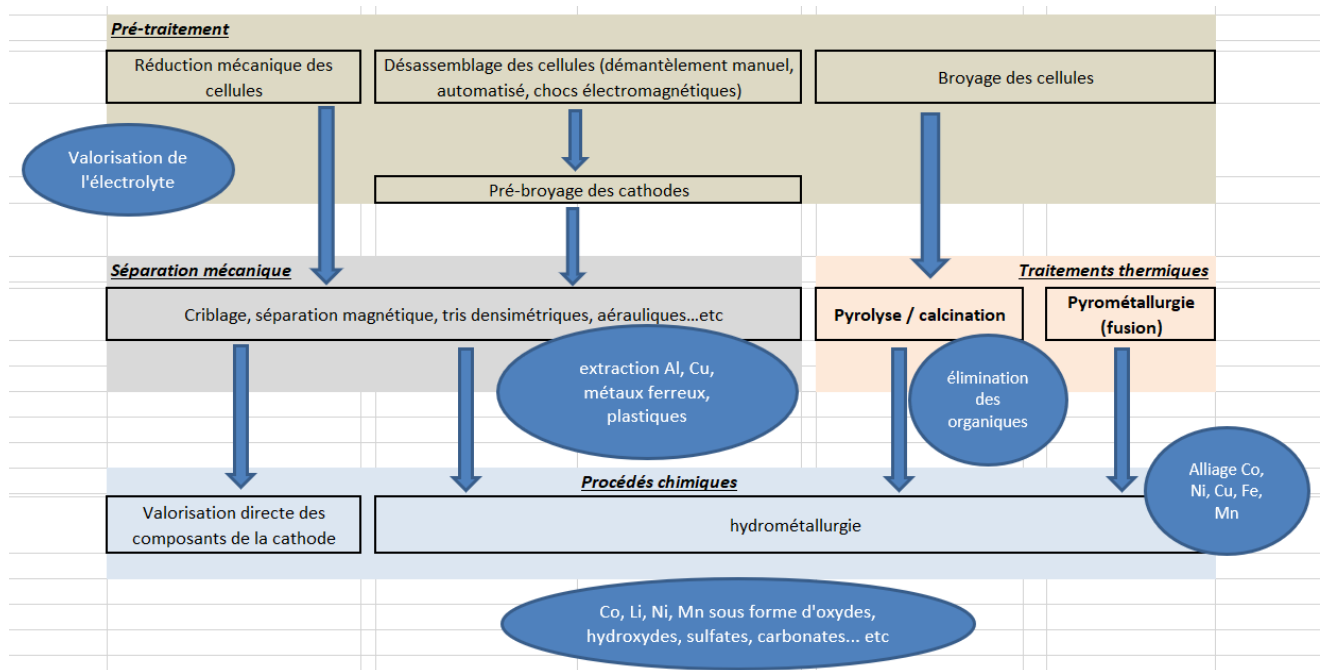
Ces savoir-faire sont issus des secteurs du recyclage (collecte, tri, séparation des flux et des matières), des assembleurs et intégrateurs de batteries (test, décharge, potentiel de réemploi, matériaux constitutifs), et de la métallurgie extractive (procédés de traitement pyro et hydro-métallurgiques).

En ce qui concerne le recyclage des batteries Li-ion issus de VEH, on peut schématiser l'enchaînement des opérations de recyclage ainsi :

#### Les étapes préalables au recyclage matière



## Les étapes du recyclage



**Fig 24 :** Enchaînement des opérations de recyclage des batteries Li-ion

### Les options stratégiques pour les différents acteurs diffèrent en fonction des zones géographiques qui offrent des contextes réglementaires et industriels différents.

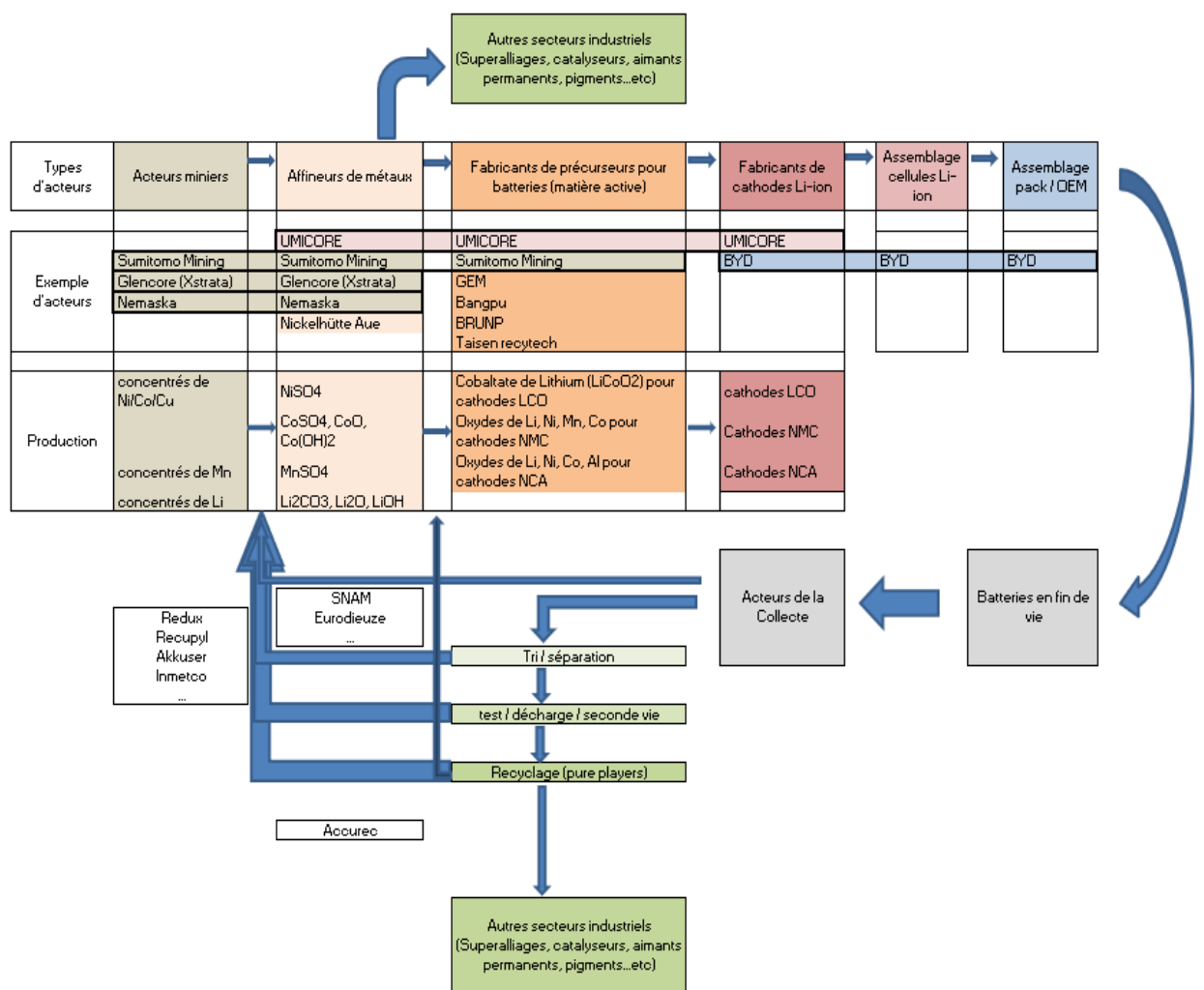
La plupart des « pure players » sont basés en Europe et au Japon. Ils se sont développés dans le cadre de la mise en place des filières à responsabilité élargie des producteurs. Ils prennent en charge des flux en mélange, principalement de type « portables », en assurent le tri et la séparation et traitent souvent plusieurs types de batteries (Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH... mais aussi des piles).

En général, ces acteurs mettent en œuvre des procédés mécaniques et/ou pyro-métallurgiques, la plupart du temps limités à de la pyrolyse/calcination, plus rarement de la fusion. La fusion permet de produire un alliage Ni/Co (pouvant aussi contenir du Cu, Fe, Mn en fonction du mix entrant) qui peut être valorisé directement en sidérurgie (fabrication d'aciers spéciaux et superalliages). Les procédés de pyrolyse/calcination et ou séparation mécanique visent à concentrer les matières actives de la cathode et produire une black mass qui pourra ensuite être valorisée par hydrométallurgie.

Actuellement, même si nombre d'entre eux prétendent fermer la boucle de recyclage, en réalité ils sont peu nombreux à mettre en œuvre des procédés hydro-métallurgiques. (Eurodieuze, SNAM en projet, Duesenfeld en développement...) Et quand c'est le cas, il est quasiment impossible de savoir si la qualité des produits en sortie est suffisante (« grade batterie ») pour une valorisation en boucle fermée car ils ne communiquent pas sur leurs exutoires.

En pratique la plupart des « pure players » s'appuient sur des prestataires extérieurs, spécialisés dans l'affinage des métaux, notamment le Cobalt et le Nickel (tels que Nickelhütte Aue ou Umicore) qui mettent en œuvre des procédés hydro-métallurgiques. Ces procédés préexistants ne sont pas dédiés et peuvent intégrer d'autres déchets (catalyseurs, boues industrielles chargées en métaux...etc) ou produits (concentrés de métaux issus d'activités minières).





**Fig 25** : Positionnement des acteurs du recyclage de batteries par rapport à la chaîne de fabrication des batteries Li-ion (voir le même schéma en annexe 8)

Ce sont ces affineurs de métaux qui, en fonction de la nature/qualité des intrants et de leurs procédés d'affinage, orientent la boucle de recyclage : boucle fermée en direction des fabricants de précurseurs pour batteries ou boucle ouverte vers d'autres secteurs industriels. Avec la possibilité de sélectionner en partie leurs intrants et d'orienter la boucle de recyclage (en fonction des opportunités sur le marché aval), les affineurs occupent un maillon stratégique dans la chaîne de recyclage.

Pour les « pure-players », la question se pose de leur dépendance vis à vis de ces exutoires dont la pérennité n'est pas garantie : Peuvent-ils continuer à dépendre des affineurs pour la valorisation de leurs extrants ? Doivent-ils investir sur des procédés plus performants pour produire des MPS de meilleure qualité (Li, Ni, Co sous forme d'oxyde, hydroxyde, mais surtout sulfate ou carbonate...) valorisables notamment auprès de fabricants de précurseurs de cathodes ? et ainsi supprimer un intermédiaire et « avancer » sur la chaîne de valeur ?

Au regard des incertitudes sur le prix et la disponibilité des matières premières, l'évolution de la chimie des batteries, les évolutions réglementaires et la stratégie des autres acteurs, les « pure players » sont actuellement plutôt dans une phase d'attente et d'observation. En effet, les procédés hydro-métallurgiques nécessitent de lourds investissements et des coûts opérationnels importants dont la rentabilité est difficile à apprécier dans le contexte actuel, même si on peut prévoir une demande

croissante en matières actives pour cathode (notamment en sulfate de Cobalt et en Nickel haute pureté). De plus, ces procédés exigent de sélectionner les intrants alors que ces acteurs se positionnent souvent sur des flux variés. La question de l'affinage est donc aussi liée à celle de la spécialisation sur un flux particulier de batteries, versus généraliste. Leur savoir-faire peut aussi tout simplement trouver sa place en amont sur les métiers spécifiques aux recycleurs, la collecte, le tri et le démantèlement.

Contrairement aux Etats-Unis ou à la Chine, les sociétés minières en Europe restent des acteurs marginaux du recyclage des batteries (même si ERAMET – acteur majeur sur le Nickel, le Manganèse et le Cobalt - recycle des piles au travers de sa filiale VALDI, ou que l'entreprise BOLIDEN en Suède – Cuivre / Zinc / Nickel - s'intéresse au recyclage des batteries Li-ion). En effet, l'industrie européenne qui exploite peu de ressources minières domestiques a peu d'installation sur le continent. A l'image d'UMICORE (depuis 1990), des acteurs historiques se sont déjà convertis au moins en partie à l'affinage de métaux et au recyclage (DEEE et autres déchets contenant des métaux à forte valeur). De plus, les exigences réglementaires en Europe (autorisations d'exploiter, limitation des émissions, rendement de recyclage) permettent difficilement aux fonderies de réaliser un recyclage des batteries (Li-ion, Ni-MH) en conformité sans modification des procédés existants.

En revanche aux Etats-Unis on peut voir des acteurs miniers investir le créneau du recyclage à l'instar de Glencore (production de Nickel, alliages Ni-Cu-Co, concentrés de Cobalt, intermédiaires cobaltés sous forme de d'hydroxyde, carbonate, sulfate) ou l'entreprise American Manganese Inc qui annonce le démarrage d'une unité de recyclage de batteries Li-ion de VEH pour 2019. Ou encore l'entreprise Nemaska Lithium Inc.<sup>96</sup> (Canada) qui dans le cadre de la construction d'une usine de production d'hydroxyde et de carbonate de lithium à partir de concentré de spodumène (silicate de Li et Al) prévoit d'intégrer des batteries en fin de vie dans ses flux entrants.

Au Japon, il existe des pure players (Nippon Recycling Center) qui ont émergé dans le sillage de la réglementation, mais aussi un acteur minier majeur (Sumitomo Metal Mining) qui après avoir investi dans la fabrication de cathodes pour batteries Li-ion et Ni-Mh, intègre maintenant les activités de recyclage.

Aux Etats-Unis et en Chine, les réglementations moins contraignantes qu'en Europe ou au Japon n'ont pas permis en général, le développement d'acteurs spécialisés dans le recyclage des batteries Li-ion issus de VEH (c'est moins vrai pour le Ni-MH dont le recyclage reste rentable).

Mais dès lors que les quantités de batteries de VEH en fin de vie augmentent, les enjeux liés à la protection de l'environnement et à la récupération de métaux stratégiques prennent de l'importance et obligent à considérer le recyclage comme une nécessité. Dans ce contexte, ce sont les acteurs de la chaîne de fabrication des batteries qui investissent naturellement le créneau. Soit parce qu'ils ont déjà un savoir-faire industriel (sociétés minières, affineurs de métaux en amont de la chaîne), soit parce qu'ils souhaitent sécuriser leurs approvisionnements (en aval : fabricants de précurseurs, fabricants de cathodes, fabricants de batteries, de VEH). Pour la Chine, ce mouvement est également encouragé par le gouvernement qui impose aux fabricants de VEH de structurer une filière de collecte et de recyclage des batteries en fin de vie.

De manière générale, dans toutes les zones géographiques étudiées, les constructeurs de VEH se positionnent directement ou au travers de partenariats sur la problématique du recyclage. Au-delà de l'obligation qui leur est faite (injonction gouvernementale en Chine, réglementation REP en Europe et au Japon), les constructeurs y voient probablement la possibilité de sécuriser partiellement un approvisionnement en matières premières mais c'est aussi le potentiel de réemploi / réutilisation qui semble les intéresser.

---

<sup>96</sup> Nemaska Lithium Inc développe au Québec un des plus importants gisements de spodumène (silicate d'Al et Li) au monde.

Ainsi, en Europe la SNAM a établi des partenariats avec BMW, PSA, Honda, Kia, Toyota...etc. Umicore avec BMW et Toyota.

Au Japon Nissan a créé avec Sumitomo Corporation une joint-venture baptisée 4R Energy Corporation pour le réemploi et la réutilisation des batteries de Nissan Leaf.

Volkswagen prévoit pour 2020, une usine pilote de recyclage qui sera implantée à Salzgitter (Allemagne) avec une capacité de 1200 T /an.

A terme, TESLA affirme vouloir mettre en œuvre une unité de recyclage en boucle fermée sur le site de sa Gigafactory située au Nevada afin de recycler ses propres batteries<sup>97</sup>. En attendant l'entreprise s'appuie sur des prestataires extérieurs (Umicore en Europe, KBI aux Etats-Unis). Mais la réalité c'est que le nombre de VEH de fabrication TESLA en fin de vie est encore anecdotique. La première model S est commercialisée en 2012. Avant ça, les ventes des modèles Roaster I et II, sportives haut de gamme à un prix de 200 000 USD ne sont pas significatives.

En Chine, BYD intègre déjà une partie de la filière (de la fabrication de cathode jusqu'à la fabrication de VEH) et prévoit la construction d'une usine de recyclage de batteries Li-ion.

En Chine encore, l'entreprise GEM spécialisée dans l'affinage de Cobalt et Nickel, devient un acteur majeur du recyclage. Elle a une capacité de production de 20 000 T de précurseurs ternaire (composés Nickel / Manganèse / Cobalt et Nickel / Cobalt / aluminium) pour la fabrication de cathodes NCA et NMC. GEM est aujourd'hui un leader sur le marché pour la production de poudre de Cobalt (50 % du marché chinois) ou de Nickel (30 % du marché chinois) ultrafines. GEM produit également du Cobalt sous forme d'oxyde, hydroxyde et sulfate ou carbonate et du Nickel sous forme de sulfate et carbonate.

Pour terminer sur la stratégie des acteurs, il est intéressant de voir comment s'organise UMICORE qui est aujourd'hui un des acteurs mondiaux les plus avancés sur le recyclage des batteries Li-ion. En Europe la chaîne complète de recyclage est organisée autour de plusieurs sites correspondant à autant de pôles de compétences spécifiques. La collecte, le tri des flux, la décharge et le démantèlement sont fait sur le site de Hanau (Allemagne), le traitement par pyro-métallurgie pensé spécifiquement pour un flux de batteries, se fait sur le site d'Hoboken (Belgique) alors que l'affinage par voie hydro-métallurgique pour produire des matériaux de haute qualité (en particulier du  $\text{CoSO}_4$  et  $\text{NiSO}_4$  pour les batteries Li-ion) est réalisé sur le site de Olen (Belgique) et utilise un procédé préexistant. L'entreprise poursuit une stratégie de déploiement international en implantant d'abord son savoir-faire en matière de production de matériaux de haute pureté pour cathode Li-ion (Site de Cheonan en Corée du Sud, Site de Jiangmen en Chine). Sur le continent asiatique, il est probable qu'Umicore intègre des activités de recyclage dans les années à venir.

### **3.11 Les procédés de recyclage face à l'évolution des technologies Li-ion**

Les procédés de recyclage actuels permettent d'apporter des solutions de recyclage aux différentes technologies Li-ion. Les acteurs actuels, en fonction de la tolérance de leurs procédés peuvent intégrer un flux trié ou en mélange de batteries Li-ion de type NMC, LCO, NCA et LMO ainsi que des batteries Ni-MH.

---

<sup>97</sup> Interview CTO JB Staubel le 25/08/2018

<https://medium.com/tradr/teslas-approach-to-recycling-is-the-way-of-the-future-for-sustainable-production-5af99b62aa0e>

Les acteurs Chinois principalement concernés, ou encore Nemaska Lithium Inc. (qui produit un hydroxyde de Lithium pour batteries LFP) développent des procédés adaptés aux batteries LFP (bien que nous n'ayons pas réussi à identifier avec certitude des entreprises chinoises qui recyclent ou envisagent de recycler des batteries LFP).

A moyen terme, les évolutions technologiques sur les batteries Li-ion et qui pourraient affecter les procédés de recyclage concernent potentiellement les anodes au silicium mais surtout les batteries tout solides qui sont attendues sur le marché entre 2022 et 2025.

Les batteries à électrolyte solide organiques ne posent pas de problème dès lors que les procédés utilisent une étape de pyrolyse/calcination. Mais c'est apparemment aussi le cas en ce qui concerne les électrolytes solides inorganiques. En effet, ces électrolytes présentent différentes compositions à base d'oxyde (ex : Lithium, Lanthane, oxyde de Titane ou Lithium, Aluminium, Lanthane, oxyde de Phosphate) ou à base de soufre (Lithium, Phosphore, Soufre ou Lithium, Etain, Phosphore, Soufre... etc) avec des températures de fusion qui restent relativement basses et permettent de les liquéfier par pyrolyse/calcination.

Concernant la présence possible de silicium dans la blackmass, même en faible quantité, on peut s'interroger sur l'impact qu'il pourrait avoir sur le rendement et la sélectivité des procédés hydro-métallurgiques, mais cette question n'est apparemment pas abordée par la littérature.

Interrogé sur le sujet, Umicore considère qu'aucune de ces évolutions technologiques ne représente une menace sur l'efficacité de leur procédé.

En revanche, les procédés strictement mécaniques et à froid (valorisation directe et préparation à un traitement hydro-métallurgique sans calcination/pyrolyse) pourrait être impacté par la présence d'électrolyte solide.

### **3.12 R&D, quels enjeux prioritaires ?**

En Europe, en dehors des entreprises privées, deux laboratoires de recherche publique sont particulièrement actifs dans le domaine du recyclage des batteries : le CEA-LITEN en France et le Fraunhofer Institute en Allemagne.

Ces laboratoires travaillent en partenariat avec des universités ainsi qu'avec des entreprises privées (le CEA-LITEN mène par exemple un projet avec la SNAM pour augmenter le rendement de leur procédé). Même s'ils travaillent sur l'ensemble de la chaîne de recyclage, les thèmes de recherche donnant lieu à un dépôt de brevet concernent plus particulièrement la récupération de l'électrolyte<sup>98</sup> et l'amélioration des procédés hydro-métallurgiques (réduction des impacts environnementaux et amélioration des rendements de lixiviation).

Concernant ce dernier point, il faut pourtant rester prudent. En effet, les procédés hydro-métallurgiques sont connus et utilisés depuis longtemps par les acteurs de la métallurgie extractive. Si des brevets proposent une optimisation de ces procédés, force est de constater qu'il n'ont pas dépassé à ce jour le stade du laboratoire.

Ainsi le procédé hydro-métallurgique breveté par RECUPYL n'a jamais été mis en œuvre. La société Duensenfeld de son côté, n'a mis en œuvre à ce jour que la première phase de son procédé (récupération de l'électrolyte et préparation d'une blackmass).

---

<sup>98</sup> (US20170207503) Method for Recycling the Electrolyte of a Li-Ion Battery and Method for Recycling Li-Ion Batteries – E. Billy et R. Laucournet – CEA (publié le 20/07/2017) – et projet LITHOREC II en Allemagne qui a débouché sur la création de l'entreprise Duesenfeld.

A son tour, le CEA-LITEN a déposé un brevet en 2015<sup>99</sup> pour un procédé permettant d'améliorer le rendement de lixiviation en utilisant les métaux réducteurs des collecteurs plutôt qu'un agent réducteur classique. Le procédé promet également de réduire l'impact environnemental mais il n'a pas encore fait l'objet d'une expérimentation industrielle.

Un obstacle majeur réside toujours dans la nécessité d'une parfaite maîtrise du flux entrant puisque le rendement de lixiviation exige un pilotage fin du ratio métal réducteur/oxyde métallique.

En outre, le changement d'échelle peut générer des problèmes liés par exemple à l'homogénéisation des batchs : En laboratoire on utilise un barreau magnétique qui tourne à 500 tours / minute et agite fortement un échantillon de 50 ml.... Peut-on envisager un tel niveau d'agitation sur un batch de plusieurs centaines de kg ?

Enfin les temps de résidences sont relativement longs (18 à 21 h pour le brevet déposé par le CEA), ce qui signifie qu'avec par exemple, des batchs d'une tonne, la capacité d'une unité de traitement serait relativement faible (300 T /an)

En matière de R&D, comme nous l'avons montré précédemment, les principales marges d'amélioration de la performance se situent aujourd'hui en amont des procédés de recyclage.

En effet, le principal enjeu pour pouvoir produire des matières premières secondaires de « grade batterie » est de contrôler et maîtriser les flux de matière avant leur traitement par des procédés hydro-métallurgiques. Il s'agit donc :

- D'optimiser la combinaison de procédés de tri et séparation mécaniques afin d'extraire et valoriser les matières actives de la cathode par valorisation directe en évitant une extraction sélective (Gratz et al. 2014; Sa et al. 2015; Zou et al. 2013),
- D'optimiser la combinaison de procédés de tri et séparation mécaniques pour préparer un composé exempt d'impuretés en entrée de procédés hydro-métallurgiques (ex : Duesenfeld qui met en œuvre un pré-traitement qui enchaîne de nombreuses opérations de tri/séparation).

L'optimisation des procédés hydro-métallurgiques représente un enjeu de long terme qui n'est pas prioritaire actuellement.

### **3.13 Conclusions sur les procédés de recyclage**

Le recyclage des batteries Ni-Cd fait appel à des procédés spécifiques et maîtrisés. La stabilité des volumes à l'avenir permettra d'assurer la pérennité de solutions qui remplissent aujourd'hui les attentes en tout cas en Europe et au Japon où la fin de vie de ces batteries est réglementée.

Le recyclage des batteries Ni-MH, est largement pratiqué dans le monde du fait de sa rentabilité.

L'enjeu principal du recyclage concerne plus particulièrement les batteries Li-ion qui présente plusieurs difficultés. Les batteries Li-ion sont d'une grande diversité, dans leur forme et leur composition, leur recyclage est coûteux pour la plupart d'entre elles et les volumes en fin de vie sont en croissance rapide. Au-delà des enjeux environnementaux, c'est la récupération des métaux stratégiques (Li, Co, Ni) qui motive le recyclage de ces batteries.

Les procédés de recyclage peuvent être classés en trois familles. Les procédés mécaniques de valorisation directe, les procédés pyro-métallurgiques et les procédés hydro-métallurgiques qui peuvent aussi se combiner entre eux.

---

<sup>99</sup> (FR3034104) Procédé de dissolution d'un oxyde métallique en présence d'un métal réducteur.

Chacun présente des avantages et des inconvénients en matière de rendement, de cout et d'impacts environnementaux. Les procédés hydro-métallurgiques exigent des flux entrants homogènes, ils sont couteux, leur impact environnemental est important mais ils permettent de produire des MPS de qualité, potentiellement valorisables en boucle fermée. Les procédés pyro-métallurgiques peuvent intégrer des volumes importants et un flux hétérogène, ils produisent des MPS de moindre qualité, et offrent des rendements de recyclage plus faibles. Les procédés de valorisation directe sont en théorie les plus performants aussi bien en termes de cout que de rendement de recyclage et d'impact environnemental. Cependant, ils n'ont pas encore fait la démonstration de leur efficacité à une échelle industrielle.

Les procédés de traitement par pyro-métallurgie et hydrométallurgie puisent dans le champ de connaissance déjà largement exploré par l'industrie métallurgique (extraction et affinage).

Ainsi, les marges de manœuvre en matière d'amélioration des procédés actuels concernent avant tout la maîtrise des flux entrants et les opérations de pré-traitement et de tri/séparation mécanique. Il s'agit notamment :

- De permettre l'identification des différentes technologies Li-ion afin de faciliter le tri pour homogénéiser les flux en entrée de procédés,
- De standardiser les designs pour faciliter les opérations de manutention, démontage, démantèlement,
- De donner un accès transparent aux informations du BMS pour faciliter les opérations de réemploi/réutilisation,
- D'optimiser la combinaison de procédés de tri et séparation mécaniques afin d'extraire et valoriser les matières actives de la cathode par valorisation directe en évitant une extraction sélective ( Gratz et al. 2014; Sa et al. 2015; Zou et al. 2013),
- D'optimiser la combinaison de procédés de tri et séparation mécaniques pour préparer un composé exempt d'impuretés en entrée de procédés hydro-métallurgiques (ex : Duesenfeld qui met en œuvre un pré-traitement qui enchaîne de nombreuses opérations de tri/séparation)

Dans les années à venir, le principal facteur de croissance sur l'utilisation du Cobalt et du Lithium (et du Nickel dans une moindre mesure) sera le secteur de la fabrication des batteries de VEH. De ce fait, une des principales préoccupations est de se donner la possibilité de « fermer la boucle de recyclage » soit pour s'assurer des débouchés pour ses MPS (pour les recycleurs et les acteurs amont), soit pour sécuriser ses approvisionnements (pour les acteurs aval tels que fabricants de précurseurs, de cathodes, de batteries, de VEH). L'affinage des métaux est ainsi un maillon stratégique dans la chaîne de recyclage.

La réglementation et le tissu industriel des différentes zones géographiques façonnent des configurations différentes et déterminent en grande partie la stratégie des acteurs

En Europe et au Japon la réglementation sur la fin de vie des batteries a permis l'émergence d'acteurs spécialisés dans le recyclage des batteries Li-ion. Cependant la plupart d'entre eux mettent en œuvre des procédés qui visent à concentrer les matières actives de cathodes avant de les valoriser directement en boucle ouverte (sidérurgie, superalliages) ou les envoyer vers des affineurs de métaux capables de traiter différents flux concentrés en Nickel et Cobalt. Ces acteurs sont donc dépendants des affineurs et la question se pose pour eux d'intégrer des procédés hydro-métallurgiques permettant de capter une valeur supplémentaire et maîtriser les exutoires pour leur MPS. Face aux incertitudes du marché (évolutions des volumes en fin de vie, cours des matières premières et de l'énergie...etc) les « pure players » du recyclage manquent de garantie quant à un retour sur des investissements couteux et sont donc généralement en phase d'attente.

Aux Etats Unis ou en Chine, alors que la problématique du recyclage des batteries Li-ion devient prégnante, ce sont les acteurs amont (miniers, affineurs de métaux) ou aval (fabricants de cathodes, batteries, VEH) qui se positionnent et intègrent le recyclage à leurs activités.

## 4 ANALYSE PROSPECTIVE

Ayant démontré que les enjeux en matière de recyclage concernent essentiellement les batteries de technologies Li-ion, cette partie se concentrera uniquement sur ces technologies. L'objectif est, à partir des perspectives d'évolution du marché des batteries, d'estimer les volumes de batteries en fin de vie jusqu'en 2030 puis de les mettre en relation avec les capacités de recyclage existantes.

### 4.1 Méthodologie générale

#### **Approche du marché**

L'état des lieux du marché actuel, un regard sur son historique et ses déterminants vont nous permettre d'élaborer dans un premier temps des prévisions d'évolution du marché en volume.

Nous émettrons ensuite une série d'hypothèses (durée de vie, potentiel de seconde vie, quantités réellement disponibles pour la collecte) concernant la fin de vie qui nous permettront d'élaborer différents scénarii pour anticiper les volumes de batteries en fin de vie.

Nous étudierons 3 grands secteurs de marché : les VEH, les bus électriques et le reste (produits grands publics, industriel, stockage stationnaire et deux roues électriques) de manière séparée.

Ce choix de segmentation nous apparaît le plus pertinent pour plusieurs raisons :

- Les dynamiques de croissance, les profils de durée de vie et le potentiel de réemploi sont différents sur ces segments et doivent donc être abordées séparément,
- Il permet d'étudier spécifiquement le segment des VEH, le plus important, et pour lequel les prévisions des analystes semblent généralement optimistes,
- Il permet d'étudier spécifiquement le segment des bus électriques dont les volumes sont localisés très majoritairement en Chine,
- Il permet de prendre en compte l'essentiel du marché des batteries Li-ion sans le sur-segmenter ce qui alourdirait considérablement le travail de prospective sans bénéfice majeur.

Les prévisions du marché (ventes) seront réalisées sur la période 2018 – 2030. Ceci nous permet de faire une analyse prospective des volumes de batteries en fin de vie sur la même période et nous indique la tendance au-delà de cette période.

Cette étude sera faite de manière différenciée en fonction de grandes zones géographiques (Chine, Etats-Unis, Europe et Japon). Nous montrerons dans la première partie sur l'état des lieux, la nécessité de cette différenciation géographique.

## **Hypothèses**

Un certain nombre d'hypothèses sont nécessaires pour guider les travaux de prospective.

Ces hypothèses concernent les points suivants :

- La dynamique de croissance des différents marchés qui est différente en fonction des segments étudiés et des zones géographiques.
- Les parts de marché entre véhicules tout-électrique et hybrides et leur évolution sur les différentes zones géographiques.
- Le mix technologique au sein de la famille Li-ion pour prendre en compte en particulier le fait que :
  - o Les batteries de différentes technologies Li-ion (principalement NMC, LCO, LMO et NCA) peuvent être traitées dans les mêmes installations de recyclage (en entrée de la chaîne de recyclage et en pyro-métallurgie) et en mélange le cas échéant.
  - o Le recyclage des batteries LFP est réalisé séparément des autres flux du fait d'une composition matière très différente (même si les procédés pyro-métallurgiques sont similaires)
  - o Les batteries Ni-MH provenant des véhicules hybrides sont traitées dans les mêmes installations que les batteries Li-ion (Hors LFP). Ceci correspond aux pratiques actuelles des principaux industriels européens du recyclage et le développement des batteries NMC (forte proportion de Nickel) devrait renforcer cette logique industrielle.
- Les correspondances entre technologies, capacités moyennes (souvent exprimées en Wh) et poids pour déterminer le poids moyen des batteries en fonction des différents segments de marchés et applications et ainsi évaluer les tonnages en fin de vie.
- Les profils de durée de vie des batteries en fonction des segments de marché
- Le potentiel de réemploi des batteries

L'ensemble de ces hypothèses pourront donner lieu à la prise en compte de différents scénarii (pour la croissance du marché des VEH, pour la durée de vie des batteries de VEH et pour le potentiel de réemploi où les incertitudes sont importantes) ou à la prise en compte de données moyennes (scénario unique lorsque le consensus est large ou lorsque les approximations impactent faiblement les projections finales)

### **Rappel sur les typologies de véhicules électriques et batteries associées :**

Lorsqu'on parle de véhicules électriques, il faut distinguer 3 typologies de fonctionnement. En effet, le rôle et la taille de la batterie varient fortement selon ces types. Il existe les modèles hybrides qui combinent 2 sources d'énergie (un moteur à combustion classique et un moteur électrique) et les modèles « tout électrique » (BEV – Battery Electric Vehicle).

Au sein des modèles hybrides, il existe les modèles non rechargeables (HEV – Hybrid Electric Vehicles) et les modèles rechargeables (P-HEV : Plug in Hybrid Electric Vehicle).

Dans le cas des modèles non rechargeables, le moteur électrique assiste le moteur à combustion pour réduire sa consommation. La recharge de la batterie se fait par un alternateur couplé au moteur à combustion et/ou par récupération de l'énergie de freinage. Ces modèles disposent d'une batterie de faible capacité (1 à 2 KWh)

Les modèles hybrides rechargeables permettent de fonctionner sur le moteur à combustion, basculer sur une alimentation électrique sur courte distance ou combiner les deux. Ils disposent d'une batterie de plus grande capacité (6 à 20 KWh) et offrent une petite autonomie sur le mode électrique. La recharge peut s'effectuer par récupération de l'énergie de freinage et recharge à l'aide d'un alternateur mais principalement par branchement sur une borne de recharge.



Enfin les modèles « tout électriques » n'ont pas de moteur à combustion. Ils sont équipés d'une batterie plus importante (15 à 100 KWh pour les modèles à forte autonomie) et se rechargent sur une borne.

Le site Wikipédia<sup>100</sup> donne une large liste de différents véhicules commercialisés avec la capacité de leurs batteries respectives, permettant de constater la diversité des modèles.

Au regard de ces différents modèles et en cohérence avec AVICENNE ENERGY (Présentation au congrès de Nice en Octobre 2018), nous baserons nos travaux sur une capacité moyenne de batteries pour chacune des 3 familles de véhicules électriques :

**HEV = 1.5 KWh** en moyenne par véhicule sur l'ensemble de la période étudiée

**P- HEV = 12 KWh** en moyenne par véhicule sur l'ensemble de la période étudiée

**BEV = 35 KWh** en moyenne par véhicule actuellement avec une évolution progressive pour atteindre **60 KWh** en moyenne en **2030**.

Les termes BEV, PHEV et HEV seront utilisés dans la suite du document pour définir les différentes catégories de VEH (Véhicules Electriques et Hybrides).

## **4.2 Etat des lieux du marché mondial des batteries Li-ion**

Cet état des lieux s'appuie sur les données de l'IEA (International Energy Agency) <sup>101</sup> – Global EV outlook 2018 en ce qui concerne les VEH de type BEV et PHEV ainsi que les bus électriques.

Pour le reste, c'est à dire les VEH de type HEV et les autres équipements utilisant des batteries Li-ion, nous reprenons les données communiquées par AVICENNE ENERGY<sup>102</sup>.

### **4.2.1 Véhicules électriques légers – VEH (particuliers et utilitaires)**

#### **Les ventes**

Les ventes de VEH (BEV + PHEV) ont atteint 1,15 million d'unités en 2017 (2,1 Millions en 2018) avec une croissance de 54 % par rapport aux ventes 2016.

Le tableau ci-dessous détaille les ventes de VEH (BEV + PHEV) en milliers d'unité, par pays et par an depuis 2005.

---

<sup>100</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_vehicle\\_battery#Example\\_Vehicles\\_and\\_their\\_Battery\\_capacity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery#Example_Vehicles_and_their_Battery_capacity)

<sup>101</sup> International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2018. Rapport accessible en ligne sur <https://www.iea.org/gevo2018/>

<sup>102</sup> The rechargeable battery market trends 2017-2025 – Presentation Nice Congress, October 2018

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Australia							0.05	0.25	0.29	1.32	1.77	1.37	2.28
Brazil								0.09	0.17	0.06	0.09	0.17	0.36
Canada							0.52	2.02	3.12	5.07	6.96	11.58	16.68
Chile							0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.15
China					0.48	1.43	5.07	9.90	15.34	73.17	207.38	336.00	579.00
Finland							0.03	0.18	0.22	0.44	0.69	1.43	3.06
France	0.01	0.01	0.01		0.01	0.19	2.73	6.26	9.62	12.64	22.95	29.51	34.78
Germany	0.02			0.07	0.02	0.14	1.65	3.37	6.93	12.74	23.19	24.61	54.56
India				0.37	0.16	0.35	0.45	1.43	0.19	0.41	1.00	0.45	2.00
Japan					1.08	2.44	12.62	24.44	28.88	32.29	24.65	24.85	54.10
Korea						0.06	0.27	0.51	0.60	1.31	3.19	5.26	14.71
Mexico								0.09	0.01	0.05	0.10	0.27	0.26
Netherlands				0.01	0.03	0.12	0.88	5.12	22.42	15.09	43.77	24.48	11.07
New Zealand						0.01	0.01	0.03	0.04	0.32	0.49	1.50	3.47
Norway			0.01	0.24	0.15	0.39	1.84	4.51	8.52	19.77	33.73	44.89	62.26
Portugal						0.72	0.19	0.05	0.18	0.20	0.64	1.47	1.78
South Africa									0.03	0.01	0.24	0.38	0.20
Sweden							0.18	0.93	1.55	4.67	8.59	13.42	20.35
Thailand							0.01	0.01	0.01	0.07	0.27		0.03
United Kingdom	0.22	0.32	0.45	0.22	0.18	0.28	1.22	2.69	3.75	14.74	29.34	37.91	47.25
United States	1.12			1.47		1.19	17.73	53.24	96.70	118.78	113.87	159.62	198.35
Others	0.53			0.09	0.03	0.17	1.80	2.71	4.23	9.55	17.79	25.02	42.02
Total	1.89	0.34	0.47	2.46	2.13	7.49	47.24	117.84	202.80	322.70	540.72	744.22	1 148.70

**Tab 10** : ventes de BEV et PHEV (en unités) – source Global EV outlook 2018

Le tableau suivant propose de mettre en perspective la répartition des ventes globales de véhicules avec la répartition des ventes de VEH (BEV+PHEV), sur les principaux marchés mondiaux.

Zones géographiques	Marché global du véhicule (en Mi d'unités)	PdM sur marché global	Marché VEH	PdM sur marché VEH	PdM VEH / marché global
Chine	27,5	29,6%	579000	50,4%	2,11%
Etats-Unis	17	18,3%	198350	17,3%	1,17%
Europe	17,6	18,9%	240000	20,9%	1,36%
Japon	5,1	5,5%	54100	4,7%	1,06%
Reste du monde	25,8	27,7%	77250	6,7%	0,30%
TOTAL	93	100,0%	1148700	100,0%	1,24%

**Tab 11** : Analyse du marché mondial des VEH par rapport au marché global du véhicule léger (2017)

Ces données permettent de mettre en évidence certains déséquilibres mondiaux. Alors que les marchés européens, américains et japonais du VEH restent cohérents avec le marché global du véhicule, on note que le marché Chinois est particulièrement dynamique, la croissance du marché des VEH étant décorrélé de la croissance du marché global des véhicules légers.

La Chine absorbe 50% des ventes de VEH (alors qu'il ne représente que 30 % du marché mondial des véhicules). Ce marché présente un taux de pénétration deux fois supérieur aux autres principaux marchés.

A l'inverse le marché du VEH reste très faible sur la partie « reste du monde ». Et si on enlève le Canada et la Corée du Sud, on peut même considérer qu'il est anecdotique.

De fortes disparités sont à noter également au sein du continent européen. Si on regarde plus précisément, 6 pays (Norvège, Allemagne, France, UK et Suède et Pays-Bas) totalisent plus de 95 % des ventes européennes (pour moins de 50 % de la population).

La Norvège à elle seule, totalise 62 000 unités vendues (soit 25 % du marché européen) pour 5 Millions d'habitants (soit 1% de la population européenne). Pour ce pays, cela représente 39 % de taux de pénétration en 2017, un record très supérieur aux pays suivants (l'Islande avec 11,7 % et la

Suède avec 6,3 %). Ces pays dans lesquels le taux de pénétration est élevé sont tous des pays à faible population et donc avec des potentiels de développement supplémentaires limités (en nombre d'unités).

Cette première analyse, nous permet de conclure que d'une part les dynamiques de marché ne sont pas homogènes (quelques pays seulement tirent le marché du VEH, ce dont il faut tenir compte dans les prévisions du marché à moyen terme) et d'autre part la répartition des volumes étant très hétérogène, cela impacte et limite de manière déterminante les zones géographiques dans lesquelles se retrouveront à terme les volumes de batteries en fin de vie.

Un autre critère d'hétérogénéité concerne la répartition des ventes entre BEV (« full electric ») et PHEV (« Plug-in » hybrides ou hybrides rechargeables) dont il faudra tenir compte pour estimer les volumes en fin de vie puisque le poids des batteries diffère fortement entre ces types de véhicules.

En 2017, L'agence Internationale de l'Energie recense 398 210 immatriculations de voitures hybrides rechargeables (PHEV) soit 35 % du marché des VEH (BEV + PHEV).

Zones géographiques	Marché total VEH	Marche BEV	PdM BEV / Total VEH	Marché PHEV	PdM PHEV / Total VEH
Chine	579000	468000	80,8%	111000	19,2%
Etats-Unis	198350	104490	52,7%	93860	47,3%
Europe	240000	115000	47,9%	125000	52,1%
Japon	54100	18100	33,5%	36000	66,5%
Reste du monde	77250	44900	58,1%	32350	41,9%
TOTAL	1148700	750490	65,3%	398210	34,7%

**Tab 12** : Taille et mix du marché des VEH en fonction des zones géographiques

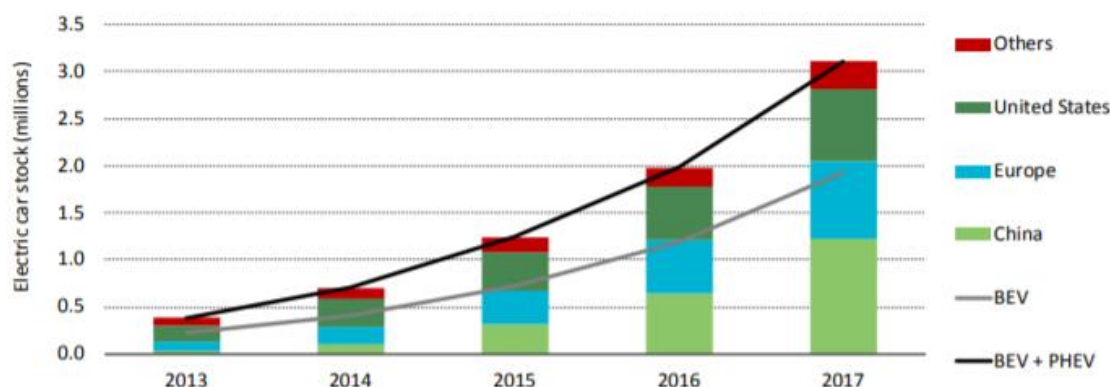
On peut noter que la part de marché des BEV (par rapport au marché des VEH) sur le marché chinois est particulièrement élevée. De plus, cette part de marché progresse régulièrement (elle était de 60 % en 2014, elle dépasse les 80 % en 2017).

Aux Etats-Unis, la part de marché des BEV est d'environ 50 % avec de fortes variations au cours des dernières années (25 % en 2012, > 60 % en 2015 et 52,7 % en 2017), au gré des politiques incitatives.

En Europe il existe de fortes disparités d'un pays à l'autre en fonction des politiques incitatives : pour les BEV, 75 % en France, 45 % en Allemagne. En Norvège, après une prédominance des BEV en 2014 avec 90 %, les PdM se sont stabilisées au-dessus de 50 % de BEV en 2016 et 2017. Au Royaume uni, les PdM du BEV sont stables entre 25 et 30 %

A noter que l'IEA ne comptabilise pas les ventes de véhicules HEV. Ce marché n'est pourtant pas négligeable puisqu'il représente plus de 3 Millions d'unités en 2018 d'après AVICENNE ENERGY.

## Le parc mondial de VEH (BEV + PHEV) - ventes cumulées depuis 2005



**Fig 26** : Parc mondial des VEH (BEV et PHEV) - Source : IEA – EV Global Outlook 2018

La quantité totale de VEH fin 2017 (ventes cumulées dans le monde de BEV et PHEV depuis 2005) dépasse les 3 Millions d'unités.

Chine	1.23 Mi
Etats-Unis	0.76 Mi
Europe	0.82 Mi
Reste du Monde	0.3 Mi
TOTAL	3.14 Mi

Rq : Un an plus tard, fin 2018, ce stock dépasse les 5 Mi d'unités, les ventes en 2018 représentant 2,1 Mi d'unités

**Tab 13** : ventes cumulées de BEV + PHEV

La Chine seule compte près de 40 % du parc mondial.

Le marché chinois est de loin le plus dynamique, sa part du parc mondial va continuer à s'accroître dans les années à venir. Il existe une offre pléthorique sur le marché (multiples constructeurs et multiples modèles à des prix inférieurs aux constructeurs étrangers). En comparaison l'offre en Europe et aux Etats-Unis apparaît très faible.

### **4.2.2 Les bus électriques**

Les ventes mondiales de bus électriques ont atteint 100 000 unités en 2017 dont 85 % de BEV. Le parc mondial représente plus de 300 000 unités dont 99 % se trouve en Chine. On compte à peine 2100 bus électriques en Europe, USA et Japon.

Cette prédominance est liée à un très fort soutien public en Chine pour le développement du bus électrique. La forte urbanisation et le développement de villes nouvelles facilite également l'intégration des infrastructures de recharge dans l'espace public.

Le marché est logiquement dominé par les constructeurs chinois qui se sont développés sur leur marché domestique (principalement Yutong et BYD) et sont présents aujourd'hui à l'export. Il existe également quelques constructeurs européens (Volvo, Bolloré...) et un seul aux Etats Unis (Proterra).

La dynamique de développement des bus électriques va se poursuivre, tirée par le marché chinois. Même si les immatriculations augmentent en Europe, le marché reste quasiment atone hors de Chine

### **4.2.3 Autres équipements**

Dans ce segment, nous prenons comme référence les données communiquées par AVICENNE ENERGY (présentation congrès de Nice – Octobre 2018).

Nous regroupons 3 sous-segments étudiés en détail par AVICENNE ENERGIE : le stockage stationnaire et applications industrielles, les produits électroniques grands publics et un sous-segment « autres équipements » qui regroupe principalement applications médicales, outillage et deux-roues.

Le marché des batteries sur ces segments est exprimé en GWh : Il représente un total de 51,6 GWh de batteries Li-ion mises sur le marché en 2017.

Sur ce segment encore, les dynamiques de développement sont différentes en fonction des zones géographiques. Le stockage stationnaire et les applications industrielles devraient évoluer de manière comparable dans toutes les zones géographiques. En revanche le marché des produits électroniques grands publics est déjà à maturité aux Etats-Unis, en Europe et au Japon alors qu'il garde un fort potentiel en Chine. Enfin, la croissance du sous-segment « autres équipements » sera lui-aussi essentiellement tiré par l'Asie/ Pacifique et en particulier par la Chine (notamment par le marché des deux roues)

### **4.2.4 Conclusion sur l'état des lieux du marché des batteries Li-ion**

L'ensemble de ces éléments mettent en évidence une forte croissance du marché des batteries Li-ion qui se poursuivra (même si nos prévisions incluent un scénario moins optimiste que les analystes en ce qui concerne les VEH) mais aussi de fortes disparités géographiques sur les 3 segments principaux.

Pour les VEH, ces disparités se retrouvent au niveau des ventes de VEH ainsi que sur le mix BEV/PHEV.

Ces disparités en fonction des zones géographiques rendent peu pertinente une analyse à l'échelle mondiale. En effet, elles entraînent de fortes conséquences sur la localisation des volumes de batteries en fin de vie. Or nous devons considérer que le marché du recyclage des batteries Li-ion n'a pas vocation à être un marché mondialisé, ceci pour des questions de difficulté de transport (restriction des déchets de batteries Li-ion en transport maritime, contraintes réglementaires relative à l'exportation de déchets dangereux) et de cout.

La suite de l'analyse (prévisions de vente et prévisions de volume en fin de vie) sera donc différenciée en fonction de quatre zones géographiques : Chine, Etats-Unis, Europe et Japon qui concentrent près de 90 % des ventes des principaux marchés et donc, à terme 90 % des volumes de batteries en fin de vie (au regard de l'historique des marchés depuis 2005, nous considérons en effet que ces quatre zones continueront à concentrer l'écrasante majorité des volumes).

## 4.3 Scenarii d'évolution du marché des batteries Li-ion

### 4.3.1 *Discussion préliminaire sur le futur du marché des VEH*

#### 4.3.1.1 Les déterminants du marché des VEH

##### Les soutiens publics

Comme le mentionne l'IEA dans ses rapports annuels successifs (Global EV Outlook), l'évolution du marché mondial du véhicule électrique est fortement dépendante des politiques publiques.

Il est à souligner que les principaux marchés en volume (La Chine avec 580 000 VEH en 2017) et en taux de pénétration (La Norvège avec 39 % de PdM pour les VEH en 2017) correspondent aux pays ayant mis en œuvre les politiques de soutien les plus volontaristes. Ce sont également les fortes politiques de soutien qui ont permis un développement très important des bus électriques en Chine, contrairement au reste du monde.

On note encore que les 10 premiers pays sur le marché des VEH ont tous mis en œuvre des politiques de soutien. Ces pays concentrent près de 95 % des ventes.

Ces politiques de soutien consistent principalement à réduire l'écart de compétitivité entre VEH et ICE (véhicules à combustion thermique). En 2015, les estimations montrent qu'un BEV (véhicule tout électrique) doté d'une batterie de 35 KWh présente en moyenne un coût total de 10 000 USD supérieur à une voiture thermique comparable. La parité coût reste encore hors de portée même pour une utilisation de 20 000 km/an<sup>103</sup>.

Les politiques publiques de soutien se déploient sur plusieurs axes :

- Aide à l'achat : soutien financier à l'achat d'un véhicule électrique (En Norvège exemption de taxe à l'importation et de TVA), politique d'achat de VEH pour les administrations, les services et les transports publics,
- Avantages sur le coût d'usage : parkings gratuits, péages gratuits, (En Norvège gratuité des tunnels, traversées par ferry et possibilité d'emprunter les couloirs de bus),
- Quotas obligatoires de ventes (Chine, Californie),
- Quotas d'immatriculation (Chine),
- Investissement dans l'infrastructure de recharge pour faciliter l'usage,
- Adaptation du réseau de distribution électrique.

Le marché est très fortement dépendant de ces aides et notamment les aides à l'achat. (En Chine, le total des aides à l'achat couvre souvent la moitié du prix des VEH)<sup>104</sup>

Aux Pays-Bas à partir de 2015, au Danemark à partir de 2016 et à Hong-Kong à partir d'Avril 2017, on a pu mesurer les effets immédiats d'une baisse de ces soutiens. Le marché s'est littéralement effondré (Au Pays-Bas les ventes de VEH sont passées de 44 000 unités en 2015 à 11 000 en 2017 – de 4800 à 1000 au Danemark sur la même période. A Hong Kong, 3000 VEH étaient enregistrés en Mars 2017... 32 VEH sur les 8 mois suivants). Ces politiques de soutien à l'achat peuvent aussi influencer très fortement le mix entre BEV et PHEV.

---

<sup>103</sup> La course aux batteries électriques (Carole Mathieu – IFRI Juillet 2017)

<sup>104</sup> « Les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions » - France Stratégie – Mai 2018

On peut encore noter qu'alors que le taux de pénétration aux USA est à peine supérieur à 1%, il est de 10 % en Californie. Cet état absorbe à lui tout seul 50 % des ventes sur le marché américain (pour 12 % de la population) en proposant en particulier un soutien à l'achat très volontariste en complément de la prime fédérale de 7500 USD (limitée aux 200 000 premiers véhicules vendus aux Etats-Unis par un constructeur)

### **L'infrastructure de recharge**

Le développement de l'infrastructure de recharge suit la croissance du parc de VEH. Dans le monde, on estime à environ 3 Millions, le nombre de bornes de recharges privées situées en résidences ou sur des lieux de travail. Dont 366 000 destinées à la recharge des batteries de flottes de véhicules professionnels, principalement des bus, et situées pour la quasi-totalité en Chine.

Ce réseau est complété par un réseau de 320 000 bornes publiques à charge lente et 110 000 points de recharge rapide. Les dispositifs de charge rapides sont particulièrement importants dans les zones densément peuplées (du fait d'une faible disponibilité foncière) et aussi le long des grands axes pour faciliter les trajets longue distance.

En Norvège comme en Californie, la diffusion du véhicule électrique est favorisée par la structure individuelle de l'habitat, qui permet de recharger son véhicule à domicile. Au contraire, la rareté de l'espace est un frein au développement du VEH à Tokyo : 60 % de sa population réside en logements collectifs, alors que 90 % des propriétaires de véhicules électriques vivent dans des maisons individuelles. Dans les villes où le logement collectif représente une forte part de l'habitat, le développement du VEH n'est possible que si des points de recharge en nombre suffisant sont installés dans les parkings ou garages de ces logements ou sur l'espace public à proximité.

Le cout d'une borne de recharge publique varie de 3 à 4000 € pour une borne de recharge lente et jusqu'à 40 000 € pour des bornes de recharge rapide.

Le cout du déploiement de l'infrastructure est supporté à la fois par des investisseurs privés (les constructeurs automobile, les acteurs du réseau électrique) et publics (état, collectivités). L'Union Européenne préconise 1 borne de recharge / 10 véhicules.

#### **4.3.1.2 Analyse critique des prévisions des analystes**

##### **Un excès d'optimisme récurrent**

De nombreuses agences proposent depuis plusieurs années des projections sur le marché des VEH. BNEF (Bloomberg New Energy Finance), AVICENNE ENERGY, le BCG (Boston Consulting Group), l'IEA (International Energy Agency), sont parmi les plus connues et reconnues à l'échelle mondiale pour les prévisions du secteur.

Il est intéressant de reprendre une très bonne étude réalisée par le BCG (Boston Consulting Group) et publiée en 2010<sup>105</sup>. Cette étude envisageait trois scénarii avec différents taux de pénétration du VEH sur un marché total anticipé de 54 Mi de véhicules en 2020 :

- Accélération = 42 % (soit 22,5 Mi de VEH)
- Stable = 26 % (soit 14 Mi de VEH)
- Ralentissement = 11 % (soit 6 Mi de VEH)

---

<sup>105</sup> Batteries for Electric Cars, Challenges, Opportunities and the outlook to 2020 – BCG  
<https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>

On constate aujourd'hui que c'est le scénario du ralentissement qui l'a emporté par rapport à la dynamique anticipée. Ceci est vrai si l'on considère le nombre de VEH... et encore plus si l'on considère le taux de pénétration. Dans ce dernier cas, la réalité est très en deçà du scénario le plus défavorable du fait d'une mauvaise évaluation de la croissance globale du marché des véhicules qui est déjà > 90 Mi alors que le BCG l'estimait à 55 Mi.

Lorsqu'on relit le rapport de l'IEA (International Energy Agency) publié en Avril 2013, on note que les prévisions de ventes s'établissaient à 2,5 Mi de VEH pour 2017 (données réelles = 1,15 Mi) et plus de 3 Mi pour 2018 (Données réelles 2,1 Mi). Avec un stock de plus de 10 Mi d'unités en 2018 (données réelles 5 Mi d'unités à fin 2018). Là encore la réalité s'avère inférieure aux prévisions.

De manière générale, les projections réalisées au cours des années précédentes s'avèrent souvent optimistes.

### **Le prix et la compétitivité par rapport aux ICE (véhicules à combustion thermique)**

Le dynamisme du marché ne pourra continuer que si la rentabilité des VEH s'améliore, le coût de fabrication des batteries (qui représente en moyenne 1/3 du coût total) doit donc encore baisser.

Le seuil de rentabilité reste difficile à prévoir (il dépend de l'évolution du coût des carburants, du prix de l'électricité, d'une éventuelle seconde vie qui permet de partager les coûts entre utilisateurs primaires et secondaires... etc). Cependant, il est généralement estimé à 100 USD / KWh. Or en 2018, il est encore deux fois supérieur, alors que les marges d'amélioration diminuent et que les fabricants de batteries ne réalisent toujours pas les bénéfices qui permettraient un retour sur des investissements déjà très lourds. A titre d'exemple, Tesla a perdu 1,4 Milliards de dollars en 2017 et encore 1 Milliard en 2018... le T4 2018 est son premier trimestre bénéficiaire avec 139 Mi de dollars sur un CA de 21,5 Milliards de dollars et un positionnement haut de gamme.

Il semble peu probable que le prix des VEH vienne concurrencer celui des ICE à court terme. Or, le manque de compétitivité des VEH, malgré les soutiens publics ne permet pas de pénétrer un marché de masse.

### **Un marché qui reste encore une niche**

Les ventes 2018 par modèles de véhicules<sup>106</sup> montrent que parmi les modèles les plus vendus (en dehors de la chinoise BAIC EC-Series qui arrive en deuxième position avec un prix de 25 000 USD avant subventions) on retrouve essentiellement des modèles haut de gamme (les 3 modèles TESLA commercialisés entre 60 et 90 k€ s'arrogent 12 % du marché mondial).

Il apparaît que le VEH touche essentiellement une population très urbaine et/ou à haut revenu. Par exemple, alors que le taux de pénétration en Chine est de 2 % environ, il est de plus de 10 % sur Shanghai et Pékin. Aux Etats Unis, la ville de Los Angeles concentre 20 % des ventes américaines en 2017 (100 000 VEH en ventes cumulées entre 2011 et 2016)<sup>107</sup>

C'est donc un marché de niche qui touche peu les classes moyennes, seules aptes à en faire un marché de masse.

Le cas de la France montre que les ménages à revenus modestes ayant un besoin de transport important (notamment pour les trajets pendulaires vers les zones urbaines qui concentrent les emplois) n'ont souvent pas la capacité d'acheter un VEH neuf, malgré les aides gouvernementales. L'augmentation des taxes sur le carburant qui a déclenché des mouvements sociaux en Novembre

---

<sup>106</sup> Voir sur <https://www.automobile-propre.com/la-tesla-model-3-a-ete-la-voiture-electrique-la-plus-vendue-au-monde-en-2018/>

<sup>107</sup> « Les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions » - France Stratégie – Mai 2018



2018 a mis en lumière une certaine impasse économique dans laquelle se retrouvent ces ménages concernant leur mobilité.

### **Des limites budgétaires**

En attendant que les prix de vente des VEH soient compétitifs, les soutiens publics à l'achat et au développement de l'infrastructure sont indispensables. Or ces soutiens sont couteux.

En France par exemple, pour respecter les engagements du contrat stratégique de filière<sup>108</sup> qui prévoit 1 Mi de VEH vendus (ventes cumulées depuis 2005) sur le marché en 2022, le cout pour les finances publiques (avec un bonus écologique de 6000 €) serait de plus de 6 Milliards d'€ sans compter le déploiement de l'infrastructure de recharge (15 000 bornes par an) et les aides à la conversion du secteur industriel (réseaux électriques, construction automobile).

Pour rappel, en 2016 le bonus écologique (et « super bonus » pour soutien à la conversion écologique) a couté près de 240 Mi d'€ à l'état pour 29 500 unités vendues. Dès 2017, la cour des comptes s'interrogeait sur la soutenabilité budgétaire d'un tel dispositif... D'autant plus que le développement des VEH prive par ailleurs l'état de recettes sur les taxes au carburant, générant un effet ciseau. Il n'est pas sûr qu'en France et plus généralement en Europe, les politiques d'austérité budgétaire permettent de respecter de tels engagements.

### **Le bénéfice environnemental et la limitation des émissions de CO<sub>2</sub> en question**

Diverses études d'Analyse de Cycle de Vie (l'ADEME en 2013<sup>109</sup>, Le centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services - CIRAIG - au Québec en 2016<sup>110</sup>, l'Agence Européenne pour l'Environnement en 2018<sup>111</sup>) montrent que l'avantage environnemental des VEH par rapport aux ICE n'est pas systématique, il est fortement dépendant du mode de production de l'électricité. Or la production électrique mondiale reste dominée par les énergies fossiles (Charbon 40 % et Gaz 25 %)<sup>112</sup> et le restera (prévision 2040 : Charbon 30 % et Gaz 25 %)

Déjà en 2008, l'IEA avait calculé qu'une voiture électrique émettait 112 g CO<sub>2</sub>/km avec le mix électrique moyen européen, mais 225 g CO<sub>2</sub>/km lorsque l'électricité était produite à partir de charbon.

L'objectif Européen (qui reste à confirmer) de limiter les émissions locales à 95 g CO<sub>2</sub>/km pour les véhicules thermiques neufs en 2020 (et 60 g CO<sub>2</sub>/km en 2030) sera difficile à atteindre et a pour effet d'encourager le développement des véhicules électriques. (Luc Chatel, Président de PFA – La Plateforme Automobile – déclare le 22/01/2019 : *Nous devons alors avoir 1/3 de véhicules en 100 % électrique, 1/3 de véhicules hybrides rechargeables et le reste en moteurs thermiques...* ce qui veut dire passer de 400 000 à 10 Mi de VEH en 10 ans en Europe.).

Cependant, cette logique de réduction drastiques des émissions locales de CO<sub>2</sub> pour les véhicules en Europe ne contribue plus à une baisse globale des émissions. Cette logique est-elle pertinente, dès lors qu'elle a pour effet de déplacer les émissions sur d'autres zones géographiques et d'autres maillons du cycle de vie ? (75% des émissions de CO<sub>2</sub> sont émis lors de la fabrication d'un VEH dont une grande partie lors de la phase d'extraction des métaux et notamment ceux qui constituent la batteries).

---

<sup>108</sup> <https://www.pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2018/06/DP-SCF-Automobile.pdf>

<sup>109</sup> [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511\\_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf)

<sup>110</sup> <http://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf>

<sup>111</sup> <https://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2017-1/articles/vers-un-avenir-electrique>

<sup>112</sup> International Energy Outlook (US Energy Information Administration – Sept 2017) - [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)

## **Les intérêts industriels et stratégiques des constructeurs historiques**

Le secteur automobile est un secteur économique stratégique. En France l'industrie automobile emploie 800 000 salariés pour un CA de 155 Milliards d'€.

La Chine est à la pointe du secteur des VEH avec 50 % du marché mondial, de nombreux constructeurs chinois proposent une offre pléthorique et le pays domine largement le secteur de la fabrication des batteries. En outre, la Chine impose à tous les constructeurs écoulant plus de 30 000 voitures par an sur son territoire qu'au moins 10 % du total de leurs ventes soient des véhicules 100 % électriques ou hybrides.

En s'appuyant sur son marché local, la Chine a créé un appel d'air sans précédent pour le VEH. Nous avons vu précédemment que cette stratégie chinoise est guidée par la volonté de réduire les émissions locales de particules fines mais aussi de se tailler une place prépondérante sur le marché mondial de la construction automobile, en cohérence avec la taille de son marché qui représente aujourd'hui 30 % du marché mondial des véhicules légers (cette place qu'elle n'a jamais pu conquérir jusqu'ici malgré les politiques contraignantes de joint-venture pour acquérir les savoir-faire et technologies des leaders du marché mondial).

Dans le reste du monde, les constructeurs historiques (Européens, Américains, Japonais) semblent suivre le mouvement sans enthousiasme. Ils proposent encore peu de modèles... Quel serait leur intérêt stratégique si le développement des VEH devait affaiblir leur position sur le marché mondial en favorisant l'émergence de champions chinois et en accroissant leur dépendance vis-à-vis des constructeurs chinois de batteries ? ... Surtout si le gain environnemental n'est pas au rendez-vous.

Aujourd'hui, parmi les constructeurs historiques, seuls Nissan et Renault apparaissent dans le Top 10 des fabricants de BEV dans le monde (en nombre d'unités vendues).

Il est intéressant de constater que parmi les constructeurs européens, Volvo est un des rares qui s'engage totalement sur le VEH... or Volvo est une entreprise à capitaux chinois depuis son rachat par le groupe GEELY en 2010.

## **L'adaptation nécessaire du réseau de distribution électrique**

L'augmentation importante du parc de VEH impacte également le réseau de distribution électrique. Avec l'appel de puissance qu'elle génère, la recharge des batteries pourrait notamment entraîner des problèmes sur le réseau électrique dans certaines zones géographiques (zone urbaines) ou à certaines périodes de la journée. En particulier si les bornes de recharge rapides se multiplient.

### **Repères sur les puissances des bornes de recharge :**

- Recharge lente 3 KW
- Recharge accélérée 20 à 45 KW (En France près de 50 % des 23 000 bornes publiques de recharge sur le territoire début 2019)
- Recharge rapide > 50 KW (6 % des bornes publiques en France)
- Recharge ultra-rapide : Le constructeur DBT annonce en 2016 le déploiement de bornes universelles de 150 KW – Un consortium de constructeurs allemands travaille sur un projet de réseau de bornes à 350 KW

Avec une borne de recharge lente, il faut 16 h pour recharger une batterie de 50 kWh.

Les recharges très rapides répétées sont déconseillées car elles accélèrent le vieillissement des batteries. On peut considérer qu'une batterie peut se charger sans dommage jusqu'à 80 % à une puissance égale à deux fois sa capacité (charge à 2C) ... soit un temps de recharge de 24 minutes.

## Le cas de la France<sup>113</sup>

Selon les projections d'ENEDIS, l'arrivée d'un million de véhicules électriques sur les routes (objectif 2023) génèrent une demande additionnelle d'électricité de l'ordre de 500 MW. Répartie sur l'ensemble du territoire, cet impact est relativement faible (sur un total de 100 GW installés actuellement).

Mais en matière de puissance, ENEDIS<sup>114</sup> mentionne qu'un million de VEH qui rechargeraient leurs batteries simultanément, représenterait un appel de puissance de 22 à 40 GW, soit 22 et 40% de la puissance totale installée. (Pour des scénarios respectifs de recharge 100% accélérée et 100% rapide)

Même si ce scénario est improbable (car les actions de recharge ne seront pas toutes simultanées), il est évident que l'accroissement du parc des VEH engendre une augmentation certaine des pics de consommation. Et en particulier dans les zones urbanisées et à des heures de pointe. Or le renforcement de la production de pointe est à la fois coûteux et fortement émetteur de CO<sub>2</sub> (l'appoint se fait principalement par le démarrage de centrales au fioul lourd).

Les solutions sont donc de limiter les recharges rapides, par la nature de l'infrastructure de recharge elle-même (en limitant le nombre de bornes de recharge accélérée / rapide), et/ou par une politique tarifaire adaptée. Selon ENEDIS, onze plages horaires pourraient être envisagées demain avec une tarification spécifique.

Il faut également améliorer la gestion intelligente du réseau pour garantir la soutenabilité du réseau électrique déjà sous tension. (Intégration massive des énergies renouvelable, modulation de la charge en fonction de la puissance disponible, stockage...etc)

Au regard des échéances (1 Mi de VEH en 2023, 4,8 Mi en 2028 en France) on peut s'interroger sur la capacité du réseau à s'adapter dans les temps.

Mais surtout, la limitation d'accès à des solutions de recharge rapide rajoute des contraintes d'utilisation (disponibilité, tarifs) qui impacte à la fois le coût et la facilité d'usage des VEH, deux éléments déterminants pour l'adoption du VEH par les consommateurs.

### **4.3.1.3 Conclusions sur les prévisions des analystes**

La volonté de la Chine de poursuivre le déploiement d'une flotte électrique s'explique de manière cohérente et il est probable que ce marché continue à croître de manière dynamique. La Chine a la maîtrise des technologies nécessaires, un réel intérêt économique et stratégique ainsi que les moyens budgétaires de sa politique.

En revanche, à l'énumération des contraintes techniques et budgétaires (en particulier en Europe) et au regard du faible intérêt commercial et stratégique pour les constructeurs implantés sur les grands marchés historiques (Etats-Unis, Europe, Japon), on peut craindre que les analystes soient emportés par un excès d'optimisme. En effet, s'ils n'ignorent pas ces enjeux, ils ont tendance à minimiser ces freins au développement.

Les prévisions du marché proposées dans cette étude se baseront en grande partie sur celles d'AVICENNE ENERGY et celles de l'IEA avec un certain nombre d'ajustements concernant le marché du VEH pour tenir compte de l'analyse critique ci-dessus. Pour les autres marchés, généralement plus

---

<sup>113</sup> Véhicules Electriques : En route vers une diffusion massive ? (Institut d'Emménagement et d'Urbanismes IDF – Juin 2016)

<sup>114</sup> Voir « La mobilité électrique : en route vers la transition énergétique » - ENEDIS

matures l'évolution est plus consensuelle car plus prévisible aussi bien sur les volumes que sur les technologies utilisées

### 4.3.2 Prévisions du marché global des VEH

Historiquement, les scénarii de L'IEA et d'AVICENNE ENERGY restent les plus proches de la réalité, même s'ils sont plutôt optimistes. Celui d'AVICENNE ENERGY a l'avantage d'aborder le marché des VEH en 3 catégories : BEV, P-HEV et HEV alors que l'IEA ne prend pas en compte les HEV.

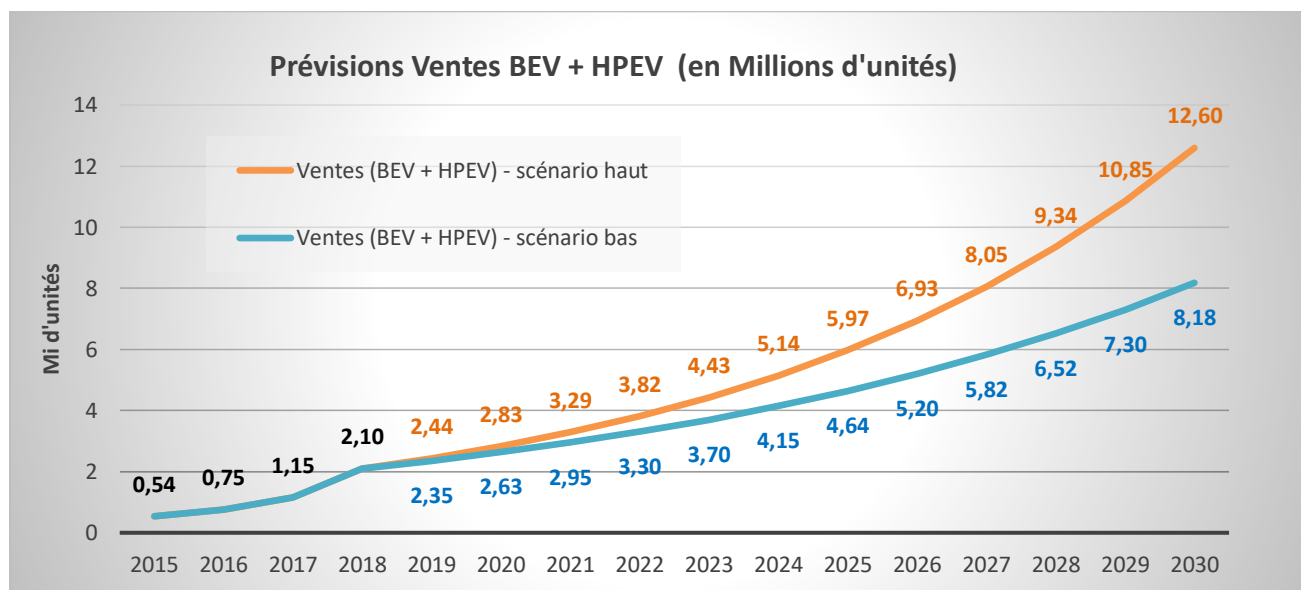
AVICENNE ENERGY prévoit :

- Ventes en 2025 : 6,2 Mi BEV + 1,6 Mi PHEV + 7,6 Mi de HEV
- Ventes en 2030 : 9,5 Mi BEV + 3,1 Mi PHEV + 12,5 Mi de HEV

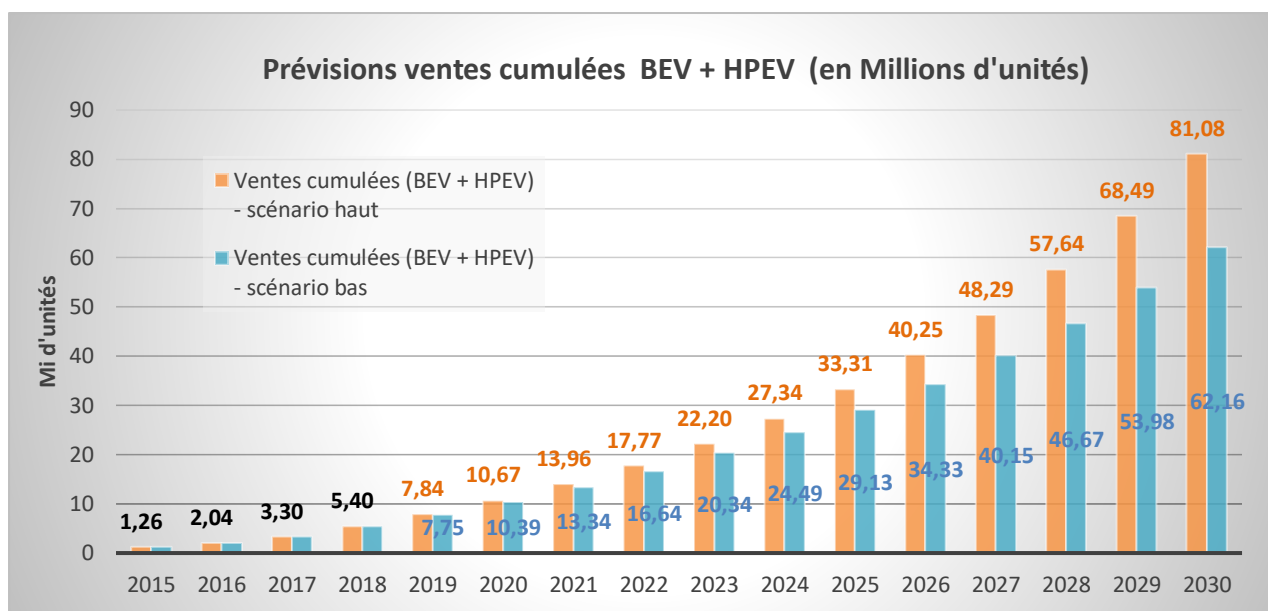
Nous prendrons en compte ce premier scénario (scénario « haut »), qui correspond à une croissance moyenne de 16 % par an sur la période 2019 – 2030 pour le marché des BEV et H-PEV

Nous étudierons également un second scénario (scénario « bas »), plus défavorable basé sur un taux de croissance du marché des BEV et H-PEV de 12 % par an en moyenne sur la période.

Dans les deux scénarii, les prévisions de vente des HEV restent identiques.



**Fig 26 :** Prévisions de ventes des BEV + PHEV dans le monde



**Fig 27 :** Prévisions de ventes cumulées des BEV + PHEV dans le monde

Les chiffres 2015 à 2018 sont connus et tirés des rapports de l'IAE (EV Outlook 2018 et estimations publiées pour les ventes en 2018)

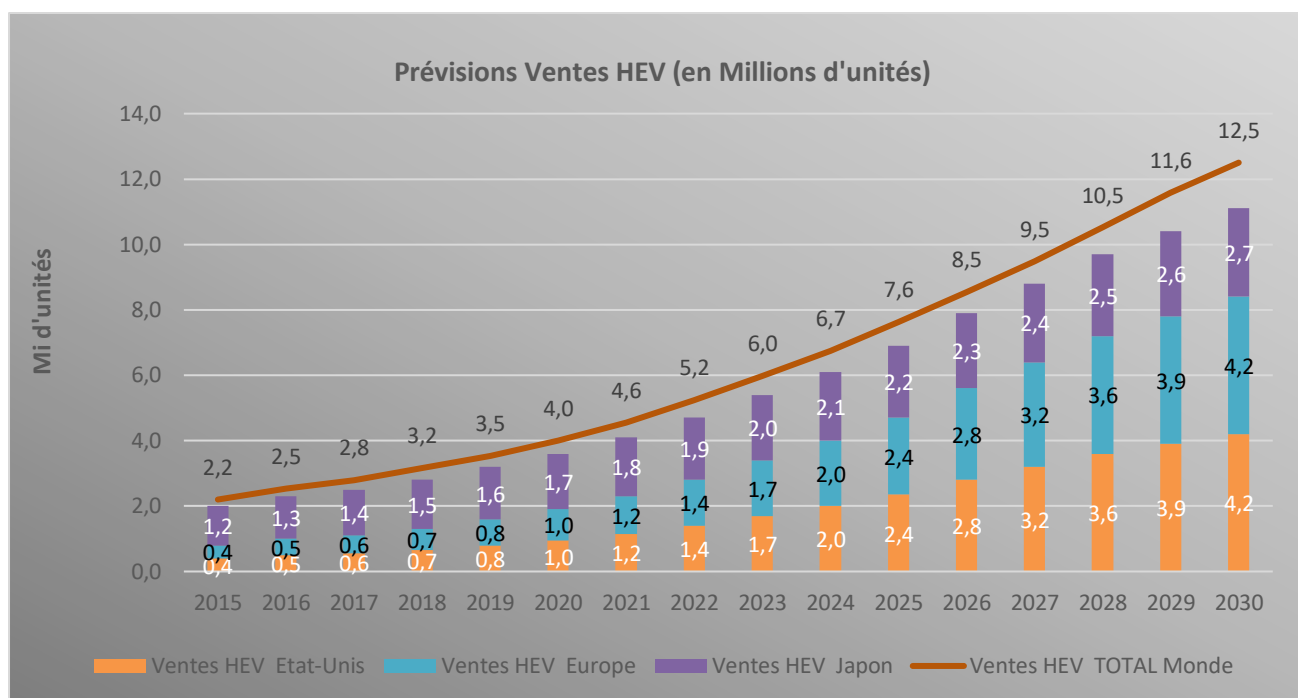
#### **4.3.2.1 Prévisions HEV**

Ce type de véhicule n'est pas vendu en Chine, il a un taux de pénétration très élevé au Japon où il représente 25 % de PdM en 2017 (par rapport au marché national des véhicules toutes technologies confondues), soit 1,4 Mi de HEV. Cette pénétration croissante depuis 2008 continuera sur le marché japonais sur la période 2019-2030.

A noter que Toyota reste le leader sur ce marché avec encore 2/3 des ventes mondiales en 2017.

Le reste des HEV se répartissent de manière identique en Europe et aux Etats-Unis avec une part de marché qui reste relativement faible.

Japon, Europe et Etats-Unis représentent 90 % du marché mondial.



**Fig 28 :** Prévisions de ventes cumulées des HEV dans le monde (par zones géographiques)

En 2017, les HEV sont encore équipés à 30 % de batteries Ni-MH. A partir de 2025, 100 % des véhicules seront équipés de batteries Li-ion.

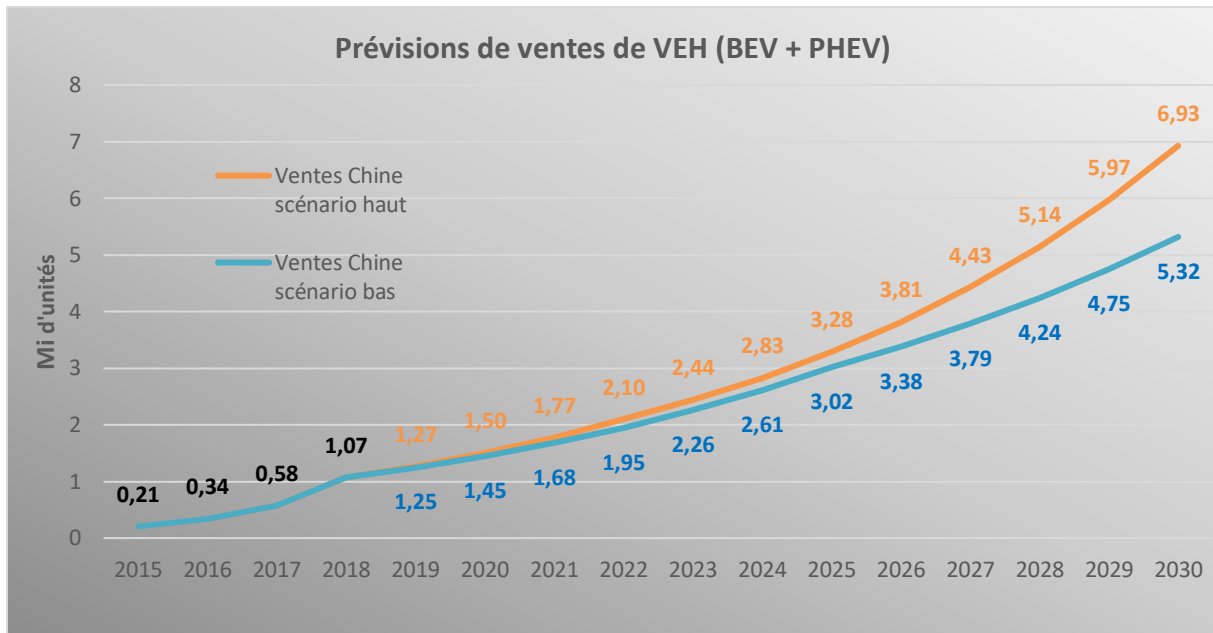
#### **4.3.2.2 Prévisions de vente de BEV et PHEV par zones géographiques**

Sur la période 2019-2030, le marché chinois du VEH (BEV + PHEV) restera dynamique du fait d'une continuité des politiques de soutien. Sa part de marché mondiale se stabilise à 55 % dans le scénario haut et à 65 % à partir de 2025 dans le scénario bas. En effet dans ce deuxième scénario la baisse de la croissance touche en premier lieu l'Europe et les Etats-Unis.

Les Etats-Unis seront impactés dans les deux scénarii en 2019 du fait de la fin de la prime fédérale (au T1 2018, Tesla avait déjà vendu 178 000 VEH aux États-Unis et General Motors 176 000 se rapprochant ainsi du seuil des 200 000 véhicules vendus au-delà duquel les aides fédérales s'arrêtent)

Dans les deux scénarii, la part de marché du reste du monde reste stable autour de 10 % (à partir de 2019) ainsi que celle du Japon (4 %).

## Chine



**Fig 29 :** Prévisions de ventes HEV + PHEV en Chine

De plus, le marché Chinois sera largement dominé par les BEV avec une part de marché qui évolue jusqu'à 90 % en 2024 et reste stable ensuite.

### Mix technologique <sup>115</sup>

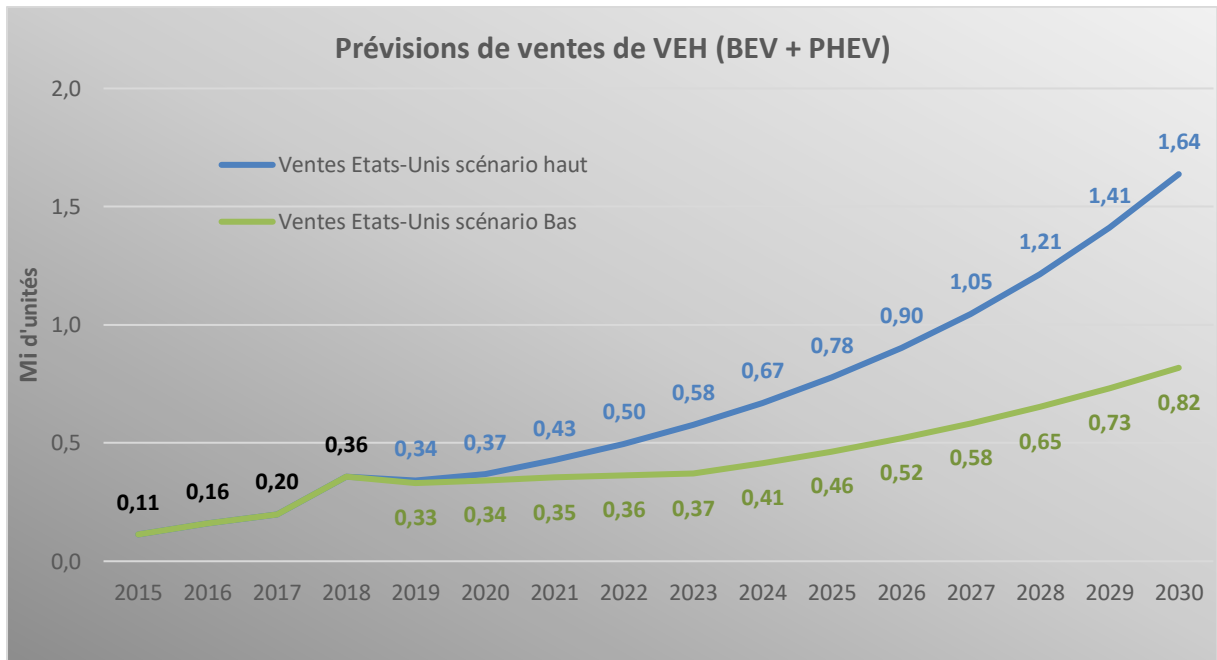
Nous considérons que les batteries de VEH (BEV + PHEV) utilisent jusqu'en 2015, 45 % de LFP et 55 % de NMC/NCA. Un basculement au détriment du LFP s'opère à partir de 2015 et se poursuivra pour aboutir à 5 % de LFP en 2030.

En effet, les fabricants chinois et notamment BYD (leader sur le marché) ont jusqu'ici utilisé des batteries LFP qui sont progressivement remplacées par la technologie NMC dans les nouveaux modèles. Ce remplacement devrait s'accélérer au cours des prochaines années du fait de la politique de soutien de la part du gouvernement chinois qui privilégie les batteries à fortes densités énergétiques (NMC / NCA) – (actuellement il n'y a plus de soutien financier en dessous de 105 Wh / kg, le seuil était de 90 Wh/kg en 2017)

Ces éléments nous permettront de calculer la quantité de batteries (en poids) mises sur le marché jusqu'en 2030 pour chaque scénario et en séparant la technologie LFP pour laquelle nous avons considéré que les flux de batteries en fin de vie étaient traités séparément des technologies NCA et NMC.

<sup>115</sup> <https://www.argusmedia.com/en/news/1816877-viewpoint-chinas-ev-battery-sector-may-face-reshuffle>

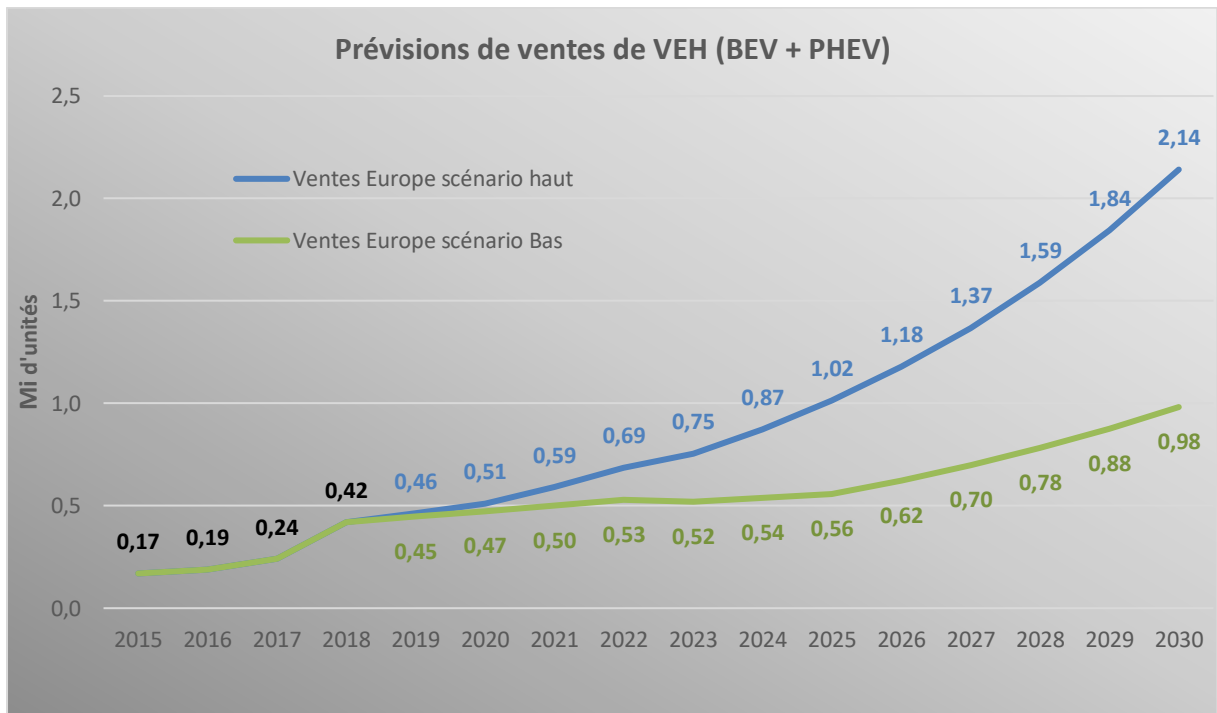
## Etats-Unis



**Fig 30 :** Prévisions de ventes HEV + PHEV aux Etats-Unis

Pour les Etats-Unis, les parts de marché entre BEV et PHEV restent équilibrées à partir de 2019 (50 %). On considère que la technologie LFP est négligeable.

## Europe

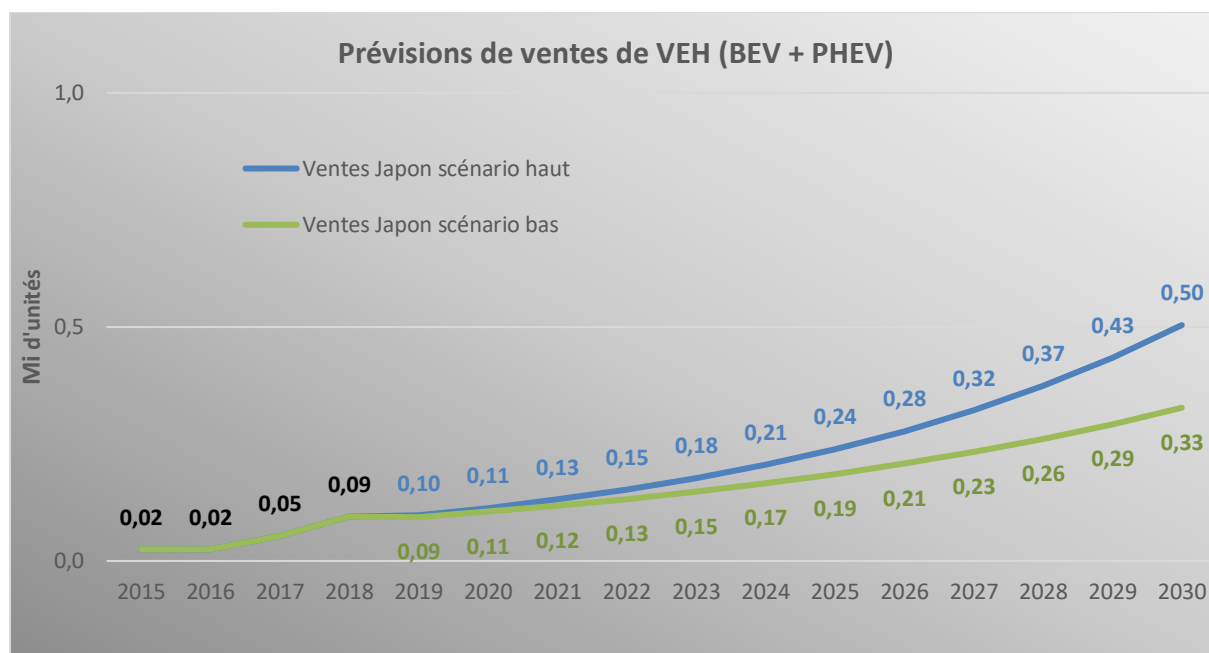


**Fig 31 :** Prévisions de ventes HEV + PHEV en Europe



Pour l'Europe les parts de marché entre BEV et PHEV restent équilibrées à partir de 2018 (50 %) à l'échelle du continent. On considère que la technologie LFP est négligeable.

### Japon



**Fig 32 :** Prévisions de ventes HEV + PHEV au Japon

Pour le Japon les parts de marché entre BEV et PHEV restent stables à 65 % de PHEV à partir de 2019. On considère que la technologie LFP est négligeable.

### **4.3.3 Prévisions du marché des bus électriques**

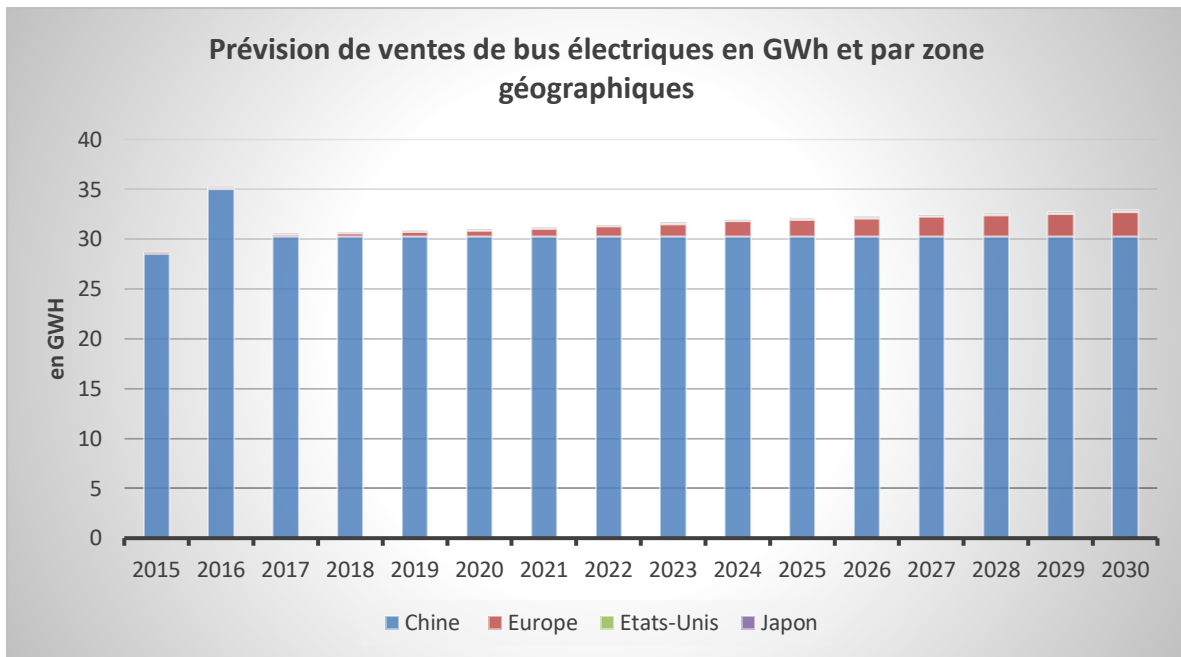
Fin 2017, la flotte mondiale est estimée par l'IEA à 370 000 unités, dont 100 000 bus mis sur le marché dans l'année. Mais ces données présentent des contradictions avec les rapports précédents de l'IEA (Global EV Outlook 2015, 2016, 2017)<sup>116</sup>.

Quoiqu'il en soit 99 % des bus électriques sont commercialisés en Chine, cette écrasante domination du marché Chinois se poursuivra au cours de la période 2019-2030.

A partir des données IEA, de France Stratégie et d'AVICENNE (exprimées en MWh), nous proposons une évolution du marché qui reste globalement cohérente avec l'historique (y compris avec les données réelles 2018 qui montrent que la totalité des batteries pour VEH et Bus électriques représentent autour de 100 GWh de batteries).

Enfin, nous considérons que les bus BEV représentent 85 % du marché (PHEV 15 %) et qu'ils embarquent en moyenne 350 kWh de batteries par bus (35 kWh pour les PHEV).

<sup>116</sup> Le rapport Global EV 2017 donnait une flotte de 345 000 bus électriques, ce qui n'est pas cohérent avec les données du rapport 2018.



**Fig 33 :** Prévisions de ventes de bus électriques dans le monde (par zones géographiques)

Pour la Chine, nous considérons que les bus électriques sont majoritairement équipés de batteries LFP avec une évolution progressive vers du NMC (10% NMC / 90 % LFP en 2015 et basculement progressif vers 50% NMC /50 % LFP ensuite). En effet, Compte tenu des moindres contraintes d'autonomie et de poids embarqué pour les bus, nous considérons que le LFP y conservera une place significative (contrairement au VEH)

Sur les autres zones géographiques, nous considérons que les batteries sont exclusivement de type NMC/NCA (bien qu'en réalité, ceci ne soit pas strictement exact – Bolloré utilise par exemple des batteries LMP ainsi que BYD qui a commercialisé des bus avec des batteries LFP). Mais au regard des volumes, cette approximation impacte peu les enjeux en matière de recyclage.

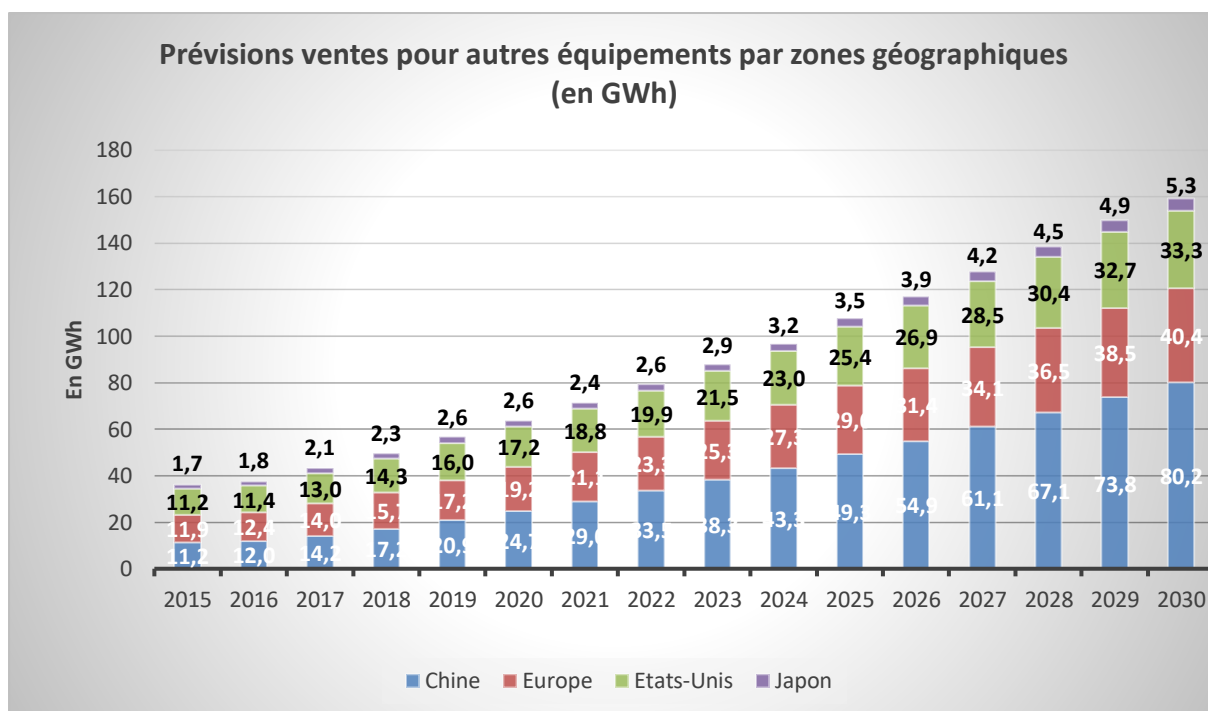
#### 4.3.4 Prévision du marché des autres équipements

Pour ces prévisions, nous prenons comme base les prévisions globales d'AVICENNE ENERGY soit :

- Stockage stationnaire et applications industrielles Monde : croissance de 3 GWh en 2015 à 23.7 GWh en 2025 et une progression de 15 % en moyenne entre 2025 et 2030.
- Produits électroniques grand public : croissance de 30.3 GWh en 2015 à 47.7 GWh à 2025 dans un contexte de baisse tendancielle du taux de croissance (du fait de la maturité de ce marché) qui aboutit à 51.6 GWh en 2030.
- Autres équipements (outillages, vélos électriques, équipements médicaux...) : croissance de 10.6 GWh en 2015 à 57.5 GWh en 2025 et 92.6 GWh en 2030 (ce sous-segment est principalement tiré par les vélos électriques)

Le marché Chinois sera le principal facteur de croissance et notamment sur les produits électroniques et les autres équipements.

On attribue des parts de marché (et leur évolution sur la période 2019-2030) par zones géographiques à ces trois sous-segments, on agglomère ensuite l'ensemble des résultats pour obtenir les prévisions ci-dessous



**Fig 34 :** Prévisions de ventes de batteries pour le segment « autres équipements » dans le monde (par zones géographiques)

#### **4.4 Scenarii d'évolution des volumes de batteries Li-ion en fin de vie et prévision du marché du recyclage**

##### **4.4.1 Rappel méthodologique**

Pour évaluer les volumes en fin de vie, nous proposons d'abord de :

- Calculer les équivalences de poids pour traduire le marché de vente des batteries en tonnes (alors qu'il est exprimé en Wh ou en unité pour les batteries de VEH).
- Attribuer les poids moyens de batteries en fonction de la technologie utilisée, du segment de marché et du type de VEH (au sein du segment VEH)
- Etablir un profil de fin de vie en fonction des durées de vie des batteries (sur chaque marché produit). Pour les VEH et bus électriques, nous proposons un scénario de durée de vie courte (6 à 8 ans, ce qui correspond aux garanties constructeurs) et un scénario de vie longue (10 à 12 ans ce qui correspond aux premiers retours d'expérience des constructeurs)
- Envisager deux scénarii pour la quantité de batteries de VEH (BEV) pouvant avoir une seconde vie.

##### **4.4.2 Equivalence entre capacité de stockage et poids moyen des batteries pour les VEH et Bus électriques**

Les prévisions de ventes sont établies en nombre d'unités pour les VEH et en GWh pour les autres catégories (Bus électriques et autres équipements) or le marché du recyclage est à estimer en poids.

Pour estimer le marché des batteries en poids, nous devons utiliser quelques équivalences. Nous nous basons en premier lieu sur les densités d'énergie moyenne des différentes technologies pour en déduire le poids moyen pour une capacité d'1KWh. Nous avons ensuite considéré que le poids total

des batteries (en intégrant le BMS notamment) était 50 % supérieur au poids des cellules (voir tableau ci-dessous). Cette approximation est vérifiée dans le tableau 15.

Types de batteries	Densité d'énergie (Wh/Kg)	Equivalent poids cellules en Kg pour une capacité d'1 KWh	Equivalent poids batteries complètes en Kg (BMS...etc) pour une capacité d'1KWh
LMO (Li-ion)	140	7,14	-
NCA (Li-ion)	240	4,17	6,26
LFP (Li-ion)	120	8,33	12,5
NMC (Li-ion)	200	5	7,5
Ni-MH	70	14,28	-

**Tab. 14** : Poids des technologies Li-ion et Ni-MH

Une vérification sur quelques modèles spécifiques (données concernant les capacités et le poids des batteries collectées sur les fiches techniques constructeurs) nous permet de vérifier que cette méthode donne une approximation correcte en ce qui concerne les technologies NCA et NMC.

Modèles BEV	Capacité de la batterie (en KWh)	Poids de la batterie (en Kg)	Poids par KWh	Technologie
Chevrolet Bolt	60	435	7,25	NMC
Nissan Leaf	30	250	8,33	NMC
Tesla modèle S	75	480	6,40	NCA
Tesla modèle S	100	600	6,00	NCA
BMW i3	35	230	6,57	NMC
Renault Zoe	41	300	7,32	NMC
Hyundai kona Electric	64	445	6,95	NMC

**Tab. 15** : Poids des batteries sur les principaux modèles de BEV

N'ayant pas de données techniques suffisantes concernant le poids des batteries sur les véhicules utilisant la technologie LFP, nous considérons cependant que le rapport de 50 % supérieur, pour le poids de la batteries complète par rapport au poids de cellules, vérifié pour les technologies NCA et NMC reste valide pour le LFP.

Considérant que dans le cas général, les installations de recyclage pour les batteries NCA et NMC sont les mêmes, il n'y a pas lieu de distinguer ces technologies. (En revanche, le LFP sera pris en compte de manière séparée).

Selon la typologie de véhicules on utilisera donc les poids moyens de batterie suivants :

- Pour NCA et NMC : 7 Kg / KWh en moyenne
- Pour LFP : 12,5 Kg/ KWh en moyenne

#### **4.4.3 Equivalence entre capacité de stockage et poids moyens des batteries pour les autres équipements**

Les autres équipements regroupent des types de batteries Li-ion assez diverses, du téléphone portable au stockage stationnaire.

Les technologies utilisées sont essentiellement LCO, LMO et NMC. La part du BMS dans le poids total n'est pas aussi important pour les batteries portables que pour les batteries de stockage stationnaire.

Ainsi, le poids des batteries par kWh peut varier entre un peu plus de 5 Kg et 9 Kg par kWh. Nous retiendrons une moyenne de 7 Kg / kWh sur ce segment, toutes technologies Li-ion confondues.

#### 4.4.4 Durée de vie et profils de fin de vie

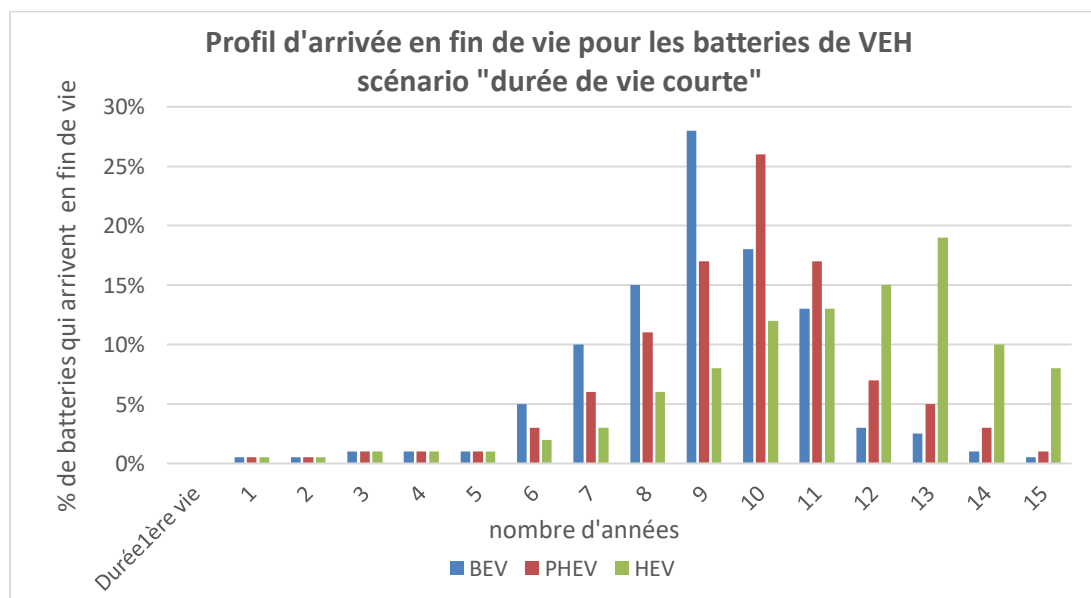
Pour évaluer les volumes effectifs de batteries en fin de vie, il est nécessaire d'évaluer des profils de durée de vie. Nous formulons ces hypothèses pour chacun des segments de marché.

Nous considérons que ces profils sont similaires sur toutes les zones géographiques.

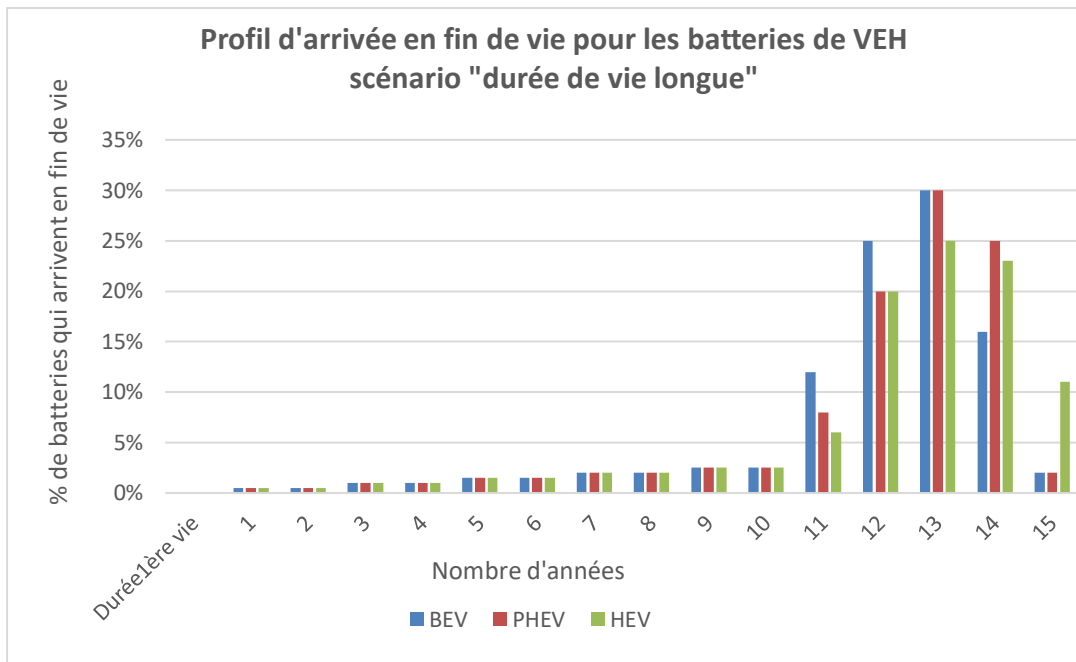
#### VEH

Les batteries de véhicules électriques peuvent avoir une durée de vie variable, en fonction de leur utilisation plus ou moins intensives et en fonction des modes de recharge adoptés.

Nous proposons deux scénarii. Le premier se base sur les durées de garantie proposées par les constructeurs en ce qui concerne les BEV qui s'étalent entre 6 et 8 ans (et/ou pour 160 à 200 000 km). C'est un scénario de « durée de vie courte ». En effet, les premiers retours d'expérience de la part des constructeurs semblent indiquer que la durée de vie effective des batteries aurait été nettement sous-estimée. Pour en tenir compte, nous étudions un deuxième scénario de « durée de vie longue » estimée entre 10 et 12 ans.



**Fig 35 :** Profils de fin de vie des batteries de VEH – scénario « durée de vie courte »



**Fig 36 :** Profils de fin de vie des batteries de VEH – scénario « durée de vie longue »

Avant que les batteries aient atteint leur durée de vie prévue (6 à 8 ans ou 10 à 12 ans selon le scénario), les quantités arrivées en fin de première vie sont minimales (il s'agit des batteries défectueuses, accidents...etc)

Dans le scénario « durée de vie courte », c'est entre la 7<sup>ème</sup> et la 11<sup>ème</sup> année que les batteries arrivent en fin de vie pour leur grande majorité. Le reste arrive plus tard, soit parce que la batterie elle-même conserve des performances suffisantes (du fait d'une utilisation optimisée) ou parce que le BEV, lui-même ne revient pas vers un centre de recyclage immédiatement après sa fin d'utilisation réelle.

Dans le scénario « durée de vie longue, les batteries arrivent en majorité en fin de vie entre la 11<sup>ème</sup> et la 14<sup>ème</sup> année.

Les PHEV et le HEV ont un profil de durée de vie plus allongé car on peut penser que ces véhicules continueront à être utilisés par un certain nombre de leur propriétaire même après que la batterie soit déficiente. Ce décalage est plus marqué dans le scénario « durée de vie courte ».

Dans tous les cas, on considère qu'au bout de 15 ans, la totalité des batteries de VEH sont arrivés en fin de vie et sont captés par une filière de recyclage.

### **Bus électriques**

Concernant les bus électriques, on prendra un profil de vie équivalent à celui des véhicules légers, en intégrant également les deux scénarii de durée de vie.

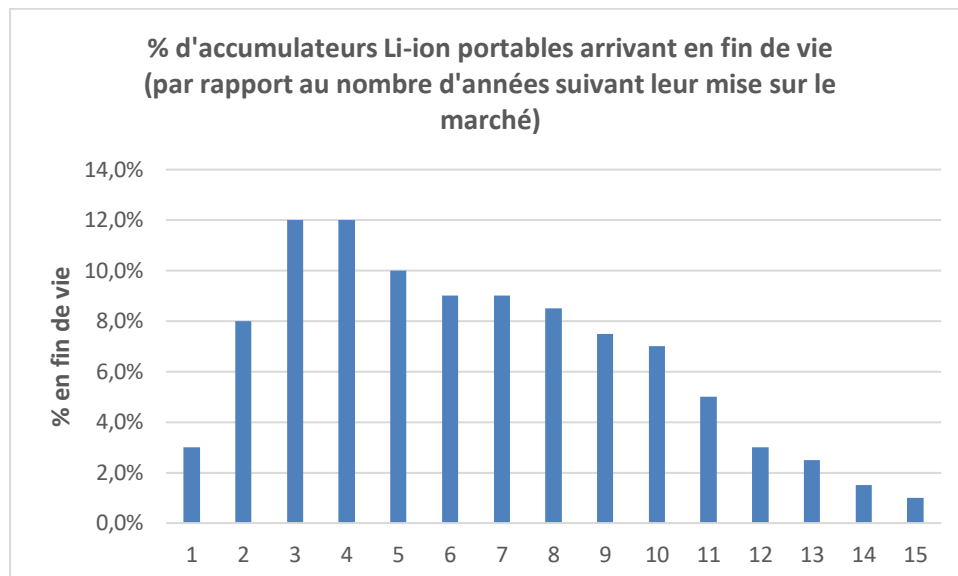
### **Autres équipements**

Concernant les autres équipements, les profils de vie sont différents en fonction des sous-segments :

Pour les batteries de stockage stationnaires et d'équipements industriels, nous prenons un profil identique à celui des BEV.

Pour les produits électroniques grands publics, qui ont des durées de vie plus courtes, nous nous basons sur les travaux d'EUCOBAT qui a étudié (pour la filière européenne des accumulateurs portables) l'arrivée en fin de vie des accumulateurs Li-ion mis sur le marché.

Nous considérons enfin que les « autres équipements » (médical, outillage, deux-roues) ont un profil de vie similaire aux produits électroniques grands publics.



**Fig 37 :** Profils de fin de vie des batteries pour la catégorie « autres équipements »

Cependant, l'expérience de la filière acquise en Europe démontre que les tonnages en entrée des sites de recyclage ne correspondent pas au tonnage théorique de batteries en fin de vie. En réalité, une partie importante des batteries ne sont pas disponibles pour la collecte, pour différentes raisons (conservation par l'utilisateur des batteries usagées, exportations illégales ou non, élimination dans des filières non conformes, etc...).

La montée en puissance des systèmes de collecte se fait toujours de manière progressive. Par exemple, le partenariat entre Corepile et l'Union Sports et Cycles fin 2017 a permis de capter environ 15 000 batteries (40 T) de Vélos à Assistance Electrique (VAE), en 2018, ce qui correspond à 20 % des stocks annuels commercialisés durant la dernière décennie.

Pour ces autres équipements, nous apportons donc un coefficient rectificatif qui évolue en s'améliorant dans le temps (de 20 à 50 % de taux de collecte). En effet, on peut considérer que le taux de captage s'améliore avec l'ancienneté des filières (cette évolution est conforme à ce que nous constatons sur la filière des piles et accumulateurs portables en Europe).

NB : Pour les batteries de VEH et bus électriques, il nous semble cohérent d'envisager un taux de collecte de 100 % au regard de la prise en compte des enjeux (environnement, récupération des métaux) par les acteurs, et de la difficulté « d'égarer » des batteries de VEH en fin de vie dans d'autres flux de déchets (du fait de leur taille et leur poids).

#### **4.4.5 Potentiel de seconde vie**

Pour évaluer les volumes à recycler il faut encore prendre en compte le potentiel de réemploi qui permet de retarder la fin de vie des batteries.

On ne prend en compte que le potentiel de réemploi des batteries de véhicules légers type BEV. En effet, ce potentiel apparaît trop faible sur les autres VEH (y compris les bus électriques dont les batteries font l'objet d'une utilisation plus intensive) et autres segments de marché pour avoir un impact significatif.

Nous estimons que ce potentiel de réemploi est variable. En effet on peut considérer notamment que les batteries arrivées en fin de vie avant la fin de période de garantie ne sont pas réemployables (défectueuses, accidentées). De même au-delà d'une durée de vie trop longue, on estime que leur potentiel de réemploi s'amenuise.

Ainsi le plus gros potentiel de réemploi concerne des batteries de BEV arrivées en fin de première vie entre la 6<sup>ème</sup> et la 8<sup>ème</sup> année (pour un scénario « durée de vie courte ») et entre la 10<sup>ème</sup> et la 12<sup>ème</sup> année (pour un scénario « durée de vie longue », il décroît ensuite.

Sur cette base, on utilise deux scénarii additionnels de réemploi :

- Le premier optimise le réemploi qui concerne 50 % du gisement en fin de vie (après 6 à 8 ans ou 10 à 12 ans de première utilisation).
- Le deuxième ne valorise que 20 % des batteries en fin de première vie (après 6 à 8 ans ou 10 à 12 ans de première utilisation)

***POTENTIEL DE SECONDE VIE (ne concerne que les batteries de BEV légers)***

Durée de vie	Scénario 1 (optimisation du réemploi)	Scénario 2
< 6 ans	0%	0%
6 à 8 ans	50%	20%
9 ans	30%	10%
10 ans	10%	5%
> 10 ans	0%	0%

**Tab. 16** : Scénarii pour le % de réemploi des batteries de BEV (durée de vie 6 - 8 ans)

***POTENTIEL DE SECONDE VIE (ne concerne que les batteries de BEV légers)***

Durée de vie	Scénario 1 (optimisation du réemploi)	Scénario 2
< 10 ans	0%	0%
10 à 12 ans	50%	20%
13 ans	30%	10%
14 ans	10%	5%
> 14 ans	0%	0%

**Tab. 17** : Scénarii pour le % de réemploi des batteries de BEV (durée de vie 10 – 12 ans)



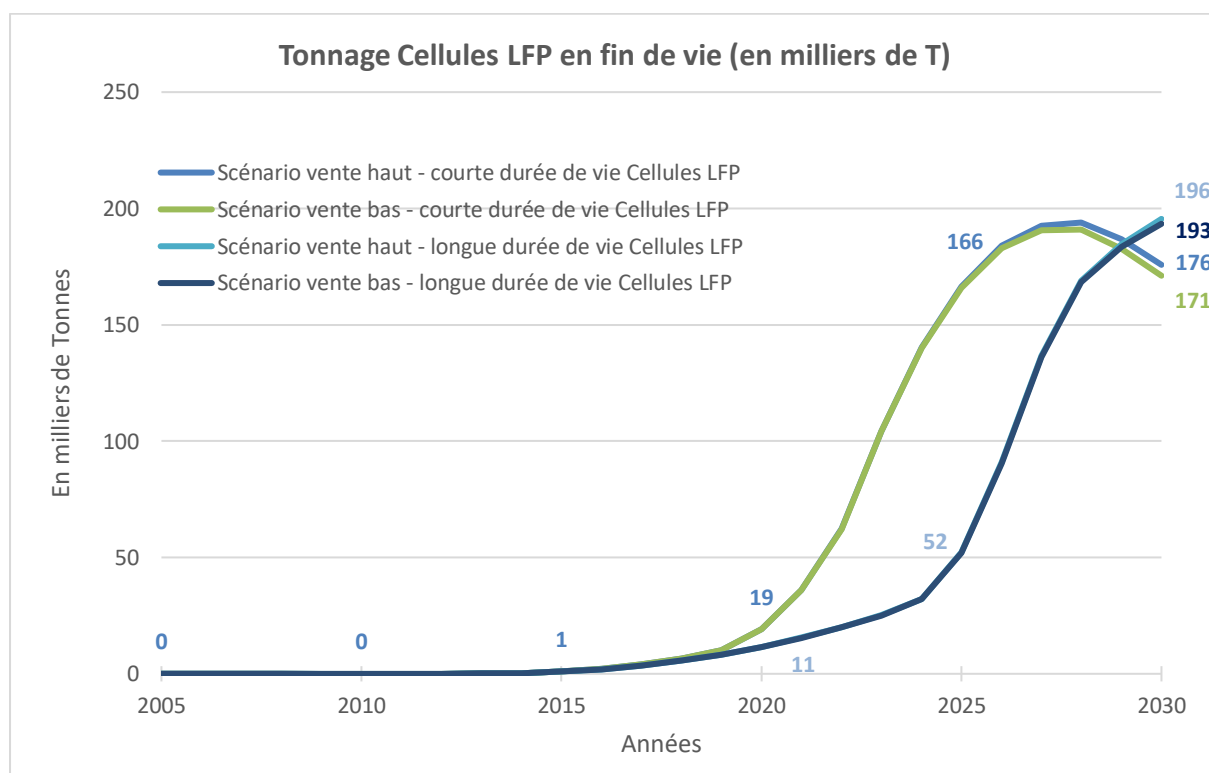
#### 4.4.6 Estimation des volumes de batteries Li-ion en fin de vie selon les zones géographiques

Après avoir pris en compte les hypothèses précédentes, nous évaluons les volumes de batteries Li-ion (avec un traitement séparé du LFP en ce qui concerne la Chine). Les tonnages représentés dans les graphiques ci-après ne prennent en compte que le poids des cellules (hors BMS et Casing).

Les volumes de batteries en fin de vie évalués par le calcul sont cohérents avec les chiffres connus sur la filière européenne en ce qui concerne les volumes traités. En effet, la compilation des données d'EUCOBAT<sup>117</sup> et celles du rapport d'évaluation de la filière européenne réalisé dans le cadre de la révision de la directive<sup>118</sup>, nous permet d'estimer à environ 10 200 T la quantité de batteries Li-ion effectivement recyclées en 2015. Nos travaux nous donnent une estimation de 14 900 T réellement disponibles pour la collecte pour la même année, en sachant que ce total intègre une partie de batteries Ni-MH<sup>119</sup>.

Pour chaque zone géographique, l'estimation des tonnages est proposée avant et après réemploi. En sachant que le réemploi reporte les volumes à recycler de 5 à 10 ans.

##### Chine



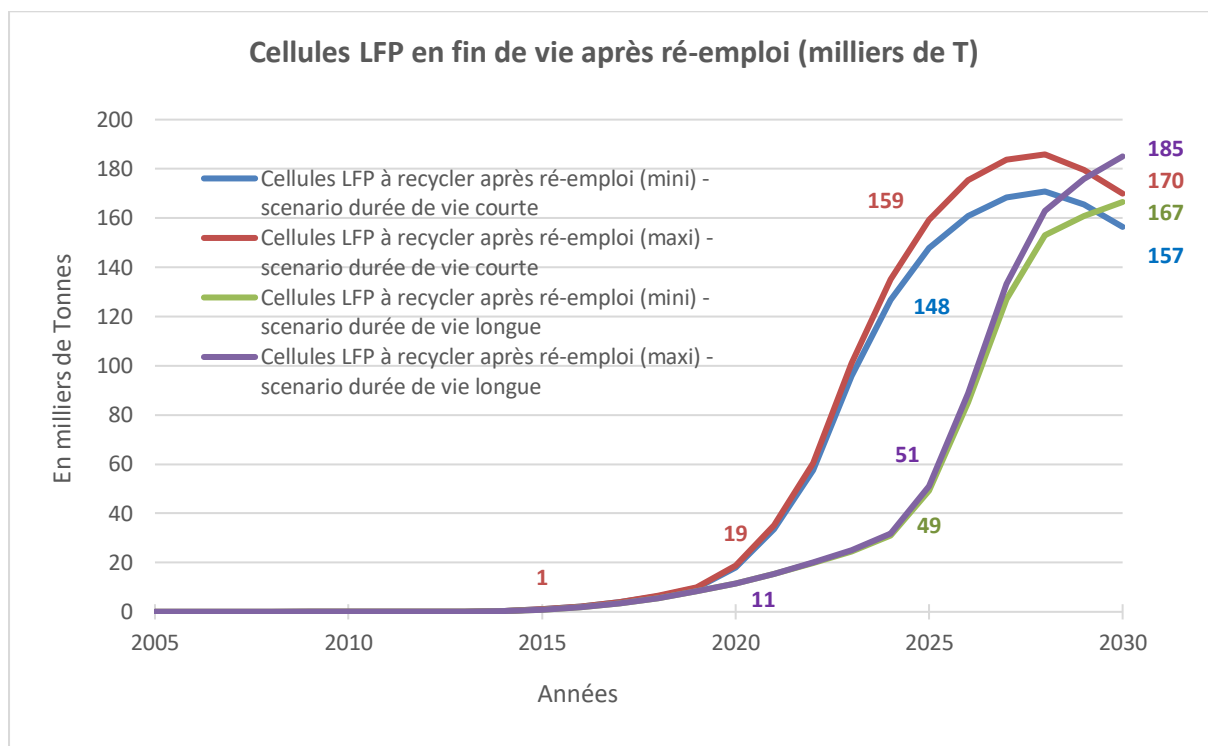
**Fig 38 :** Estimation des tonnages de cellules LFP en fin de vie en Chine

<sup>117</sup> En 2015, l'extrapolation des chiffres d'Eucobat permettent d'estimer à environ 6000 T la quantité de batteries Li-ion portables effectivement recyclée en Europe

<sup>118</sup> Final report : Study in Support of evaluation of the directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators - European Commission – DG Environment A.2. le 8 Octobre 2018

<sup>119</sup> Par exemple la Toyota PRIUS vendues à 1 Millions d'exemplaires utilise du Ni-MH et non du Li-ion, nous n'avons pas fait cette distinction. En effet une approche spécifique n'aurait pas modifié les tonnages estimés de manière suffisamment importante pour modifier les enjeux, d'autant plus que les batteries Ni-MH et Li-ion suivent dans de nombreux cas les mêmes procédés de recyclage.

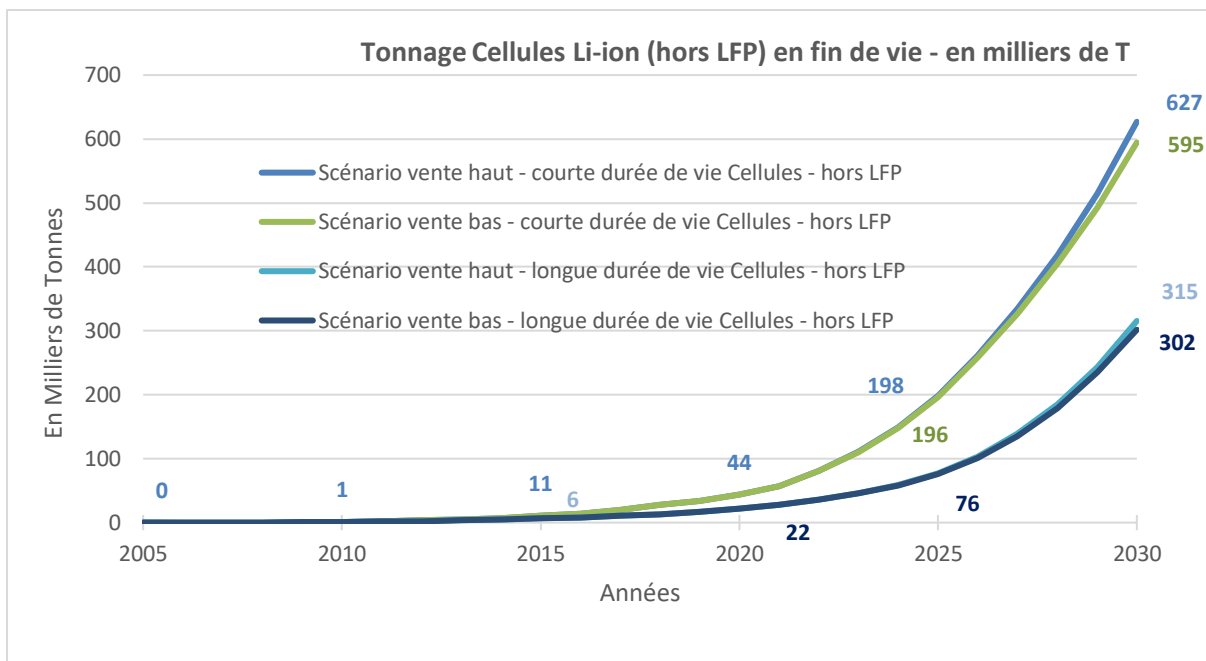
En 2020, c'est entre 11 000 T/an et 20 000 T/an de cellules de batteries LFP qui devront être recyclées en Chine en fonction de la durée de vie des batteries de VEH. Les volumes croissent rapidement une fois que les premiers VEH arrivent en fin de vie. L'allongement de la durée de vie a pour effet de décaler l'arrivée des volumes en fin de vie. Cependant, du fait d'une baisse de l'utilisation de la technologie LFP, le niveau des tonnages en fin de vie se rejoint, quels que soient les scénarii, autour de 180 000 T/ an en 2030.



**Fig 39 :** Estimation des tonnages de cellules LFP en fin de vie en Chine en considérant le réemploi

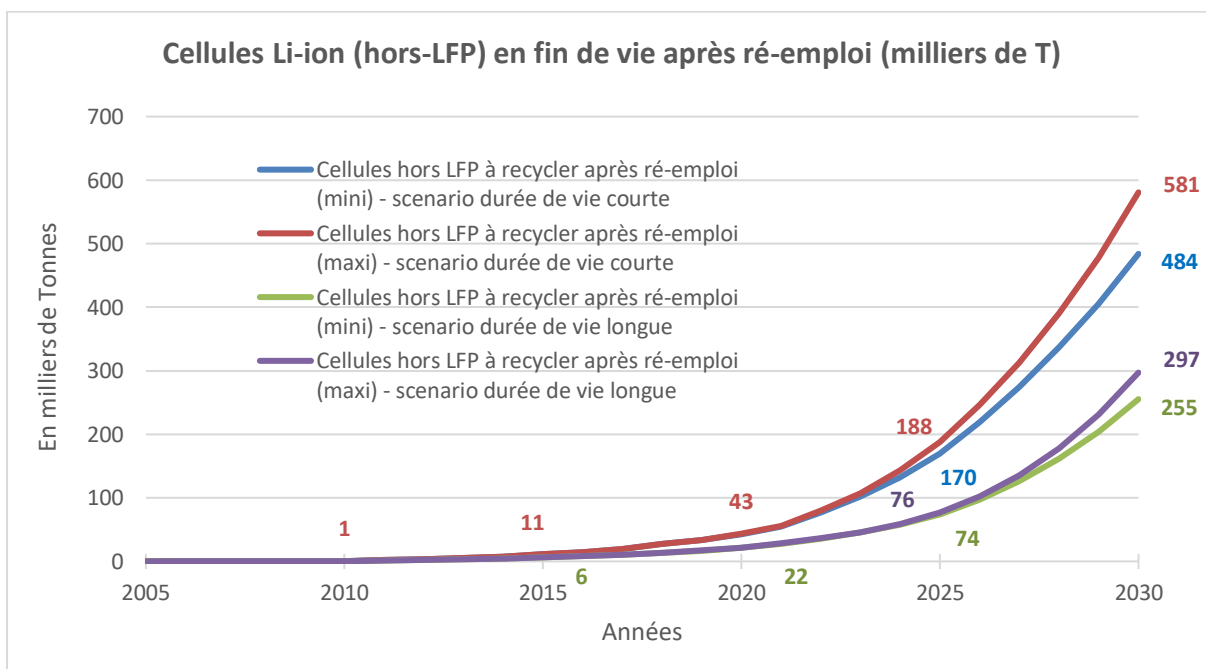
Une activité de réemploi, même performante, ne réduirait que de 15 000 tonnes/an au mieux les quantités à recycler entre 2025 et 2030.

**NB :** les scénarii de réemploi notés « mini » correspondent à un volume minimum de cellules à recycler (c'est-à-dire à un scénario d'optimisation du réemploi). A l'inverse, les scénarii de réemploi notés « maxi » correspondent à un volume maximum de cellules à recycler (c'est-à-dire un scénario de réemploi non optimal)



**Fig 40 :** Estimation des tonnages de cellules Li-ion (hors LFP) en fin de vie en Chine

Concernant les cellules Li-ion hors LFP, c'est entre 22 000 T/an et 44 000 T/an qui seront à recycler en 2020 en fonction de la durée de vie des batteries de VEH. Et entre 76 000 T/an et près de 200 000 T/an en 2025. A horizon 2030, une durée de vie plus longue entraîne une division par deux (à 300 000 T /an environ) des volumes à recycler.



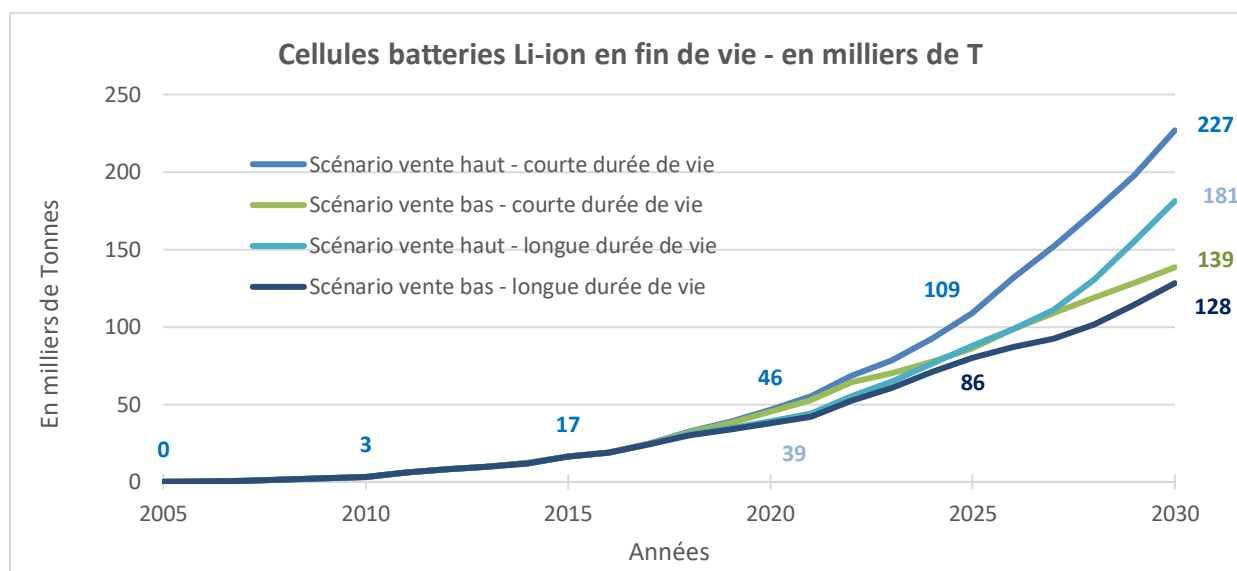
**Fig 41 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion (hors LFP) en fin de vie en Chine en considérant le réemploi

Même avec une activité de réemploi soutenue, l'impact sur les volumes à recycler reste faible sur la période étudiée (il est plus important dans le scénario « durée de vie courte » puisque l'arrivée plus

importante de batteries en fin de première vie dope les activités de réemploi). En réalité, l'impact du réemploi s'accroît au-delà de 2030.

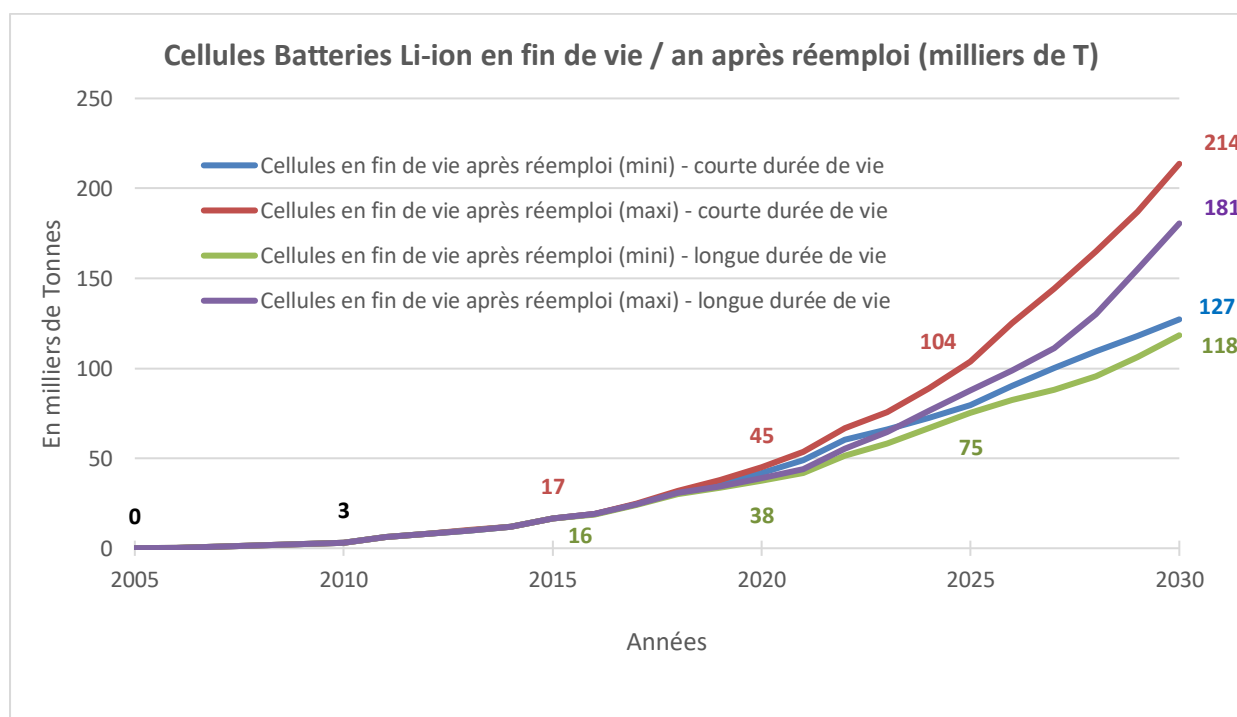
**NB :** les scénarii de réemploi notés « mini » correspondent à un volume minimum de cellules à recycler (c'est-à-dire à un scénario d'optimisation du réemploi). A l'inverse, les scénarii de réemploi notés « maxi » correspondent à un volume maximum de cellules à recycler (c'est-à-dire un scénario de réemploi non optimal)

### Etats-Unis



**Fig 42 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie aux Etats-Unis

Dès 2020, près entre 39 000 T et 45 000 T de cellules Li-ion arrivent chaque année en fin de vie. Entre 128 000 et 227 000 T en 2030 en fonction de la durée de vie des batteries de VEH.

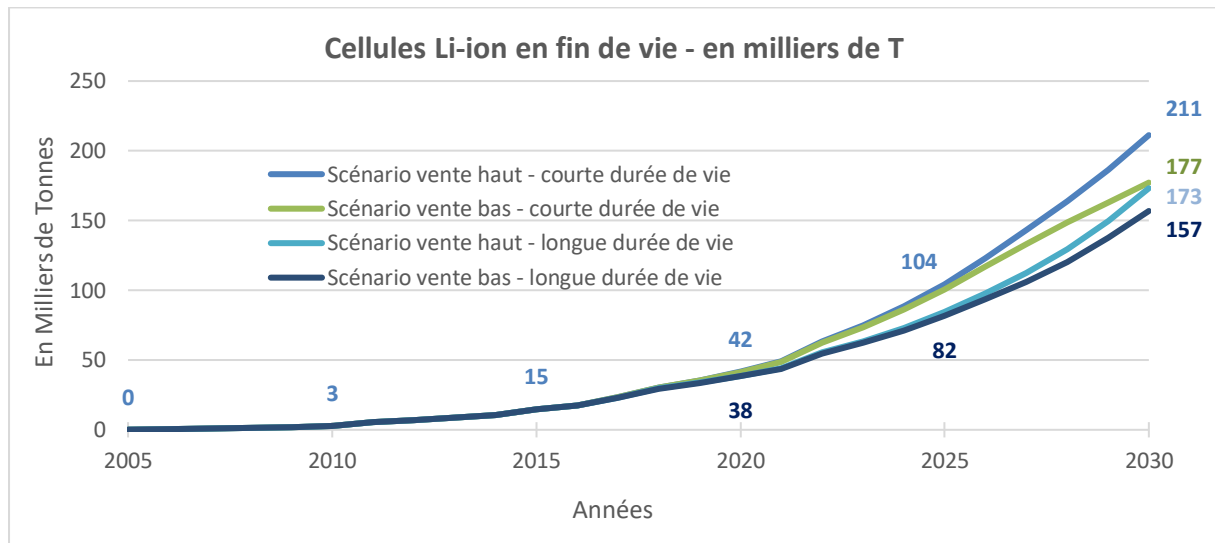


**Fig 43 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie aux Etats-Unis en prenant en compte le réemploi

Même dans le cas d'un fort taux de réemploi, c'est entre 75 000 T/an et 104 000 T/an en 2025 et entre 118 000 T/an et 214 000 T de cellules en 2030 qui devront être recyclées aux Etats-Unis. L'impact du réemploi reste assez faible (entre 5 et 10 % du total des volumes en fin de vie en 2030), il s'accroît au-delà de la période étudiée.

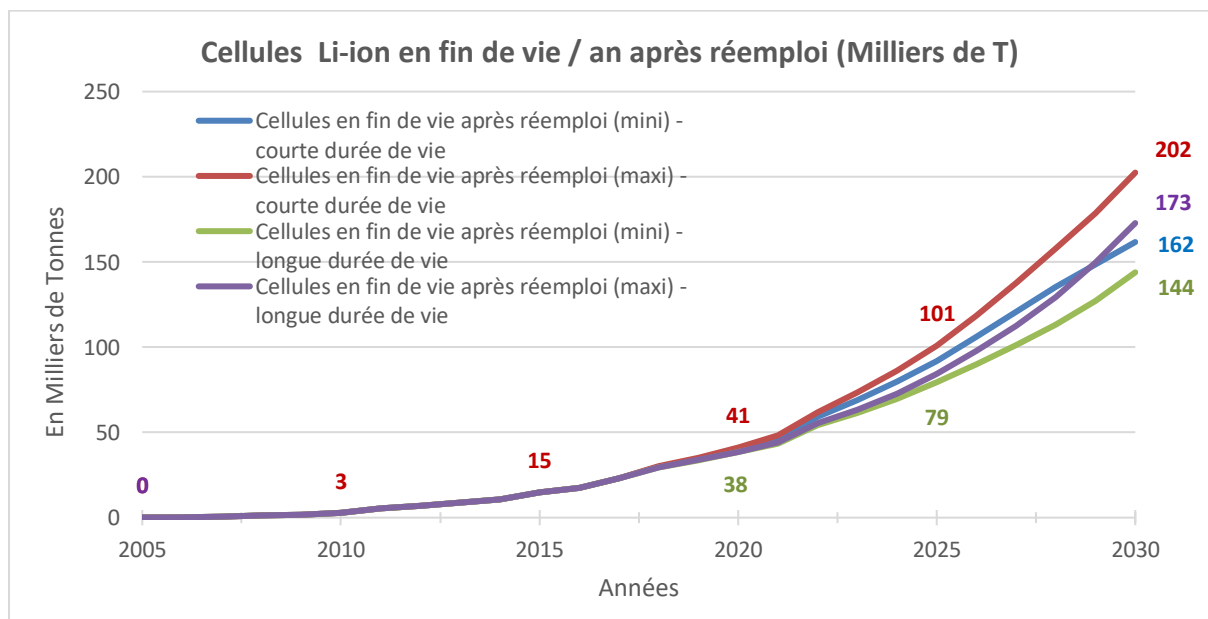
**NB :** les scénarii de réemploi notés « mini » correspondent à un volume minimum de cellules à recycler (c'est-à-dire à un scénario d'optimisation du réemploi). A l'inverse, les scénarii de réemploi notés « maxi » correspondent à un volume maximum de cellules à recycler (c'est-à-dire un scénario de réemploi non optimal)

### Europe



**Fig 44 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie En Europe

En Europe, c'est environ 40 000 T de cellules Li-ion qui seront à recycler en 2020, entre 82 000 T/an à 104 000 T/an en 2025 et de 157 000 T /an à 200 000 T/an en 2030 en fonction de la durée de vie des batteries VEH.

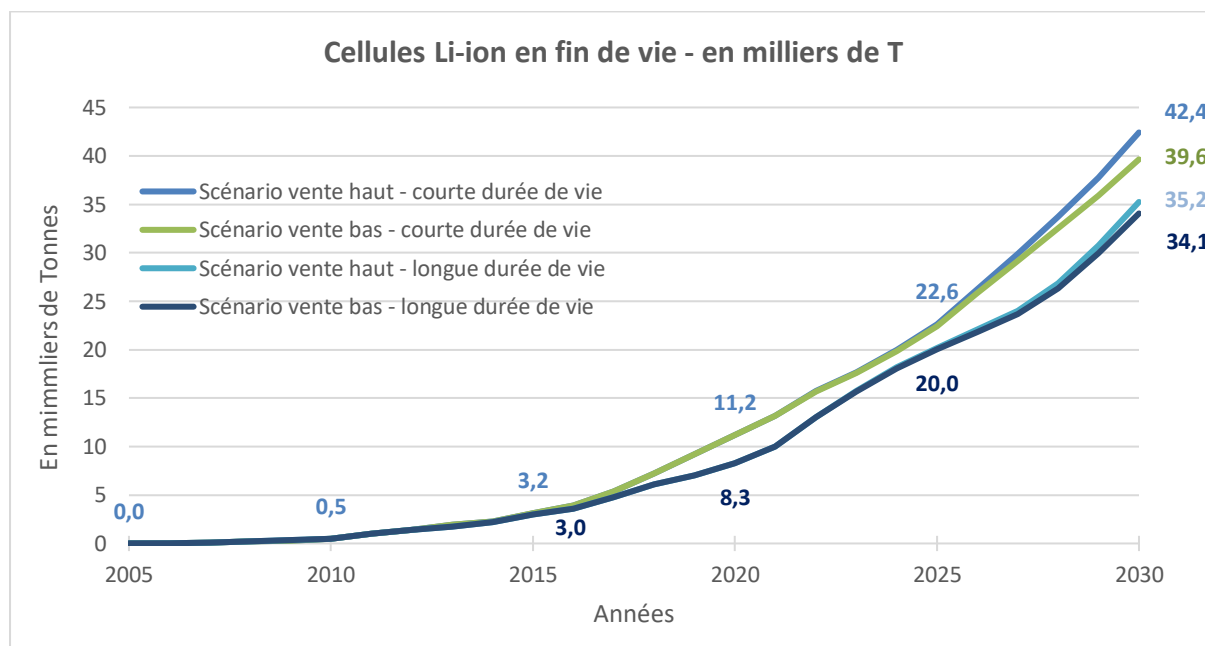


**Fig 45 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie En Europe en prenant en compte le réemploi

Même dans le cas d'un fort taux de réemploi, c'est entre 79 000 T/an et 101 000 T/an en 2025 et entre 144 000 T/an et 202 000 T/an de cellules en 2030 qui devront être recyclées en Europe. L'impact du réemploi reste assez faible (entre 5 et 10 % du total des volumes en fin de vie en 2030), il s'accroît au-delà de la période étudiée.

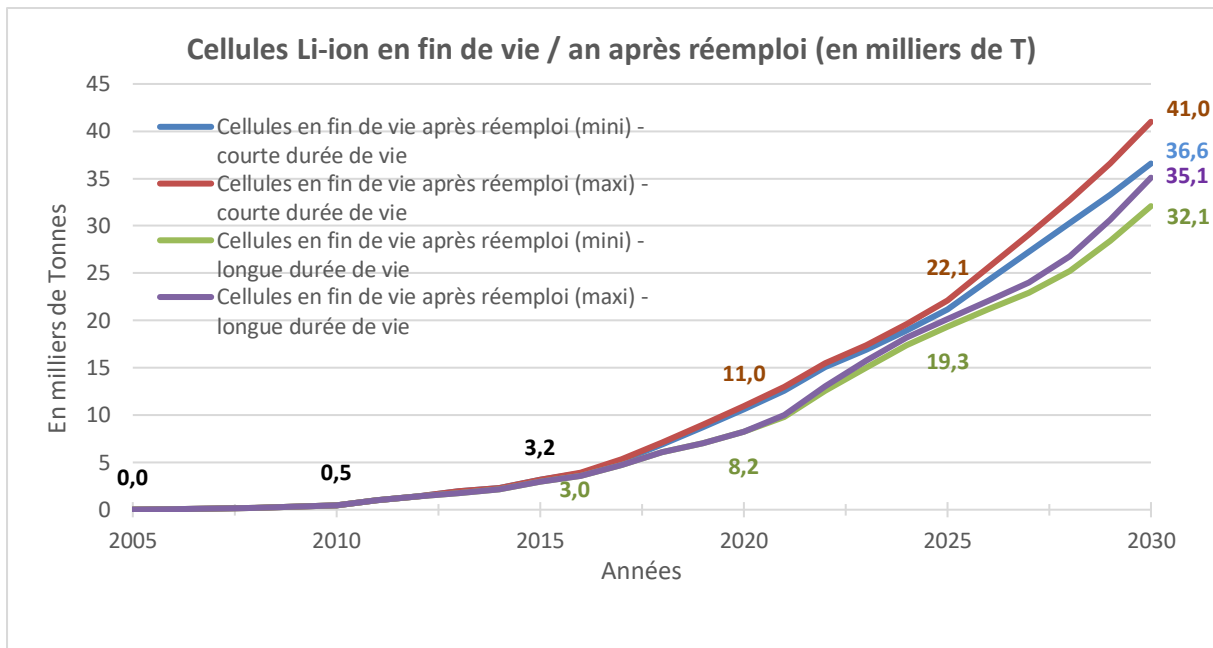
**NB :** les scénarii de réemploi notés « mini » correspondent à un volume minimum de cellules à recycler (c'est-à-dire à un scénario d'optimisation du réemploi). A l'inverse, les scénarii de réemploi notés « maxi » correspondent à un volume maximum de cellules à recycler (c'est-à-dire un scénario de réemploi non optimal)

### Japon



**Fig 46 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie au Japon

Au Japon, c'est 8 000 T à 11 000 T de cellules Li-ion qui seront à recycler en 2020, 20 000 T à 22 000 T en 2025 en fonction de la durée de vie des batteries. Et 34 000 T à 42 000 T /an en 2030.



**Fig 47 :** Estimation des tonnages de cellules li-ion en fin de vie au Japon en prenant en compte le réemploi

Même dans le cas d'un fort taux de réemploi, c'est entre 8 000 T/an et 11 000 T/an en 2025 et entre 32 000 T/an et 41 000 T/an de cellules en 2030 qui devront être recyclées au Japon. L'impact du réemploi reste assez faible (entre 5 et 10 % du total des volumes en fin de vie en 2030), il s'accroît au-delà de la période étudiée.

**NB :** les scénarii de réemploi notés « mini » correspondent à un volume minimum de cellules à recycler (c'est-à-dire à un scénario d'optimisation du réemploi). A l'inverse, les scénarii de réemploi notés « maxi » correspondent à un volume maximum de cellules à recycler (c'est-à-dire un scénario de réemploi non optimal)

Sur toutes les zones géographiques en dehors de la Chine, l'allongement de la durée de vie des batteries a un impact très faible jusqu'en 2020 et qui s'accroît progressivement ensuite. Ceci est dû au fait qu'en début de période les tonnages principaux de batteries en fin de vie proviennent des autres segments de marché (et non des VEH). Les principaux impacts en matière d'allongement de la durée de vie et de l'optimisation du réemploi se feront sentir au-delà de 2030.

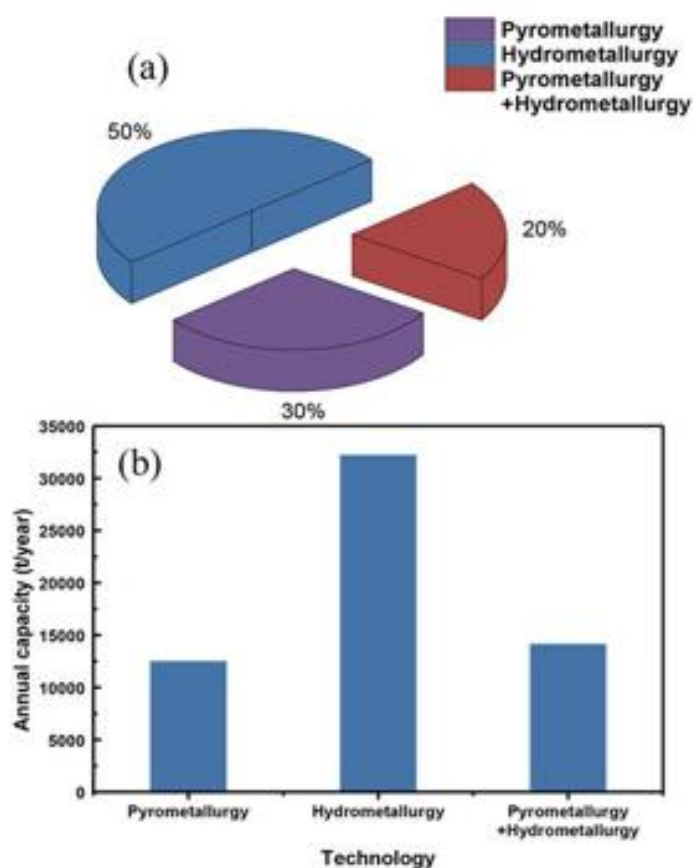
#### 4.4.7 Adéquation des capacités de recyclage

Quels que soit les scénarii de croissance des ventes, et même dans le cas d'un réemploi important les quantités de cellules Li-ion arrivant en fin de vie seront en forte augmentation dans les années à venir. En moyenne elles doublent tous les 5 ans à partir de 2020 en Europe, aux Etats Unis et au Japon. En Chine les quantités sont multipliées par 10 entre 2020 et 2030.

En 2017, E4TECH<sup>120</sup> évalue à 8000 T les capacités de recyclage de batteries Li-ion en Europe. Cette évaluation est certainement en dessous de la réalité. D'autres travaux de compilation<sup>121</sup> évaluent les capacités mondiales suivantes en 2017 :

<sup>120</sup> Li-ion battery recycling : Imperative and opportunity (Adam Chase E4tech – Battery event Nice , 4 Octobre 2017)

<sup>121</sup> A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries (Weiguang Lv, Zhonghang Wang, Hongbin Cao, Yong Sun, Yi Zhang, and Zhi Sun) – December 2017



**Fig 48.** Capacités de traitement des batteries Li-ion dans le monde en fonction des typologies de procédés (pour 30 sociétés identifiées)

Soit une capacité totale dans le monde d'environ 60 000 Tonnes.

En additionnant les capacités connues des entreprises identifiées dans le cadre de cette étude (Voir ANNEXE 8) et en extrapolant sur les capacités non documentées, nous proposons l'estimation suivante pour les capacités de traitement de batteries Li-ion en 2018 :

Zones géographiques	Capacités identifiées (en T /an)	Capacités réelles estimées (en T/an)	Typologie dominante des traitements
Europe	> 13300	20 000	Pyro et hydro
USA / Canada	> 12500	15 000	Pyro
Japon	> 3350	3500	Pyro et hydro
Chine / Corée du Sud / Singapour	> 44 800	50 000	Hydro

**Tab. 17 :** capacités de recyclage des batteries Li-ion

Concernant l'Europe, étant données les quantités collectées et de l'avis des acteurs, l'industrie du recyclage présente encore des capacités excédentaires. En revanche, si les hypothèses de taux de collecte sont correctes, elles devraient être rapidement dépassées avec potentiellement 40 000 T à recycler dès 2020.

Le Japon est dans une situation similaire, avec des capacités actuellement excédentaires mais qui pourraient être dépassées dès 2020.



Aux-Etats-Unis, à peine 5 % des batteries Li-ion en fin de vie sont actuellement recyclées. Les capacités sont largement excédentaires. En revanche, si l'ensemble des batteries Li-ion en fin de vie devaient être recyclées, l'Amérique du Nord n'a pas les capacités suffisantes dès maintenant.

La Chine, avec les principaux fabricants de précurseurs pour cathodes de batteries Li-ion qui se positionnent avec de grandes capacités de recyclage semble être en mesure de répondre à ses besoins à court terme. En revanche, les capacités de recyclage seront également dépassées après 2020.

Plusieurs acteurs annoncent leur intention d'investir dans le recyclage des batteries Li-ion. AMI (American Manganese Inc) aux Etats-Unis, BYD en Chine, SungEel HiTech qui prévoit de multiplier par 5 ses capacités actuelles (800 T) avec des projets d'investissements aux Etats-Unis, en Inde et en Hongrie notamment mais ces investissements sont insuffisants dans une perspective à 5 – 10 ans.

Les effets du réemploi sont assez faibles sur la période étudiée. En 2030, Le réemploi permet de différer entre 5% et 10% des tonnages en fin de vie (près de 20 % en Chine car la fraction de tonnages due aux VEH y est plus importante que sur les autres zones géographiques). L'effet du réemploi s'accroît avec le temps et impacte le marché de manière plus significative au-delà de 2030.

Au regard des quantités de batteries Li-ion en fin de vie qui seront potentiellement générées, les capacités de recyclage actuellement en service seront rapidement insuffisantes sur toutes les zones géographiques.

Cependant, il faut rappeler que les tonnages en fin de vie estimés dans le cadre de cette étude ne sont pas forcément représentatifs des tonnages effectifs à recycler. En premier lieu, sans une réglementation contraignante, seule une petite partie des batteries en fin de vie sont recyclées, la majorité du flux étant éliminé notamment en enfouissement (Australie, Etats-Unis).

En second lieu, les quantités en entrée d'installation dépendent de la collecte. Les estimations considèrent que le taux de collecte des batteries de VEH en fin de vie sera de 100 %. Or, concernant les batteries de VEH, tout reste à mettre en place pour une collecte systématique sur des volumes importants. La participation des constructeurs automobiles sera déterminante pour la structuration d'une filière de collecte performante.

En Europe, les acteurs de la filière VHU joueront un rôle déterminant. En France l'INDRA<sup>122</sup> centralise depuis plusieurs années le démantèlement des VEH accidentés sur son site de Pruniers en Sologne (41). Ceci a permis, en partenariat avec certains constructeurs, de développer des outils et des méthodes spécifiques et d'avoir un bon retour d'expérience sur les véhicules accidentés (batteries fortement incarcérées, détériorées, inondées, partiellement brûlées, ayant subi des perforations...etc).

Mais les enjeux à venir restent très importants. Il s'agit de disséminer les compétences acquises au sein du réseau (mise en sécurité, procédure de démontage). En second lieu il est nécessaire d'améliorer les canaux de communication avec les metteurs en marché afin qu'ils assurent rapidement la prise en charge des batteries démontées (si les constructeurs implantés sur le territoire sont réactifs, la situation est plus compliquée avec les importateurs). Enfin, l'INDRA souligne que les coûts additionnels liés à la mise en sécurité, au démontage de la batterie (estimés à 45 minutes supplémentaires) et au stockage ne sont pas financés à ce jour.

---

<sup>122</sup> INDRA est un acteur majeur du recyclage des VHU en France avec 380 centres de démantèlement (dépositaires de la marque et partenaires)

## CONCLUSION

Le marché des batteries est en très forte croissance sur les 20 dernières années. Cette croissance va se poursuivre sur les prochaines années avec un marché tiré en premier lieu par les VEH et dans une moindre mesure par le stockage stationnaire (associé au développement des EnR), le marché des applications mobile restant lui aussi en croissance en particulier en Asie/Pacifique.

Dans ce contexte ce sont les batteries Li-ion qui accaparent largement cette croissance.

Au regard des impacts environnementaux des batteries en fin de vie et des risques de pénurie des métaux utilisés dans leur fabrication (Cobalt en particulier), le recyclage des batteries Li-ion devient un enjeu majeur pour les années à venir.

Les procédés de recyclage sont pour la plupart connus et maîtrisés puisqu'ils sont déjà utilisés par l'industrie (extraction et affinage des métaux). Seul le domaine des procédés de valorisation directe pourrait être de nature à apporter des innovations intéressantes puisqu'ils permettent en théorie de limiter les impacts environnementaux et d'améliorer les rendements de recyclage. Mais ces procédés restent encore expérimentaux.

Les procédés actuels de recyclage sont coûteux, et pour la plupart non rentables (en dehors du recyclage des batteries Ni-MH et LCO). Le développement des activités de recyclage repose donc d'une part sur la mise en place de réglementations spécifiques ayant pour but d'interdire les solutions alternatives et rendre obligatoire le recyclage (c'est le cas en Europe et au Japon avec la mise en place de filières REP) et d'autre part sur l'amélioration de la rentabilité des opérations.

En attendant l'éventuelle mise au point des procédés de valorisation directe (dont la rentabilité n'est pas assurée) et considérant que les procédés hydro et pyro-métallurgiques, déjà largement explorés présentent peu de marge d'amélioration, il est nécessaire de trouver d'autres leviers.

Le potentiel de réduction des coûts de recyclage se situe principalement en amont de la chaîne, sur les opérations de pré-traitement : test/décharge, réemploi, démontage et démantèlement. Le développement du réemploi et l'automatisation du démantèlement s'ils apparaissent comme les principaux leviers ne peuvent être développés sans une coopération avec les fabricants et assembleurs de batteries. En effet, la rationalisation de ces activités n'est possible que par une standardisation au moins partielle des batteries (qui permet l'automatisation du démontage et du démantèlement) et un accès aux informations du BMS pour optimiser le test et le réemploi des cellules.

Le secteur de la fabrication des batteries est déjà aujourd'hui le principal consommateur de Cobalt et de Lithium (> 50 %) et absorbe aussi une part non négligeable de sel de Nickel de grande pureté (NiSO<sub>4</sub> en particulier). A l'avenir, si les recycleurs veulent sécuriser la valorisation de leurs extrants ils devront fermer la boucle de recyclage. Dans cette optique, l'intégration des activités d'affinage de métaux et donc la maîtrise des procédés hydro-métallurgiques apparaît comme un enjeu stratégique dans la chaîne du recyclage des batteries.

Au regard des quantités de batteries en fin de vie attendues sur les années à venir, les capacités de recyclage actuelle devraient être rapidement dépassées quelles que soient les zones géographiques étudiées (Chine, Europe, Etats-Unis et Japon)... sous réserve que des réglementations adéquates soient mises en œuvre pour que ces batteries soient effectivement recyclées.

Alors qu'il apparaît nécessaire d'investir dans de nouvelles capacités de recyclage pour absorber le gisement de batteries Li-ion en fin de vie à venir, la question du positionnement sur la chaîne de recyclage anime l'ensemble des acteurs.

En Europe et au Japon la mise en place d'une filière REP a favorisé l'émergence de recycleurs spécialisés, qui gèrent souvent des flux en mélange de batteries portables et dont le savoir-faire spécifique se situe principalement sur le tri et la séparation des flux. A part quelques exceptions, la plupart mettent en œuvre des procédés mécaniques et/ou pyro-métallurgiques et valorisent leurs extrants en boucle ouverte ou auprès d'affineurs de métaux dont l'activité n'est pas dédiée au traitement de blackmass issue de batteries.

Au Etats-Unis, ce sont en majorité les acteurs de la métallurgie extractive (et affinage des métaux) qui investissent le secteur du recyclage et intègrent, par opportunité, des batteries en fin de vie dans leurs flux entrants. Dans un contexte peu réglementé, la majorité des flux ne sont pas recyclés. Les acteurs se focalisent sur les flux à forte valeur.

En Chine qui est le principal pays concerné (> 50 % du marché mondial de la fabrication de batteries et > 50 % du marché des VEH), sous la pression des autorités, on assiste à une intégration des activités de recyclage par les acteurs aval de la chaîne de fabrication des batteries (fabricants de VEH, de batteries, de cathode, de précurseurs).

## **ANNEXE 1 :**

# **Généralités Techniques et définitions concernant les batteries et accumulateurs**

### **Table des matières**

• <a href="#">Définitions et principe de fonctionnement</a> .....	132
• <a href="#">Constituants matériel d'un accumulateur</a> .....	134
• <a href="#">Principales caractéristiques d'une batterie</a> .....	134
○ <a href="#">Définition d'une batterie</a> .....	134
○ <a href="#">Grandeurs caractéristiques d'une batterie</a> .....	135
• <a href="#">Résumé des enjeux technologiques liés à la performance des batteries</a> .....	137

- **Définitions et principe de fonctionnement**

Les accumulateurs sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les accumulateurs sont basés sur un système électrochimique réversible et sont donc rechargeables par définition.

L'accumulation ou stockage (phase de charge) ou la restitution (phase de décharge) utilisent la migration des électrons entre deux électrodes : l'anode et la cathode. Cette migration est basée sur le principe chimique d'oxydo-réduction.

L'oxydation désigne la perte (ou émission) d'électron au niveau de l'anode. Celle-ci est constituée d'un matériau dit « réducteur ». La réduction désigne le gain (ou absorption) d'électron au niveau de la cathode. Celle-ci est constituée d'un matériau dit « oxydant ».

Le potentiel d'oxydo-réduction (ou potentiel redox) d'un matériau, positif (dans le cas d'un oxydant), ou négatif (dans le cas d'un réducteur)<sup>123</sup> est une caractéristique propre au matériau et mesurée par rapport à une électrode de référence constituée d'hydrogène et dont le potentiel redox est 0 par convention (voir tab 1.). La température, la pression, le pH et la concentration de la solution électrolytique (voir plus loin) influant sur la valeur du potentiel redox, celui-ci est mesuré dans des conditions standards.

On parlera ainsi de potentiel standard d'oxydo-réduction.

Matériaux	Potentiel de réduction standard à 25°C (V/ENH *)
Li	-3,04
Ca	-2,84
Na	-2,71
Mg	-2,38
Al	-1,66
MH	-0,83
Zn	-0,76
Fe	-0,44
Cd	-0,4
Pb	-0,13
H2	0

**Tab 1** : caractéristiques des matériaux d'électrodes négatives

\*Ce potentiel est exprimé par rapport à une référence, mesurée par une électrode normale à hydrogène (ENH). Il est exprimé en Volts, d'où l'unité V/ENH

En théorie, de nombreux couples chimiques (c'est-à-dire les matériaux constituant l'anode et la cathode) peuvent être utilisés pour la réalisation d'accumulateurs électriques. Il suffit qu'il existe entre ces constituants un potentiel d'oxydo-réduction.

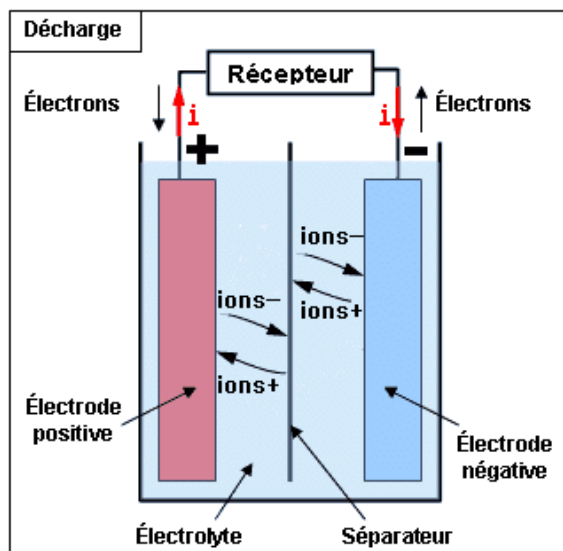
---

<sup>123</sup> Il faut noter que la notion d'oxydant ou de réducteur reste relative. Par exemple, l'aluminium qui est un réducteur par définition puisqu'il a un potentiel de réduction négatif (-1,66 Volt) devient oxydant s'il est associé à un réducteur dont le potentiel de réduction est plus important tel que le Lithium par exemple (-3,04 Volts)

Pour des raisons diverses liées à la toxicité de certains matériaux, leur forte réactivité, l'existence de réactions chimiques parasites, les contraintes de poids... etc, les associations donnant lieu à la fabrication de batteries à une échelle commerciale sont en pratique assez limitées.

Pour que la réaction d'oxydo-réduction se produise, les deux électrodes doivent baigner dans une solution électrolytique (ou électrolyte) contenant des ions mobiles qui permettent la conduction. La réaction entre la solution électrolytique et les électrodes est à l'origine du déplacement des électrons (dans le circuit), et des ions (dans la solution). Ainsi, l'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique et, plus généralement, de participer à la réaction chimique. En général, il est sous forme liquide constitué d'eau ou d'autres solvants, avec des sels, des acides ou des composants alcalins afin d'augmenter la conductivité ionique. Cependant, certaines batteries utilisent des électrolytes solides, formant des conducteurs ioniques aux températures de fonctionnement.

Lors de la décharge, la réaction électrochimique est spontanée. Elle engendre le déplacement des électrons et donc un courant électrique au travers du récepteur (une lampe par exemple). La phase de charge est le processus inverse, il est réalisé en délivrant un courant électrique à l'accumulateur (donc un déplacement forcé d'électrons).



*En phase de décharge, des électrons se déplacent de l'électrode négative (anode) vers l'électrode positive (cathode) en passant par un fil conducteur qui alimente un récepteur. Une réaction d'oxydation se produit à l'électrode négative suite au manque d'électrons. Cette réaction libère un ion positif. De même, en arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction à l'interface électrochimique, ce qui libère un ion négatif.*

*Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte et migrent entre cathode et anode à travers le séparateur.*

**Fig 1** : Schéma de principe d'une réaction d'oxydoréduction dans une cellule électrochimique.

Source: [site Sciences de l'Ingénieur de l'ENS Paris-Saclay](http://site.sciences.de.l'ingenieur.de.l'ens-paris-saclay)

### **Remarque :**

On peut noter l'inversion de la cathode et de l'anode lors de la phase de recharge d'un accumulateur résultant de l'inversion du sens de circulation des électrons. Au sens strictement chimique, les notions d'anode et de cathode ont donc peu de pertinence au sein d'un accumulateur. Cependant, conformément aux conventions de l'industrie, lorsque nous parlerons des composants d'un accumulateur (et plus généralement des batteries), nous nommerons cathode le lieu de la réduction (gain d'électrons) et l'anode le lieu de l'oxydation (perte d'électrons) pendant la phase d'utilisation de l'énergie électrique donc pendant la phase de décharge

- **Constituants matériel d'un accumulateur**

Un accumulateur est constitué de 3 composants principaux :

- L'anode qui fournit les électrons au circuit externe et subit des réactions d'oxydation pendant la phase de décharge.
- La cathode qui accueille les électrons venant du circuit externe (envoyés par l'anode), et subit des réactions de réduction pendant la phase de décharge.
- L'électrolyte qui assure le transfert de charge, sous forme ionique, dans la cellule entre l'anode et la cathode.

Et d'un quatrième,

- Le séparateur qui est une membrane isolante, destinée à séparer les électrodes électriquement afin d'éviter les courts-circuits internes à la cellule. Ce séparateur est poreux car il doit permettre aux ions de le traverser pour migrer entre anode et cathode.

L'ensemble des éléments constitutifs (sels, solvants, liants, collecteurs utilisés pour l'anode, la cathode et l'électrolyte et les matières actives des électrodes doivent être compatibles afin d'éviter les réactions parasites.

- **Principales caractéristiques d'une batterie**

- ***Définition d'une batterie***

On appelle batterie d'accumulateurs ou plus communément **batterie**, un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux, en série et/ou en parallèle selon la capacité ou la tension désirée, sachant qu'un montage en série additionne la tension des accumulateurs et un montage en parallèle additionne les capacités. Dans l'industrie, on utilisera plus souvent le terme d'élément ou de cellule (plutôt que d'accumulateurs).

La fabrication d'une batterie répond à l'exigence d'utilisation pour un appareil donné. Cette exigence concernera sa tension, sa capacité, sa durée de vie, ses dimensions et contraintes mécaniques.

A titre d'exemple, une batterie d'ordinateur portable est généralement un assemblage de 4 cellules Li-ion afin d'obtenir une tension nominale de 14,4 Volts<sup>124</sup>. On peut ensuite assembler en parallèle, plusieurs blocs de 4 cellules afin d'augmenter la capacité de la batterie (et donc son autonomie).

Pour une batterie de véhicule électrique ou de stockage pour une installation photovoltaïque individuelle dont la capacité requise est de l'ordre de 200 Ah et la tension de 12 à 48 Volts, ce sont plusieurs centaines de cellules assemblées en série et parallèle qui forment la batterie.

Il est évident que les contraintes de poids et de dimension auront moins d'importance pour un stockage stationnaire que pour alimenter un dispositif mobile (par exemple un ordinateur portable ou encore un véhicule électrique).

---

<sup>124</sup> La tension nominale d'une cellule Li-ion standard est de 3,6 Volts

## ○ **Grandeurs caractéristiques d'une batterie**

On nomme grandeurs caractéristiques d'une batterie, les données intrinsèques relatives à ses performances. Ces caractéristiques sont liées aux matériaux constitutifs de la batterie et sont communiquées par le fabricant. Elles sont théoriques car mesurées dans un environnement et selon un profil d'utilisation standard. Ces grandeurs caractéristiques sont toutefois des éléments de comparaison entre batteries et donc de sélection en fonction des applications de destination.

### ▪ **La force électromotrice (ou tension à vide)**

La force électromotrice, d'une batterie ou tension à vide (exprimée Volts), correspond à la différence de potentiel standard d'oxydo-réduction entre anode et cathode<sup>125</sup>.

La force électromotrice d'une batterie dépend donc de la nature des matériaux constituant les électrodes.

En pratique elle dépend également de l'état de charge de la batterie et des conditions extérieures, notamment la température.

#### Définitions associées :

- La Tension nominale d'un accumulateur est souvent donnée par les constructeurs de batteries comme caractéristique dimensionnante. Elle correspond en général à la tension à vide pour un état de charge de 50% mesurée à température ambiante.
- La Tension minimale d'une batterie correspond à la tension en dessous de laquelle il ne faut pas descendre dans le cas d'une décharge sous peine d'endommager la batterie.
- La Tension maximale d'une batterie est la tension qu'il ne faut pas dépasser pour éviter de l'endommager. Ceci concerne essentiellement la phase de charge. En effet, pour charger une batterie dans des délais raisonnables (ou pour la maintenir en charge), on lui applique une tension supérieure à sa tension à vide. Cette surtension peut endommager la batterie. Les batteries Li-ion et Ni-MH sont particulièrement sensibles dans ce domaine.

### ▪ **La capacité nominale**

La capacité nominale d'une batterie (exprimée en Ampère-heure) est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de stocker... et donc de restituer après avoir reçu une charge complète. Ainsi une batterie de 8Ah se décharge en 1h en fournissant un courant de 8A. Cette capacité nominale correspond à un régime de courant de décharge donné, une tension d'arrêt et une température définis.

La capacité d'une batterie est donc liée à la quantité de matière disponible des différentes espèces impliquées dans les réactions redox (la matière est un réservoir d'ions, plus il y a de matière plus il y a d'ions qui peuvent migrer)

Plus sa capacité nominale sera élevée et plus une batterie aura d'autonomie (pour un profil d'utilisation donné).

---

<sup>125</sup> Par analogie la tension peut être assimilée à la hauteur d'une chute d'eau, qui est égale à la différence entre les altitudes (potentiels) de départ et d'arrivée. Cette tension est à distinguer de l'intensité qui peut être assimilée au débit de la chute d'eau qui ne dépend pas de la hauteur de la cascade mais seulement de la quantité d'eau disponible en amont de la cascade.



- **La capacité massique**

La capacité massique d'une batterie (exprimée en Wh/kg), aussi appelée densité énergétique, densité d'énergie massique ou encore énergie spécifique, correspond à la quantité d'énergie qu'elle peut restituer par rapport à sa masse.

Pour une quantité d'énergie donnée, plus sa capacité massique sera élevée et plus la batterie sera légère. Ce facteur est donc particulièrement important dans le cadre des applications mobiles (véhicules électriques, Vélos à assistance électrique, ...) ou portables (outillage, laptops, téléphones...)

On définit de manière analogue la densité de puissance (exprimée en W/Kg) ainsi que la densité volumique d'énergie qui est le ratio entre la quantité d'énergie stockée dans la batterie (respectivement la puissance maximum qu'elle est capable de délivrer) et son volume. Cette grandeur s'exprime en Wh/l (respectivement en W/l).

- **La durée de vie**

La durée de vie d'une batterie est estimée par sa cyclabilité, c'est-à-dire le nombre moyen de cycles charge/décharge qu'elle peut effectuer. Généralement, on considère qu'une batterie a atteint sa limite de cyclabilité dès lors que sa recharge plafonne à 80% de sa capacité initiale.

Le niveau maximum de recharge décroît du fait d'une dégradation progressive de la qualité des réactions chimiques. En effet, la répétition des cycles de charge et décharge provoque divers phénomènes entraînant la dégradation de l'électrolyte, des électrodes et du séparateur.

Le nombre de cycle théorique est lié aux constituants de la batterie mais en pratique le nombre de cycles varie fortement en fonction de son profil d'utilisation ainsi que des conditions extérieures (T°).

Les batteries subissent également un vieillissement « calendaire ». C'est-à-dire qu'une batterie au repos subit une réduction de ses performances (qui dépend notamment de la T° et du niveau de charge). Ce vieillissement sera à prendre en considération pour les batteries peu sollicitées en cyclage.

Remarque concernant la durée de vie :

L'atteinte de sa limite de cyclabilité ne signifie pas forcément la fin de vie d'une batterie. En effet, selon son application, l'utilisateur peut continuer à utiliser la batterie malgré sa performance amoindrie. Mais il est aussi possible de transférer une telle batterie vers une application moins exigeante en matière de performance initiale. Dans ce cadre, nous verrons plus loin dans l'étude le fort potentiel de seconde vie en « vehicle to grid », c'est à dire le ré-emploi de batteries de véhicules électriques pour du stockage stationnaire.

- **L'autodécharge**

Même lorsqu'elle n'est pas en fonctionnement (c'est-à-dire sans connexion à un récepteur), une batterie subit une réduction progressive de son niveau de charge.

Lorsqu'une batterie n'est pas utilisée très régulièrement dans un enchaînement de phases de charges et décharges, (par exemple pour une fonction de secours), il sera donc nécessaire de contrôler et maintenir son niveau de charge.

Selon la typologie des batteries, les phénomènes d'autodécharge sont plus ou moins importants.

- **Résumé des enjeux technologiques liés à la performance des batteries**

Au regard de ces principes, on comprend les grands enjeux technologiques liés à la performance des batteries qui guident la R&D et expliquent la domination sur le marché de certaines technologies.

Au-delà de caractéristiques spécifiques liées au service attendu et à l'environnement d'utilisation, une batterie performante sera donc obtenue en couplant un réducteur dont le potentiel standard est le plus bas possible avec un oxydant dont le potentiel standard est le plus élevé possible (pour maximiser la force électromotrice et donc la puissance disponible).

Une fois les deux matériaux d'électrodes sélectionnés, l'enjeu est de trouver un électrolyte adapté, c'est-à-dire le plus conducteur possible mais inerte vis-à-vis des matériaux d'électrodes.

Puis un séparateur fiable dans sa fonction isolante mais suffisamment poreux pour faciliter la migration des ions entre les électrodes.

La puissance d'une batterie dépendra de sa capacité à restituer une énergie dans un temps court. Elle sera donc liée à la possibilité de migration rapide des quantités de charges au sein de la solution électrolytique. Cette rapidité de migration sera elle-même liée à la valence des espèces ioniques en présence (c'est-à-dire la capacité d'un ion à transporter plusieurs charges électroniques) et leur facilité à passer à travers le séparateur (qui dépendra de la nature du séparateur ainsi que de la « grosseur » des ions).

La capacité d'une batterie sera liée à la quantité d'ions que pourra accueillir l'anode et la cathode. Donc à la quantité de matière active de la cathode, et pour des batteries à électrode d'intercalation (type X-ion, Ni-MH) à la capacité de l'anode à accueillir une grande quantité d'ions. Mais plus les ions sont « enfouis » profondément dans le matériau poreux formant l'anode, et plus ils sont difficiles à extraire, donc plus faible sera le courant maximum disponible, et donc la puissance maximale. Il s'agit de rechercher des matériaux et des structures d'électrodes permettant à la fois d'accueillir beaucoup d'ions et de les libérer rapidement.

Dans le cas notamment d'une application mobile, il faudra également maximiser la capacité massique. Pour cela on recherchera des matériaux légers pour maximiser l'autonomie. De manière connexe, la capacité d'une batterie à être rechargée rapidement devient également un enjeu important. Celui-ci rejoint la problématique du choix de l'électrolyte et des séparateurs puisque qu'ils jouent un rôle déterminant dans la vitesse de circulation des ions, et des électrodes comme on l'a mentionné précédemment.

Mais de manière générale, plus la recharge est rapide et plus la batterie se dégrade du fait de réactions chimiques parasites qui entraînent des dépôts de métal et des dendrites.

La batterie devra encore fournir un nombre de cycles le plus important possible (durée de vie) et être viable sur le plan économique.

L'ensemble doit enfin en garantir la sécurité d'utilisation et autant que possible limiter son impact environnemental aux différents stades de vie : fabrication, utilisation et fin de vie.

On considèrera aussi le rendement énergétique qui est le rapport de la quantité d'énergie que fournit une batterie par rapport à l'énergie reçue pour assurer sa charge complète. Ce rapport est inférieur à 100 % en raison des pertes d'énergie par effet joule (échauffement de la batterie lors de la charge) et dépend encore des matériaux constitutifs.

Ainsi, la nature de chacun des matériaux constitutifs influence la performance d'une batterie. Ces matériaux ne peuvent être sélectionnés indépendamment des uns des autres car ils interagissent de manières variées. Pour une application donnée, la construction d'une batterie résulte donc du meilleur compromis entre poids, énergie, puissance, sécurité, durée de vie, impact environnemental et prix. Il met en jeu de très nombreuses interactions chimiques, ce qui explique la difficulté de développement de nouvelles technologies de batteries.

## ANNEXE 2

### Interdictions du mercure et du cadmium, restriction du plomb dans les P&A

(Union Européenne)

		Directive 2006/66/CE	Directive 2013/56/UE
<b>Mercure</b>	<i>Interdiction</i>	Tous P&A portables, intégrés ou non dans des appareils, qui contiennent plus de 0,0005 % de mercure en poids	
	<i>Exemption</i>	Piles bouton dont la teneur en mercure est inférieure à 2 % en poids.	Fin de l'exemption au 01/10/2015
<b>Cadmium</b>	<i>Interdiction</i>	Tous P&A portables, y compris ceux qui sont intégrés dans des appareils, qui contiennent plus de 0,002 % de cadmium en poids	
	<i>Exemption</i>	a) les systèmes d'urgence et d'alarme, notamment les éclairages de sécurité ; b) les équipements médicaux ; c) les outils électriques sans fil.	Fin de l'exemption pour l' <u>outillage sans fil</u> à partir du 01/01/2017

#### **Plomb**

L'usage du plomb est régi par le règlement REACH (N° 1907/2006). Celui-ci est complété par le règlement N° 2015/628 qui vient modifier l'annexe XVII du règlement REACH, relative aux substances soumises à restriction, notamment en ce qui concerne le plomb et ses composés.

Les batteries au plomb font dans ce cadre l'objet d'une exemption exceptionnelle en attendant une évaluation plus détaillée à réaliser dans un délai approprié. Le délai est fixé au plus tard au 01/07/2019.

## **ANNEXE 3**

### **Les technologies de batteries peu commercialisées, abandonnées ou en voie d'abandon, et leur recyclage**

#### **Batteries Zebra (Sodium – Chlorure de Nickel)**

Inventées au milieu des années 80, Les batteries Zebra, à base de Sodium ont la particularité d'être des « batteries chaudes ». Pour leur fonctionnement elles doivent être maintenues à une température de 270 à 350 °C. De ce fait elles doivent fonctionner continuellement ou être raccordées au réseau électrique (car leur autoconsommation pour se maintenir à température est importante, d'où une auto-décharge rapide). En outre, elles ne supportent pas un régime de charge rapide. Les batteries Zebra ont été utilisées sur la Renault Twingo de première génération (130 km d'autonomie / 120 km/h maximum). Dans le cas des véhicules électriques, elles sont aujourd'hui abandonnées au profit du Li-ion.

Même en stockage stationnaire, la complexité d'utilisation et les contraintes liées à sa température de fonctionnement conduisent à son abandon progressif.

Dans ce domaine, on lui préfère la technologie Na-S, aujourd'hui utilisée pour du stockage de grande capacité.

En ce qui concerne les batteries à base de sodium, nous évoquerons également la technologie Na-ion dans l'annexe consacrée aux « batteries du futur ».

#### **Batteries Zinc-Air**

Le zinc est utilisé principalement pour les piles.

Les batteries au Zinc offrent de très bonnes performances en matière de densité énergétique (en théorie 1370 Wh/kg – et 400 Wh/kg en pratique, soit 4 fois plus qu'un accumulateur Li-ion) mais ont l'inconvénient majeur de former des dendrites lors de chargement/déchargement répétés. Ces dendrites mettant à terme anode et cathode en contact et provoquant un court-circuit.

Ce problème de dégradation rapide en cyclage est connu depuis longtemps (les technologies au zinc existent depuis plus d'un siècle) et a toujours été un obstacle à son développement malgré de régulières tentatives d'y remédier.

De plus d'autres difficultés liées à l'oxydation rapide du Zinc à l'air, ou la présence dans l'air de gaz « contaminants » tel que le CO<sub>2</sub> réduisent fortement la cyclabilité des batteries Zinc-Air.

Ce problème de cyclabilité des batteries Zinc-Air les a jusqu'ici disqualifiées dans la course au développement.

Enfin le cout important des électro-catalyseurs (Platine, Oxyde d'Iridium) nécessaire à la réduction de l'oxygène en ion hydroxyde sont un obstacle supplémentaire.

Cependant, des avancées dans le domaine lié notamment à la conception des électrodes et faisant l'objet de dépôts de brevet par plusieurs entreprises américaines <sup>126</sup> pourraient permettre un

---

<sup>126</sup> EOS Energy Storage (<https://eosenergystorage.com>); Fluidic Energy (<http://www.fluidicenergy.com>); ViZn Energy (<https://www.viznenergy.com>)

développement plus important de cette technologie. Nous l'aborderons donc dans la partie consacrée aux « batteries du futur ».

### **Batteries base Nickel (hors Ni-Cd et Ni-MH)**

Il existe plusieurs types de batteries à base de Nickel en dehors du Ni-Cd et Ni-MH qui sont les plus répandues. On trouve en effet des batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn), Nickel-Fer (Ni-Fe) ou Nickel hydrogène (Ni-H<sub>2</sub>). Ces technologies sont similaires à la technologie Ni-Cd avec une cathode en Nickel et un électrolyte aqueux (KOH) qui sont identiques, seule l'anode change.

Malgré des avantages potentiels en termes de densité d'énergie massique et de recyclabilité, ces technologies, connues depuis près de 100 ans, n'ont jamais connu de grand succès commercial à cause de leur faible cyclabilité (Ni-Zn), leur faible puissance et leur baisse de performance en basses températures (Ni-Fe) ou leur coût (Ni-H<sub>2</sub>; Ni-Fe).

Même si les avancées récentes de la recherche et développement concernant les électrodes (stabilisation de l'électrode en Zinc, couplage avec des nanotubes de carbone et du graphène) a permis d'améliorer les performances de ces batteries, la baisse du prix des accumulateurs au lithium, plus performants tant en termes de densité énergétique, de cyclabilité que de tension nominale laisse peu de place à ces technologies qui restent cantonnées à des utilisations spécifiques.

Le Ni-H<sub>2</sub> est par exemple utilisé pour des applications spatiales.

Le Ni-Zn peut devenir une alternative au Ni-MH sur le marché des « piles rechargeables » en remplacement des piles alcalines/salines jetables. Mais de manière générale, les technologies rechargeables restent peu utilisées pour des applications en format pile et les volumes commercialisés sur le moyen terme resteront faibles.

### **Batteries base Lithium (hors Li-ion)**

#### **a. Batteries LMP (Lithium – métal)**

La technologie Li-métal ou plus précisément LMP (Lithium-Métal-Polymère) a été mise au point dès 1973.

Elle utilise une anode composée de Lithium métallique et une cathode composée de LiFePO<sub>4</sub> (phosphate de fer lithié). Cette technologie impose d'importantes contraintes de sécurité au niveau de sa conception qui doit garantir l'intégrité de l'enveloppe en cas de choc, du fait de la forte réactivité du Lithium métallique à l'air et à l'eau. De plus les phases de chargement/déchargement forment des dendrites provoquant des courts-circuits. Ces inconvénients ont conduit au développement de la technologie Li-ion et à l'abandon progressif des technologies lithium-métal.

En revanche, cette conception sans solvant (technologie « tout solide », l'électrolyte étant constitué d'un polymère à base de poly[oxyde d'éthylène] ou POE ) limite les risques de dégagement gazeux et d'emballement thermique. Ce type de batterie ne présente pas de risque d'explosion à l'utilisation même en cas de forte chaleur ou de fort appel de puissance.

Une batterie lithium-métal polymère est ainsi composée de l'empilement successif de quatre couches :

- un feuillard de lithium,
- un électrolyte polymère à base de POE,
- une cathode
- un collecteur de courant constitué d'un feuillard métallique

Son fonctionnement nécessite un maintien de la température interne autour de 60 °C ce qui oblige à la maintenir sous une alimentation même en phase de non utilisation. Cette batterie est donc adaptée pour des utilisations intensives (phase de non utilisation réduite, enchaînement des phases de charge et décharge), d'où son utilisation privilégiée pour les voitures en partage et les bus électriques.

Avec des performances comparables aux batteries Li-ion, cette technologie est aujourd'hui développée uniquement par Blue Solution (groupe Bolloré) qui possède deux usines de fabrication dans le monde (France et Canada)<sup>127</sup> pour des applications sur les véhicules électriques de sa marque et notamment les bus (utilisation intensive).

Des tentatives de développement sur le marché des systèmes photovoltaïques (applications stationnaires) sont en cours sur le continent Africain.<sup>128</sup>

Cependant, face aux choix technologiques et à la taille des concurrents en matière de fabrication des batteries Li-ion, la technologie LMP aura probablement du mal à rester compétitive sur son marché. Il n'existe actuellement aucun procédé connu pour le recyclage de ces batteries, même si Blue solution affirme travailler sur ce sujet.

#### b. Batteries Li-Po

La technologie Li-Po a été mise au point en 1979 et commercialisée à partir de 1996.

Le Li-Po (Lithium Polymère) est basé sur les mêmes réactions chimiques que le Li-ion à la différence que l'électrolyte est un gel polymère. Les batteries Li-Po ont une aptitude réduite à délivrer de la puissance (car le polymère ralentit la circulation des ions).

De plus, les batteries Li-Po coutent plus cher que le Li-ion, ont une cyclabilité réduite.

En revanche, l'électrolyte gélifié donne la possibilité de supprimer l'enveloppe métallique, les batteries Li-Po peuvent y compris être déposée sur un support flexible. Ceci permet de réduire leur poids (et au final gagner en densité énergétique). Mais cette enveloppe souple les rend plus fragile aux chocs et peut poser des problèmes d'étanchéité et donc de sécurité.

Cette technologie est peu répandue en dehors des du secteur de l'aéromodélisme.

A plus long terme, il serait envisageable d'assembler des cellules Li-Po au sein d'une batterie avec un casing adapté qui garantirait leur sécurité.

En dehors des technologies non encore matures que nous abordons dans l'ANNEXE 4 consacrée aux « batteries du futur », les technologies peu commercialisées présentées ci-dessus ne sont pas abordées plus en détail dans le corps de l'étude qui se concentre plutôt sur les technologies qui dominent actuellement le marché et dont les volumes commercialisés justifient une réflexion avancée sur la problématique de leur recyclage.

---

<sup>127</sup> Capacité de production de 300 MWh/an en 2016 – prévision à 1 GWh en 2019-2020 (<https://www.blue-solutions.com/blue-solutions/entreprise/presentation/capacite-de-production/>)

<sup>128</sup> Voir <https://www.blue-solutions.com/blue-solutions/entreprise/mapping-des-applications/>

## **ANNEXE 4**

### **Les batteries du futur**

#### **Les batteries Métal-Air**

Certains métaux peuvent s'oxyder au contact de l'oxygène de l'air. Ces métaux forment donc avec l'oxygène, un couple redox qui peut théoriquement être mis en œuvre pour la fabrication de batteries. Les batteries Métal-Air sont susceptibles d'offrir une densité d'énergie 4 à 10 fois plus élevée que les batteries Li-ion.

Les batteries Métal-Air sont souvent présentées comme la prochaine génération de batteries qui viendraient remplacer le Li-ion.

Elles sont constituées d'une électrode métallique, d'une cathode à air (généralement à base de carbone) et un électrolyte (aqueux ou organique)

Les batteries Métal-Air qui font l'objet de travaux en R&D sont aujourd'hui principalement les :

- Batteries Zinc-Air
- Batteries Aluminium-Air
- Batteries Magnésium-Air
- Batteries Lithium-Air
- Batteries Sodium-Air

Ces technologies ont longtemps été laissées à l'écart du fait d'une dégradation rapide des constituants lors des phases de charge et décharge qui limitent fortement leur cyclabilité :

- Désintégration irréversible de l'électrode métallique et formation d'oxydes métallique venant rapidement limiter les performances (Li-Air)
- Formation de dendrites<sup>129</sup> (Zn-Air)
- Mauvaise stabilité de l'électrode à air pendant la phase de recharge, problème de réversibilité des réactions chimiques, performance du catalyseur, pureté de l'air.
- Forte réactivité de l'électrode métallique (Li-Air)
- Carbonatation de l'électrolyte (Zn-Air)
- Problème d'oxydation (Al-Air) / précipitation de sels carbonatés (Zn-Air) dans l'électrode à air par réaction avec le CO<sub>2</sub> de l'air.

Au-delà de travaux dédiés, c'est en partie la R&D liée à l'amélioration des performances des batteries Li-ion (électrodes en graphène, compréhension pointue des mécanismes chimiques, stabilité des électrolytes...) qui profite aux batteries Métal-Air.

Selon les technologies, les travaux sont plus ou moins avancés.

Les technologies sodium-Air, Li-Air et Magnesium-Air restent encore du domaine théorique et n'ont donné lieu qu'à des prototypes de laboratoire.

L'entreprise Phinergy (Israël) propose sur le marché une batterie Al-Air avec une très faible cyclabilité. Sans avoir résolu la question de la réversibilité des réactions à l'anode (dégradation rapide) elle a mis

---

<sup>129</sup> Les dendrites sont des excroissances solides qui se développent à partir d'une électrode jusqu'à toucher l'autre électrode et provoquer ainsi un court-circuit.



au point un système permettant de remplacer l'électrode métallique de manière régulière en guise de recharge.

Les batteries Zinc-Air dont la durée de vie est limitée (100 à 200 cycles) restent à ce jour les plus développées.

En France EDF s'implique dans ce domaine à travers différents projets :

- Projet AZTEQUE (Accumulateur Zinc-Air pour Transport électrique)
- Projet ZINIUM, porté par la filiale ZnR batteries qui a mis au point un prototype de 5KWh pour stockage stationnaire

Aux Etats-Unis, plusieurs entreprises ont déposé des brevets proposant des solutions aux problèmes mentionnés précédemment et commercialisent déjà des solutions de stockage stationnaire à des coûts compétitifs : EOS Energy Storage, ViZn (160 USD/KWh) ou Fluidic Energy (100 USD/KWh)

*Le Naval Research Laboratory (Washington – USA) a par ailleurs publié en Avril 2017, une étude concernant la mise au point de nouvelles électrodes en zinc limitant la formation de dendrites avec un projet de commercialisation dès 2019*

L'Université de Sydney et l'Université technologique de Nanyang ont annoncé de leur côté en 2017 également la mise au point de catalyseurs moins coûteux et qui améliorent la recharge des batteries.

En dehors des technologies Zinc-Air qui sont déjà commercialisées pour des solutions de stockage stationnaires, les autres technologies Métal-Air doivent encore lever de nombreux verrous technologiques avant d'être éventuellement compétitives.

Aujourd'hui de nombreux laboratoires à travers le monde travaillent sur l'amélioration des technologies Metal-Air.

En parallèle, les investissements massifs concernant la technologie Li-ion et l'amélioration continue des performances (en sécurité, cyclabilité et densité d'énergie) sont de nature à réduire l'avantage potentiel des batteries métal-Air rendant ainsi très incertaine la possibilité de l'émergence de ces technologies sur le marché même sur le long terme.

## Les batteries X-ion

Face aux problèmes de sécurité du Li-ion et à une exploitation des ressources en lithium qui bien qu'abondantes pourraient être problématique à terme, la recherche se penche sur plusieurs alternatives permettant de remplacer le Lithium par d'autres matériaux.

Plusieurs éléments sont notamment envisagés tels que le sodium (Na), le magnésium (Mg), le potassium (K) ou encore le calcium (Ca) et l'aluminium (Al) car leurs propriétés (voir tableau ci-dessous) peuvent permettre leur utilisation en tant qu'éléments de batteries de type X-ion.

Couple	Capacité volumique en mAh/mL	Capacité spécifique en mAh/g	Potentiel standard de réduction en V vs. ESH	Rayon ionique en pm
Li <sup>+</sup> /Li	2026	3861	-3,04	76
Na <sup>+</sup> /Na	1128	1165	-2,71	102
K <sup>+</sup> /K	591	685	-2,93	138
Mg <sup>2+</sup> /Mg	3833	2205	-2,37	72
Ca <sup>2+</sup> /Ca	2073	1337	-2,87	100
Zn <sup>2+</sup> /Zn	5851	820	-2,20	74
Al <sup>3+</sup> /Al	8040	2980	-1,67	54

**Tab 1:** Caractéristiques des batteries X-ion selon la nature de l'

Source : ENS - Marine COGNET et Michaël CARBONI<sup>130</sup>

Si certains systèmes sont encore peu développés comme les batteries K-ion, Ca-ion et Al-ion, d'autres comme les batteries Na-ion et Mg-ion sont déjà au point au niveau laboratoire et pourraient donner lieu à des développements commerciaux à moyen terme.

Avec son fort potentiel standard de réduction, le sodium est un candidat intéressant pour remplacer le lithium, d'autant plus qu'il reste également léger et que l'utilisation du sodium associé au Soufre (batteries Na-S) apporte déjà des éléments de connaissance avancée quant au comportement du sodium.

Un des freins à l'utilisation du sodium dans des batteries Na-ion reste son rayon ionique plus élevé que celui du lithium. En effet, l'intercalation du sodium et la diffusion des ions au sein de la matrice d'électrode poreuse est moins facile et réduit la capacité des batteries. En théorie, cette perte de performance reste cependant compensée par un coût de fabrication plus faible.

De nombreux essais sont en cours dans différents laboratoires à travers le monde. Mais le premier prototype de batteries Na-ion, a été mis au point en 2015 par RS2E (Centre de recherche Français qui fédère plusieurs unités de recherche sur le stockage électrochimique dont le CNRS, CEA...). Ce prototype a été présenté sous la forme d'une cellule standard Li-ion 18650.

Ce prototype possède une énergie spécifique de 90 Wh/kg, et un potentiel d'amélioration jusqu'à 130-140Wh/kg.

L'entreprise TIAMAT basée en Picardie et qui travaille en partenariat avec RS2E a levé en 2017 3,6 Mi€ de fonds pour tester des prototypes directement chez ses clients. L'objectif est de pouvoir installer à partir de 2020 un démonstrateur capable de produire les premières batteries en série

<sup>130</sup> <http://culturesciences.chimie.ens.fr/stockage-de-l'energie-evolution-des-batteries-22>



**Fig 1:** Batteries Na-ion – cellule standard 18650 (CNRS)

Si ses performances semblent limitées pour des applications en mobilité, la technologie Na-ion pourrait trouver des débouchés sur le stockage stationnaire ou elle pourrait revenir moins chère que le Li-ion avec une meilleure garantie de sécurité. Elle pourrait également concurrencer le Na-S sur le stockage de grande capacité avec l'avantage d'être une batterie froide (ce qui offre un meilleur rendement que les batteries chaudes au Na-S et une plus grande facilité d'utilisation)

Le magnésium est lui aussi très abondant et a un coût peu élevé. Contrairement au sodium, la taille de l'ion magnésium est du même ordre que celle du lithium et n'est donc pas un problème pour la diffusion et l'intercalation. Les batteries Mg-ion offre une densité d'énergie plus importante que les batteries Li-ion

Un avantage du magnésium provient de sa capacité à porter deux charges élémentaires par atome au lieu d'une seule pour les éléments Li ou Na, ce qui permet de générer un courant plus important. Cependant, cette divalence est également l'inconvénient majeur pour le développement de ces batteries. En effet, sa mobilité est aussi limitée par ses deux charges du fait de l'existence de liaisons plus fortes entre le métal et la matrice d'électrode.

Les efforts de recherche pour les batteries Mg-ion sont aussi dirigés vers de nouvelles formulations d'électrolyte, et notamment des électrolytes solides (les électrolytes liquides étant trop corrosifs).

### **Les batteries Li-S**

Dans le domaine des batteries du futur, La batterie Li/S motive la recherche du fait d'une densité d'énergie particulièrement élevée (2500 Wh/kg théorique – 500 Wh/Kg en pratique).

Elle est composée d'une anode métallique en lithium et d'une cathode en soufre. Le principal avantage de cette batterie est le remplacement de l'oxyde mixte de la cathode par du soufre, plus léger, plus abondant et donc peu coûteux.

Cette technologie possède néanmoins de nombreuses limitations comme une faible conductivité, c'est à dire une faible capacité à laisser circuler les différents ions, une grande instabilité qui conduit à la dégradation de la cathode et donc une très faible cyclabilité (seulement 50 cycles pour les tests actuels)

Compte tenu de la densité d'énergie des batteries Li-S, la mise au point d'une batterie Li-S à prix compétitif représenterait une réelle rupture sur le marché des batteries et notamment pour les applications en mobilité.

Plusieurs projets sont actuellement en cours pour développer et améliorer ce système mais les verrous technologiques restent encore nombreux.

### **Les batteries « solid state » (ou « tout solide »)**

Dans ce type de batteries, l'électrolyte liquide ou gélifié est remplacé par un électrolyte solide. Les batteries fabriquées par le groupe Bolloré entrent dans cette catégorie mais présentent l'inconvénient majeur d'avoir une température interne de fonctionnement élevée (ce qui entraîne une autodécharge très rapide, d'où la nécessité de maintenir la batterie sous tension en permanence)

Au cours des dernières années, des avancées en matière de R&D ont permis la mise au point d'électrolytes solides inorganiques (verres à base d'oxyde ou de sulfure) ou organiques (polymères) présentant une forte conductivité ionique à température ambiante.

Potentiellement, les électrolytes solides peuvent être associés à divers systèmes électrochimiques mais c'est principalement dans le domaine des batteries Li-ion que se concentrent les efforts de recherche.

Au-delà d'un avantage immédiat en matière de sécurité (contrairement aux électrolytes liquides organiques, les électrolytes solides sont moins inflammables voire pas du tout pour des électrolytes inorganiques), ce type de batterie permet potentiellement d'améliorer la densité d'énergie massique, la durée de vie et la vitesse de recharge.

La mise au point de batteries tout solide et son développement commercial représenterait une réelle rupture technologique.

Cependant la stabilité des interfaces électrode/électrolyte (avec des anodes en graphite ou en Lithium métal) reste à maîtriser. L'utilisation d'électrolyte solide entraîne une modification de l'anode et bien sur des séparateurs, ce qui modifie les procédés actuels de fabrication.

De nombreux brevets sont déposés en Corée du Sud et au Japon sur ce sujet. L'Europe est également très active. SAFT a informé par un communiqué de presse début 2018 avoir formé une alliance avec plusieurs industriels européens (Siemens, Solvay, Mans...) pour la mise au point d'un prototype de batteries industrielle dès 2020, une ligne de production pilote de batteries 2MWh en 2021 et une production en série à partir de 2025.

Toyota, de son côté, a affirmé sa volonté de commercialiser des véhicules électriques équipés de batteries tout solide d'ici 2022.

En 2013, APPLE a racheté la société Infinite Power Solutions dont l'activité se concentre sur le développement de cette technologie.

En 2017, l'entreprise britannique DYSON a annoncé qu'elle prévoyait d'investir 2,7 Milliards de dollars dans le but d'introduire sur le marché un véhicule électrique équipé d'une batterie tout solide dès 2020. Il est cependant légitime d'émettre des doutes depuis que Dyson a annoncé que sa première génération de VEH n'intégrerait probablement pas cette technologie. Quoiqu'il en soit, il est évident que de nombreux acteurs travaillent sur le sujet.

Cependant, au regard des investissements nécessaires pour passer d'une phase pilote à une production commerciale, il est probable que les premières applications ne concernent que certains segments de marché (électronique grand public), avant qu'elle se développe ensuite, profitant de ce retour d'expérience et d'économies d'échelle, sur des applications de plus grand format et notamment les VEH.

Selon la société Li-Cycle, les temps de développement que nous connaissons dans le domaine des batteries permet de penser qu'un développement de masse de cette technologie n'interviendra pas avant 8 à 10 ans.

## **ANNEXE 5**

### **Quelques repères chiffrés (Sources AVICENNE ENERGY)**

- Marché mondial des batteries : 520 GWh /an en 2017
  
- Marché Li-ion en 2017 = 120 GWh (soit 40 Mds d'USD) dont
  - VEH et bus électriques = 70 GWh
  - Applications portables = 30 GWh
  - Stockage électrochimique / industrie : 20 GWh
  
- Marché mondial du Ni-Cd : 2,2 GWh / 1,5 Mds USD
- Marché mondial du Ni-MH : 2,8 GWh / 1,5 Mds USD
- Marché mondial du Na-S : 3 GWh / 1,6 Mds USD

Le marché des batteries représente 75 Mds d'USD en 2017 avec une croissance moyenne de 9% par an sur la période 2010 – 2017.

En 2017, la Chine possède 54 % des capacités de production mondiales de batteries Li-ion, l'Europe seulement 2 %.

- Marché mondial des véhicules légers
  - Marché Total : 93 Millions d'unités vendues en 2017
  - Marché VEH (BEV + PHEV) : 3 millions d'unités vendues (ventes cumulées) dont 1 millions en 2017
  - Marché hydrogène : 6 500 immatriculations dans le monde depuis 2013 (première commercialisation) dont près de la moitié Californie.

## **ANNEXE 6**

### **La variété des technologies Li-ion**

#### **4.1 Composition des batteries Li-ion**

Il existe une grande diversité de batteries Li-ion, essentiellement due à la composition des cathodes.

##### **Anode :**

La matière active permettant l'insertion d'ions lithium est en carbone, sous forme de graphite (naturel ou synthétique). L'anode est revêtue d'une feuille de cuivre servant de conducteur (on l'appelle le collecteur) pour solidariser le tout, on utilise un liant souvent à base de caoutchouc butadiène-styrène (SBR) ou de polyfluorure de vinylidène (PVDF)

D'autres type d'anode à base d'oxyde de titane lithié (LTO) ou à base de silicium peuvent être utilisées mais de manière très minoritaire.

L'utilisation d'oxyde de Silicium pour les anodes permet de décupler la capacité d'énergie. Le problème est que alors que le volume d'une anode en graphite varie de moins de 10 % entre ses phases de charge et décharge, le volume d'une anode en oxyde de silicium varie de + de 300 %. Ces modifications importantes de volume restent un obstacle au développement des anodes en oxyde de silicium.

Pour contenir ce problème, certains fabricants peuvent utiliser des anodes mixtes (par exemple TESLA utilise des anodes graphite contenant 5 à 15 % d'oxyde de silicium)

##### **Cathode :**

La cathode est constituée d'un oxyde métallique dont la pureté conditionne la performance et l'autonomie de la batterie. Elle est revêtue d'une feuille en aluminium qui sert de collecteur.

Rq : Les métaux de valeur qui seront visés par les procédés de recyclage sont principalement situés dans la cathode.

Les matières actives des cathodes sont commercialisées sous forme de poudre. Lors de la fabrication, les oxydes métalliques (de nickel, manganèse, cobalt, aluminium... selon les compositions) sont imprégnés avec du carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), qui sert de solvant. La pâte obtenue est appliquée en couche mince sur le collecteur (une feuille d'aluminium). On utilise alors un liant, généralement du Polyfluorure de vinylidène (PVDF fluoropolymère de formule  $(\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2)_n$ ) qui est un thermoplastique.

Il existe de nombreuses compositions de cathodes et donc une grande diversité de compositions pour les batteries Li-ion.

La première génération de batteries lithium est la technologie LCO (1991) dont la cathode est un oxyde mixte de cobalt et de lithium ( $\text{LiCoO}_2$ ). Elle contient jusqu'à 100% de cobalt et reste encore utilisée pour les produits portables.

Elle a rapidement été remplacée dans les VEH par la technologie LMO (1996), Lithium Manganèse oxyde ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) moins chère car n'utilisant pas de cobalt mais avec une densité d'énergie insuffisante pour être adaptée aux produits portables.

Types de batteries Li-ion	Année	Energie (Wh/Kg)	Nombre de cycles
LCO	1991	160	300
LMO	1996	140	300
NCA	1999	240	500
LFP	1998	120	2000
NMC	2006	200	500

**Tab. 1** : Comparatif des technologies Li-ion

Sont ensuite apparues les technologies à haute teneur en nickel avec le NCA (1999), Lithium Nickel Cobalt Aluminium (80 % de Ni, 15% de Co et 5 % d'Al) qui offre un gain significatif en densité d'énergie et une plus grande stabilité en cyclage. C'est la technologie utilisée aujourd'hui par TESLA pour ses batteries de VEH. (Rq : au sein de la technologie NCA, TESLA a quasiment divisé par deux la part de Cobalt entre ses premiers modèles de batteries en 2009 et les modèles actuels)

Apparait au même moment la technologie LFP (1998) Lithium Fer Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ) dont la densité d'énergie est moindre mais offre une meilleure cyclabilité et une meilleure stabilité thermique des cellules. Bien que les matériaux constitutifs soient moins chers, les contraintes de fabrication pour obtenir une batterie performante sont importantes (notamment sur l'absence totale d'humidité qui entrainerait une diminution rapide des performances) et le cout de revient final d'une batterie reste proche des technologies NCA et NMC.

Depuis 2006, c'est la technologie NMC, Lithium Nickel Manganèse Cobalt, qui est en forte croissance. Elle assure une bonne densité d'énergie, permet de nombreuses variantes qui jouent sur les proportions de Ni/Mn/Co et donnent divers gains ou pertes en densité d'énergie ou de puissance/charge-décharge/cyclage. Globalement, cette technologie évolue actuellement vers des teneurs de plus en plus importantes en nickel.

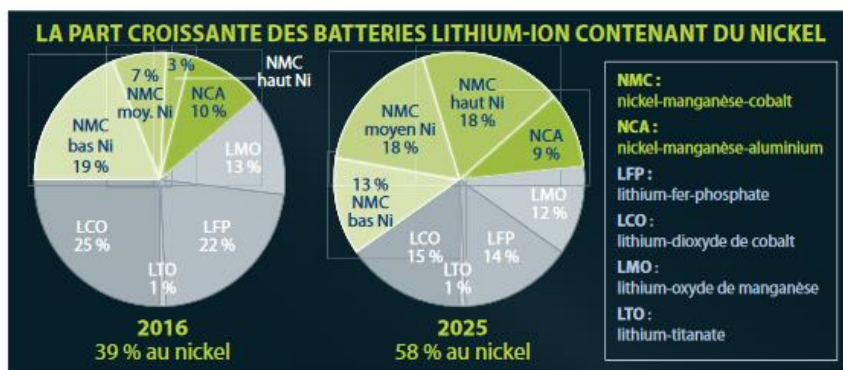
Après les premières générations appelées NMC-111 (proportion 1/3 de chaque élément), sont apparues ensuite les NMC-622 (60% ; 20%, 20%) et aujourd'hui les NMC-811 (80%, 10%, 10%) fabriquées notamment par SK Innovation et LG Chem commencent à pénétrer le marché.

Actuellement la technologie NMC est majoritaire (avec LCO) sur les produits portables.

Sur les VEH on trouve en majorité les technologies NMC, NCA (TESLA) et LFP (utilisés par plusieurs constructeurs chinois, notamment pour les bus électriques) et LMO.



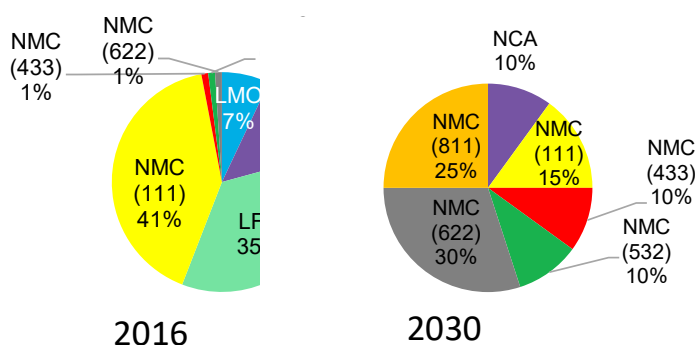
Au global, le Nickel Institute prévoit une augmentation de la part des batteries au Nickel dans les années à venir.



**Fig. 1 :** évolution des typologies de cathodes sur le marché des batteries Li-ion

\*Source Nickel Institute : NICKEL, VOL. 32, N° 1, MAI 2017<sup>131</sup>

L'agence Bloomberg pour sa part, prévoit d'ici 2030 (en ce qui concerne les batteries de VEH) une très large domination des batteries NMC (avec des teneurs en nickel de plus en plus importantes) et une disparition totale des technologies LMO et LFP.



**Fig 2 :** Evolution des typologies de cathodes de batteries Li-ion pour batteries de VEH

Source: Bloomberg New Energy Finance Note (2017)

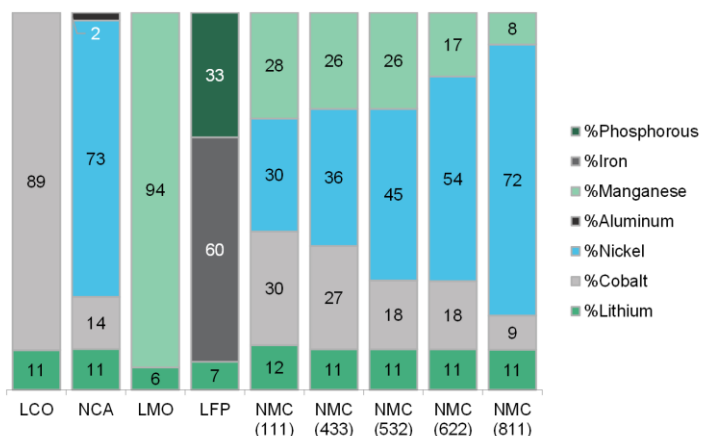
Etant donné que les matériaux valorisables par les procédés de recyclage actuels se trouvent essentiellement dans la cathode, la variété des technologies Li-ion aura un impact sur le rendement de ces procédés.

Types de batteries Li-ion (nature des cathodes)	Li (en Kg/KWh)	Co (en Kg/KWh)	Ni (en Kg/KWh)	Mn (en Kg/KWh)
LCO	0,113	0,959	0	0
NCA	0,112	0,143	0,759	0
NMC-111	0,139	0,394	0,392	0,367
NMC-622	0,126	0,214	0,641	0,200
NMC-811	0,111	0,094	0,750	0,088

**Tab.2 :** Composition matière des cathodes en Kg/ kWh<sup>132</sup>

<sup>131</sup> [https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/Magazine/Volume32/Vol321/NickelVol32No1May2017\\_FR\\_FB.ashx](https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/Magazine/Volume32/Vol321/NickelVol32No1May2017_FR_FB.ashx)

<sup>132</sup> Source MIT : [https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(17\)30044-2.pdf](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(17)30044-2.pdf)



**Fig3** Composition des cathodes en % de chacun des composants

Source: Bloomberg New Energy Finance Note (2017) : The numbers associated with NMC represent the ratio of Nickel:Manganese:Cobalt in each particular blend.

La technologie Li-Po (lithium polymère) est utilisée presque exclusivement pour l'aéromodélisme et les drones, du fait du gain de poids lié à son enveloppe souple. En revanche ce système présente des fragilités (risque de percement, étanchéité des soudures, sensibilité aux chocs) et un cyclage moins important qui limitent son utilisation. Cependant, bien que cela ne soit pas pratiqué actuellement, on pourrait imaginer un assemblage de cellules individuelles de Li-Po au sein d'un casing pour en faire des packs batteries utilisables par exemple sur des VEH.

#### Electrolyte :

Le lithium étant très réactif au contact de l'eau, on utilise des électrolytes non-aqueux. Le plus souvent, ce sont des sels de lithium ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$  ou  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ , ou encore  $\text{Li}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$ ) dissouts dans un solvant organique (carbonate de diméthyle, carbonate de propylène, d'éthylène ou de diéthyle, dimethyl sulfoxide -DMSO). Le  $\text{LiPF}_6$  est de loin le plus courant.

L'ensemble de la cellule baigne dans l'électrolyte qui peut contenir des additifs supplémentaires pouvant avoir des fonctions et des propriétés variées telles que la protection de la cathode, la stabilisation des sels de lithium, agent ignifugeant, amélioration de la solvabilité, anti-corrosion, ...etc

A l'avenir la technologie Li-ion devrait évoluer vers des électrolytes solides inorganiques (verres à base d'oxyde ou de sulfure) ou organiques (polymères).

#### Séparateur :

Les séparateurs sont des films poreux inertes vis-à-vis des électrolytes liquides utilisés. Les matériaux les plus courants utilisés sont à base de polyoléfines, polyéthylène (PE) et/ou polypropylène (PP).

Les différents éléments s'empilent en couches successives (cathode, séparateur, anode), baignées dans l'électrolyte.

La composition moyenne des batteries Li-ion est donc assez variable en fonction des technologies de cathode :

	NCA	LMO	NMC*	LCO	LFP
<b><u>fractions métalliques</u></b>					
Aluminium	21,90%	21,70%	22,72%	5,20%	6,50%
Cobalt	2,30%	0,00%	8,45%	17,30%	0,00%
Cuivre	13,30%	13,50%	16,60%	7,30%	8,20%
Fer/acier	0,10%	0,10%	8,79%	16,50%	43,20%
Lithium	1,90%	1,40%	1,28%	2,00%	1,20%
Manganèse	0,00%	10,70%	5,86%	0,00%	0,00%
Nickel	12,10%	0,00%	14,84%	1,20%	0,00%
<b><u>Autres fractions</u></b>					
Anode graphite	16,50%	16,30%	N/A	23,10%	13,00%
Electrolyte	11,70%	11,80%	N/A	14,00%	14,90%
Autres (séparateurs, liants, plastiques...etc)	20,20%	24,50%	N/A	13,40%	13,00%

**Tab. 3** : composition matière des batteries Li-ion (en % du poids total hors BMS et casing)<sup>133</sup>

\*cette composition moyenne correspond à une cathode de type NMC-622

Pour compléter ce bilan de composition, il faut souligner que la partie extérieure des batteries qui comprend le casing, le BMS et le câblage représente selon les typologies de batteries entre 35 et 50 % du poids total de la batterie.

<sup>133</sup> Source : A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries (Kevin M. Winslow, Steven J. Laux, Timothy G. Townsend - Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida ) - Article in Resources Conservation and Recycling · February 2018

# **ANNEXE 7**

## **Description des procédés de recyclage des batteries Li-ion**

### Table des matières

1.	<a href="#">ON TO TECHNOLOGY (Valorisation directe)</a>	156
2.	<a href="#">UMICORE</a>	158
3.	<a href="#">ACCUREC</a>	160
4.	<a href="#">INMETCO et GLENCORE (Ex-Xstrata)</a>	162
5.	<a href="#">SUMITOMO METAL MINING</a>	162
6.	<a href="#">RETRIEV TECHNOLOGIES (TOXCO)</a>	164
7.	<a href="#">RECUPYL</a>	167
8.	<a href="#">AKKUSER</a>	169
9.	<a href="#">DUESENFELD</a>	170
10.	<a href="#">SNAM</a>	172
11.	<a href="#">EURODIEUZE</a>	172

### **Introduction**

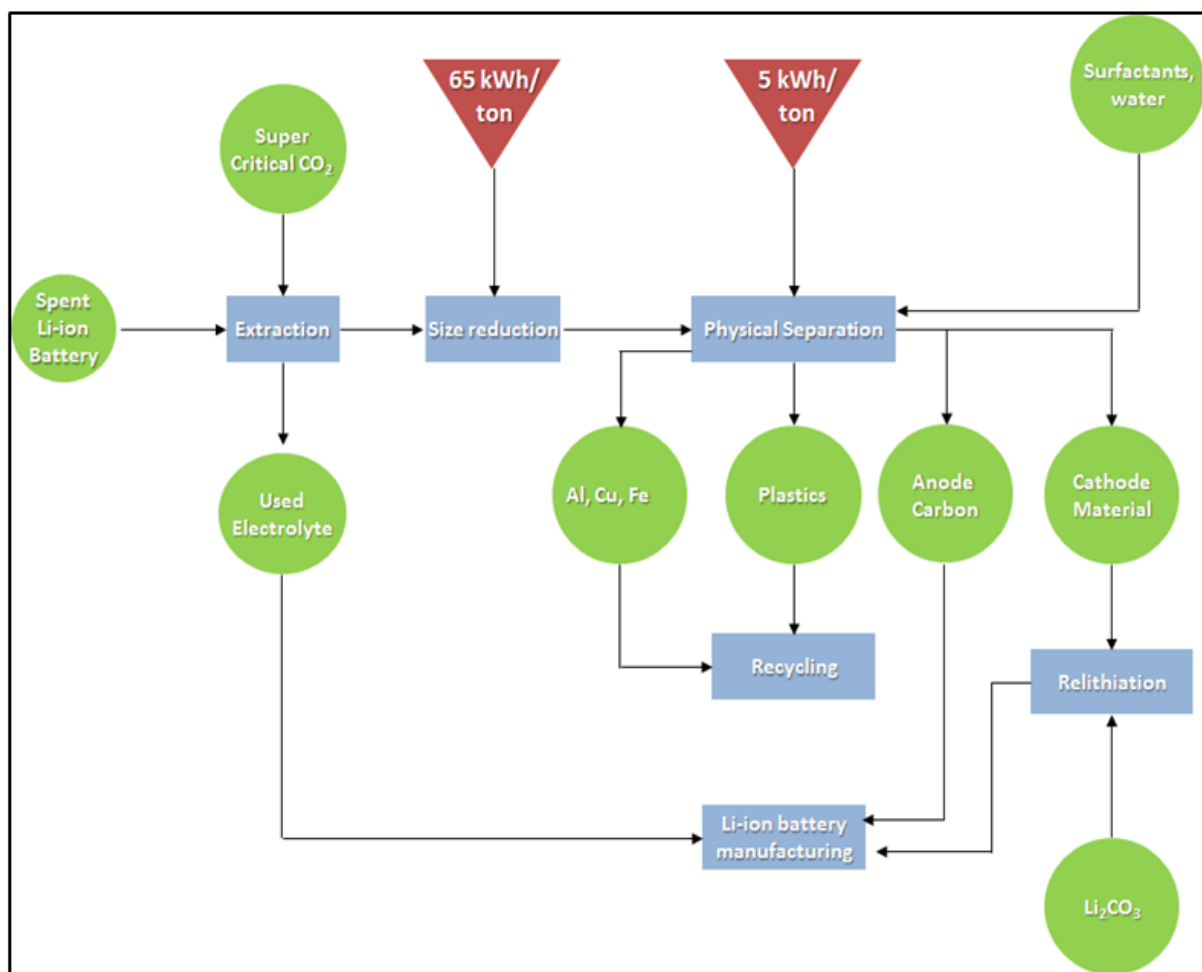
Cette annexe décrit les principaux procédés mis en œuvre par les recycleurs de batteries Li-ion. Ils correspondent aux procédés des principaux acteurs ou aux procédés ayant une valeur d'exemplarité. Ainsi nous décrivons le procédé de valorisation directe mis au point par On To Technology alors qu'il n'est qu'à l'état de pilote industriel, celui de Duesenfeld (qui résulte du programme de recherche LITHOREC) qui est en cours de développement ou encore celui de Recupyl qui n'a jamais été mis en œuvre dans son intégralité ; la société Recupyl est en cessation de paiement depuis Aout 2018.

## 1. ON TO TECHNOLOGY (Valorisation directe)

### Niveau de développement : PILOTE INDUSTRIEL

Le procédé développé par On To Technology vise à récupérer les matériaux constitutifs des cathodes dans une logique de « valorisation directe ». Il présente l'avantage d'être particulièrement économe en énergie. Ce procédé a fait l'objet de plusieurs dépôts de brevets successifs entre 2011 et 2017. Les premiers brevets décrivent la méthode de récupération des électrolytes et le traitement des cellules. Les suivants focalisent plus spécifiquement sur le reconditionnement/régénération des matériaux de la cathode.

Le schéma ci-dessous présente le procédé de traitement des cellules.



Après décharge et désassemblage des cellules de la batterie, la récupération de l'électrolyte est réalisée en utilisant du CO<sub>2</sub> en phase supercritique (74 bars et 31°C) ce qui lui donne les propriétés d'un solvant.

Les cellules sont introduites au sein d'un contenant dans lequel on injecte du CO<sub>2</sub>. On augmente la pression et la température jusqu'à ce que le CO<sub>2</sub> atteigne une phase supercritique.

Le processus d'extraction de l'électrolyte par dissolution et notamment du LiPF<sub>6</sub> peut être amélioré par l'addition d'autres solvants.

Dans le même temps, l'addition d'une solution contenant du lithium permet la récupération de lithium sous forme de carbonate (par réaction avec le CO<sub>2</sub> pour former du Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Le procédé prévoit aussi

un ajout d'air pour éviter la formation de CO. Enfin, l'augmentation de la pression jusqu'à 138 bars améliore la formation de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ .

L'électrolyte est ensuite récupéré dans un container où le  $\text{CO}_2$  est refroidi et détendu ce qui entraîne la précipitation des sels et solvants qui forment l'électrolyte.

À la suite de cette étape, les cellules ne contiennent plus que les électrodes et séparateurs.

2 options sont alors possibles :

Si l'enveloppe est intacte et que les cellules sont fonctionnelles et éligibles pour un réemploi, elles sont alors reemplées avec un nouvel électrolyte, scellées et rechargées.

Si les cellules ne sont pas éligibles au réemploi, elles sont alors recyclées.

Le recyclage consiste en un broyage dans un environnement sec et sans oxygène. Les matières actives des électrodes sont décollées des collecteurs par utilisation d'un solvant adéquat et agitation ultrasonique.

Les matières sont ensuite séparées par des procédés physiques non détaillés et qui peuvent être des procédés de filtration, flottation, décantation, basés sur la densité des matières...etc.

Les fractions résultantes sont des oxydes de métaux (matière active de la cathode), du carbonate de lithium, du graphite, du plastique, du cuivre, de l'aluminium et de l'acier qui d'après On To Technology peuvent être réutilisés sans que les exutoires soient précisés.

La récupération de l'électrolyte est un élément clé du procédé, ce qui le distingue de la plupart des autres procédés de recyclage des batteries Li-ion. Cependant, on n'a pas d'information sur la qualité des composants de l'électrolyte récupérés et sur la manière dont ils pourront être réutilisés. Par exemple, quid de l'éventuelle dégradation des sels de lithium ou de l'élimination des solvants additionnels utilisés pour l'extraction ?

Dans le cas d'un possible réemploi de cellule, on n'a pas non plus d'information sur une éventuelle dégradation liée à la mise sous haute pression (qui pourrait endommager la structure cristalline du graphite). De même le procédé ne précise pas le devenir du liant des matériaux de cathode (PVDF) qui sans élimination complète peut limiter la possibilité de réutilisation.

La réutilisation des matériaux de cathode après relithiation a bien été testée avec des performances équivalentes à des cathodes neuves mais seulement sur quelques dizaines de cycles.

Enfin dans le cas d'une réutilisation des cellules réassemblées en pack, il n'y a pas de garanties concernant l'homogénéité des performances de chaque cellule, or des performances hétérogènes des cellules nuisent à la durée de vie de la batterie.

En conclusion, le procédé On To Technology tel qu'il est décrit suscite encore de nombreuses questions. Depuis la mise en œuvre d'un pré-pilote industriel en 2015, le procédé n'a pas encore franchi le passage à une échelle industrielle.

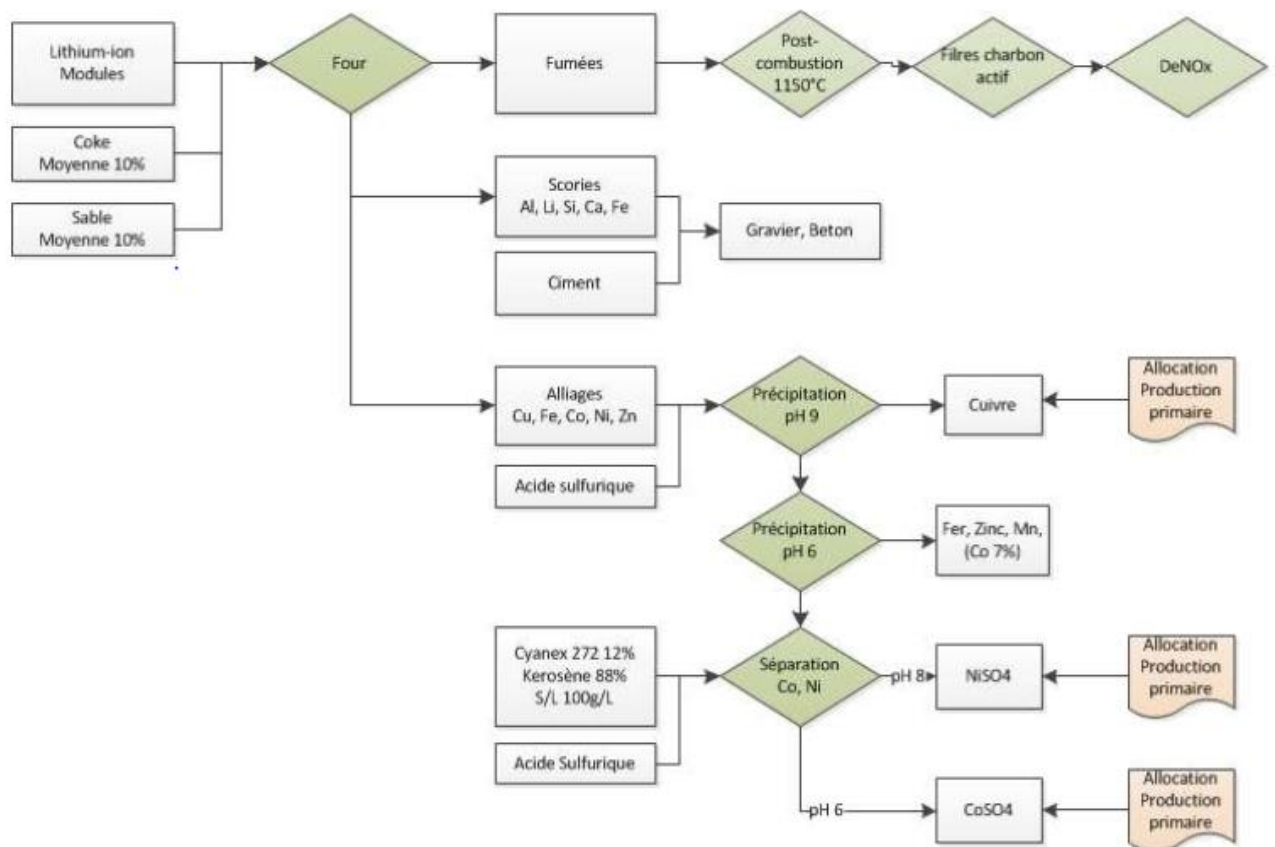
## 2. UMICORE

### Niveau de développement : INDUSTRIEL

Le procédé utilisé par Umicore combine de la pyro-métallurgie à basse et haute température, ainsi que des méthodes hydro-métallurgiques de récupération des métaux.

Le prétraitement est évité pour les batteries de petite taille. En revanche les batteries de véhicules électriques sont démantelées à Hanau en Allemagne pour soustraire les modules de leur emballage le plus souvent constitué d'acier ou d'aluminium.

Le procédé traite aussi bien les batteries Li-ion, Li-Po que Ni-MH.



Après démantèlement, les modules sont introduits directement dans un four, sans aucun traitement mécanique préalable. Le four comprend trois étages. Au premier étage, une première phase de préchauffage à 300 °C permet de faire évaporer l'électrolyte. Cette première phase se déroule dans un environnement pauvre en oxygène pour éviter l'explosion du lithium.

Au deuxième étage, on chauffe le matériel à 700 °C pour pyrolyser les matières organiques (plastiques, séparateurs).

Enfin, au troisième étage, une température de 1450 °C permet de fondre le matériel et réduire les oxydes métalliques. Une partie des matières organiques contenues dans les batteries sont utilisées comme agents réducteurs mais on ajoute également du coke.

En sortie du four, on obtient deux phases : un alliage et des scories.

Lithium, manganèse, terres rares et aluminium (ainsi qu'une partie du fer) se retrouvent dans les scories alors que l'alliage est un composé de cuivre, cobalt, fer et nickel.

Les scories peuvent être mélangées suivant un rapport de 30% de scories pour 10% de ciment pour être utilisées par la suite dans la construction en tant que ciment à prise rapide, sous l'appellation de betozand ou betogrand suivant le diamètre des particules. Cette méthode de valorisation a été utilisée par Umicore.

Les scories de batteries Li-ion peuvent également intégrer un process classique de production de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  à partir de minerai (spodumène). Umicore indique s'appuyer actuellement sur un partenariat extérieur pour cela.

Les scories de batteries Ni-MH peuvent être retraitées par SOLVAY pour concentrer les terres rares.

Les fumées sont chauffées par une torche à plasma afin d'éviter leur condensation, Na, Ca ou ZnO sont ensuite ajoutés afin de récupérer les halogènes et autres composés volatiles. Les gaz sont ensuite rapidement refroidis par injection de vapeur d'eau dans une chambre de postcombustion à 1150°C pour éviter la formation de dioxines et de furanes.

Un filtrage par charbon actif finalise le traitement des fumées. La chaleur est récupérée pour participer à la première phase d'évaporation des électrolytes.

L'alliage est ensuite traité par voie hydro-métallurgique par lixiviation à l'acide sulfurique avant récupération sélective des différents éléments métalliques.

Pour cela, la solution subit ensuite plusieurs bains de précipitation, le premier à pH 9 pour précipiter le cuivre, le second à pH 6 pour précipiter le fer, le manganèse et le zinc, mais également 7% du cobalt.

Enfin une extraction par solvant permet de séparer le nickel et le cobalt. Le solvant couramment utilisé est le Cyanex 272, dilué à 0,4M dans du kérosène.

On obtient ainsi du  $\text{NiSO}_4$  et  $\text{CoSO}_4$ .

### **L'ensemble du procédé est réalisé sur 3 sites différents.**

Le démantèlement est fait à Hanau en Allemagne (capacité 10 T / jour) , le traitement pyro-métallurgique est réalisé à Hoboken en Belgique (Capacité 7000 T /an) et le traitement hydro-métallurgique est réalisé sur le site de Olen en Belgique.

Alors que les procédés de démantèlement et le procédé pyro-métallurgique ont été développés spécifiquement pour traiter un flux de batteries, ce n'est pas le cas du site de Olen. Ce site existait déjà avec un procédé de production de  $\text{NiSO}_4$  et  $\text{CoSO}_4$  (qualité grade batterie) destiné à la fabrication de cathodes pour batteries Li-ion à partir de divers flux entrants concentrés en Ni et Co.

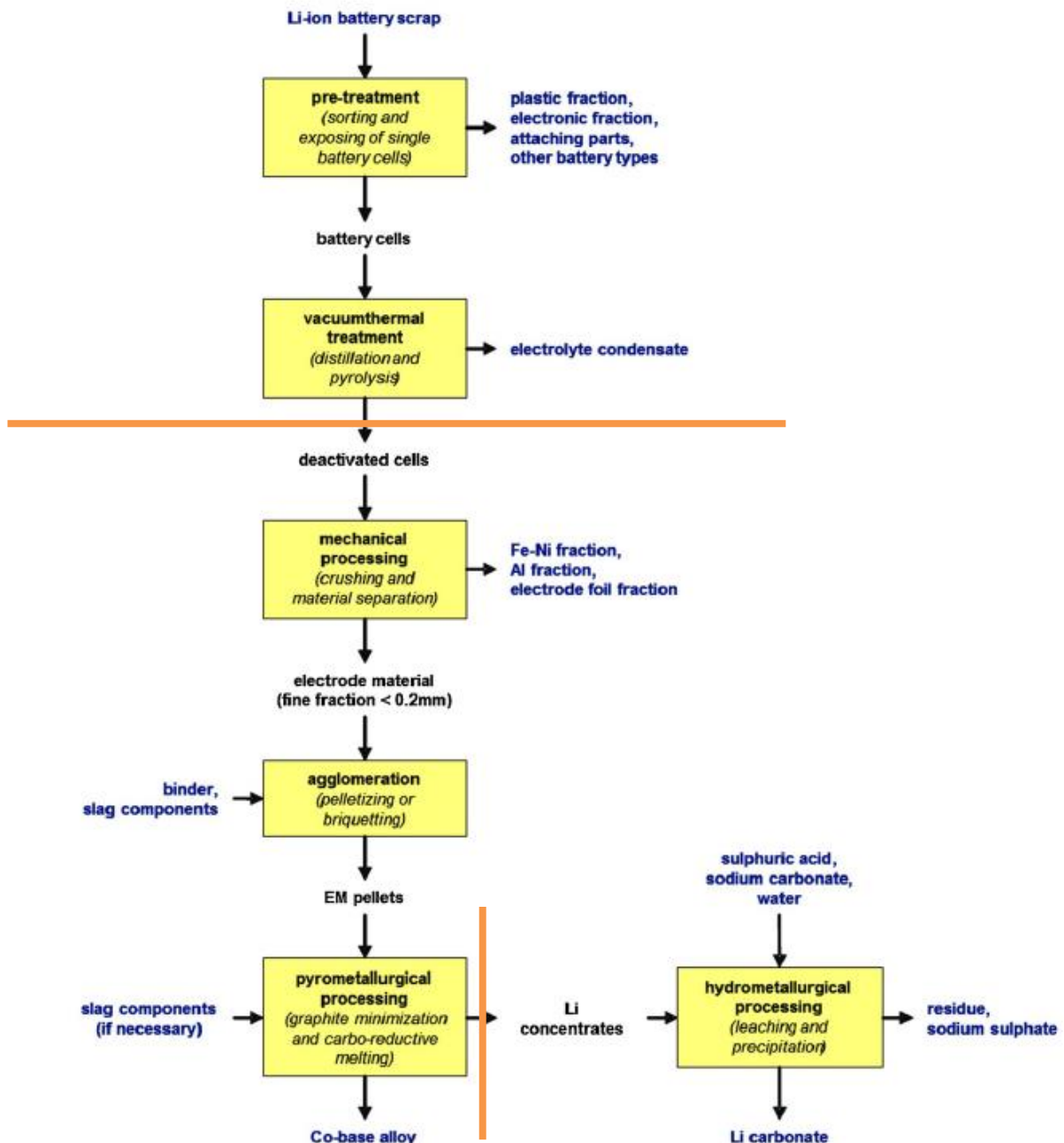
Umicore exploite également un site à Jiangmen en Chine avec un procédé similaire à celui de Olen et une capacité de production de 5000 T de matières actives pour cathode de batteries Li-ion.



### 3. ACCUREC

**Niveau de développement :** industriel pour les phase mécaniques et pyrométallurgie uniquement

Le procédé développé par ACCUREC combine des procédés mécaniques de séparation puis un traitement par voie pyro-métallurgique et hydro-métallurgique (non mis en œuvre actuellement). Il permet en théorie de récupérer un alliage de cobalt et du carbonate de lithium.



#### 1. Partie réalisée par un prestataire extérieur :

Les batteries sont d'abord démantelées manuellement, le plastique et l'acier constituant l'enveloppe, les parties électroniques et le câblage du BMS sont retirés.

Un premier traitement thermique (pyrolyse) est réalisé sous vide entre 250 et 600°C (pendant 1 à 2 h) qui permet de passiver les cellules et éliminer l'électrolyte et les composés organiques. Actuellement cette phase est toujours réalisée par un prestataire externe, l'entreprise BAYER Industries (cette partie du procédé devrait être intégrée courant 2019)

## **2. Partie réalisée par l'entreprise ACCUREC**

Une succession d'opération mécanique (broyage, tamisage, séparation magnétique et séparation densimétrique) permettent d'extraire une fraction de ferro-nickel, la fraction d'aluminium provenant de l'enveloppe des cellules et les fractions d'aluminium et cuivre provenant des collecteurs.

Ces fractions sont valorisées dans les industries métallurgiques correspondantes (sidérurgie, fonderie de cuivre, fonderie d'aluminium).

La fraction de fines résiduelles (<0.2mm) contient les oxydes de métaux des cathodes (Co, Mn, Ni, Li) et le graphite provenant des anodes.

Cette fraction est ensuite frittée avec un ajout de scories et un liant pour faciliter le traitement thermique.

Ce traitement pyro-métallurgique consiste en un premier traitement à 800°C dans un four rotatif pour réduire le graphite, et un deuxième dans un four à arc en sortie duquel on obtient un alliage à base de cobalt et nickel et des scories dans lesquelles on retrouve le manganèse et le lithium. Le lithium est aussi partiellement oxydé et se retrouve dans les fumées (avec une plus grande concentration que dans les scories)

L'alliage est semble-t-il valorisé dans la fabrication de superalliages.

Les scories peuvent être valorisées en sous-couche routière.

## **3. Partie théorique, non réalisée (lixiviation et précipitation du Lithium)**

Aussi bien le lithium des scories que celui des fumées peuvent ensuite être potentiellement récupérés par lixiviation (les scories devront préalablement être broyées à nouveau avec une taille < 100 microns) en utilisant de l'acide sulfurique.

Le lithium peut ensuite être précipité sous forme de Carbonate ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), avec selon ACCUREC la possibilité de récupérer plus de 90 % du lithium de qualité suffisante pour être valorisée dans la fabrication de batteries ou dans l'industrie du verre.

Cette partie du procédé n'est pas mise en œuvre aujourd'hui car elle n'est pas économiquement viable.

Le procédé de recyclage mis en œuvre par ACCUREC s'adresse au départ au traitement de batteries LCO mais accepte aujourd'hui tous types de batteries Li-ion.

Cependant, aucune information n'est donnée concernant l'impact de la diversité des chimies sur la qualité des produits en sortie (en particulier les ajustements nécessaires concernant la composition des scories ajoutées au niveau du four à arc).

On peut penser qu'un tel procédé est relativement long et cher pour ne produire finalement qu'un alliage de Cobalt / Nickel à destination de l'industrie sidérurgique.

ACCUREC affirme que le procédé est rentable pour un cours du cobalt > 20 000 USD/T et un gisement entrant de 1000 Tonnes (ce qui correspond à une consommation d'énergie de 0,5 MVA). Mais la moindre utilisation de cobalt dans la fabrication de cathode pourrait dégrader l'équation économique à l'avenir et nécessiter une adaptation du procédé<sup>134</sup>.

---

<sup>134</sup> Development of a recycling process for Li-ion batteries - T. Georgi-Maschler, B. Friedrich, R. Weyhe, H. Heegn, M. Rutz (Journal of Power Sources 207 (2012) 173– 182)

## 4. INMETCO et GLENCORE (Ex-Xstrata)

### **Niveau de développement : INDUSTRIEL**

Ces deux procédés ne sont pas dédiés spécifiquement au recyclage des batteries Li-ion.

Le procédé d'INMETCO a été développé initialement pour traiter les poussières provenant de four à arc. Ce procédé permet uniquement de récupérer un alliage de Cobalt, Fer et Nickel, les autres fractions métalliques se retrouvent dans les scories qui ne sont pas valorisées, les fractions organiques participent à l'apport d'énergie et à la réduction des oxydes métalliques.

Le procédé de GLENCORE (ex – Xstrata) a été initialement développé pour traiter un minerai riche en Nickel, Cobalt et Cuivre. Il ne vise qu'à récupérer le Cobalt, le Cuivre et le Nickel par une combinaison de procédé pyro et hydro-métallurgique, les composés organiques participent à la combustion et servent d'agents réducteurs ou se retrouvent dans les scories non valorisées.

Les batteries sont traitées sur le site de Sudbury (Ontario). Le flux de batterie ne représente qu'une part anecdotique des 550 000 tonnes traitées annuellement par le site.

Le volet hydro-métallurgique produit notamment un composé cobalté qui est ensuite envoyé sur une autre usine située en Norvège (Glencore Nikkelverk AS située à Kristiansand) qui produit alors du cobalt sous forme métallique par électrolyse.

Les batteries n'étant qu'un intrant complémentaire dans ces procédés, ils ne prennent pas en compte les problématiques spécifiques aux batteries Li-ion.

Ces procédés apparaissent comme compétitifs sur le plan économique mais avec des rendements de recyclage relativement faibles et des produits en sortie de qualité insuffisante pour être réutilisés dans la fabrication de nouvelles électrodes pour batteries.

## 5. SUMITOMO METAL MINING

### **Niveau de développement : INDUSTRIEL**

Le procédé présenté dès 1998 (dans le cadre d'un partenariat avec Sony) est appliqué aux batteries Li-ion. Il a pour objectif initial la récupération d'oxyde de Cobalt de qualité suffisante pour être réutilisé dans la fabrication de nouvelles batteries.

Peu d'informations sont disponibles concernant le détail du procédé.

Il est basé sur une première phase de calcination à 1000°C qui élimine l'électrolyte et les fractions organiques. Un traitement pyro-métallurgique permet ensuite de produire un alliage de Co, Ni, Cu, Fe alors que le Li se retrouve dans les scories.

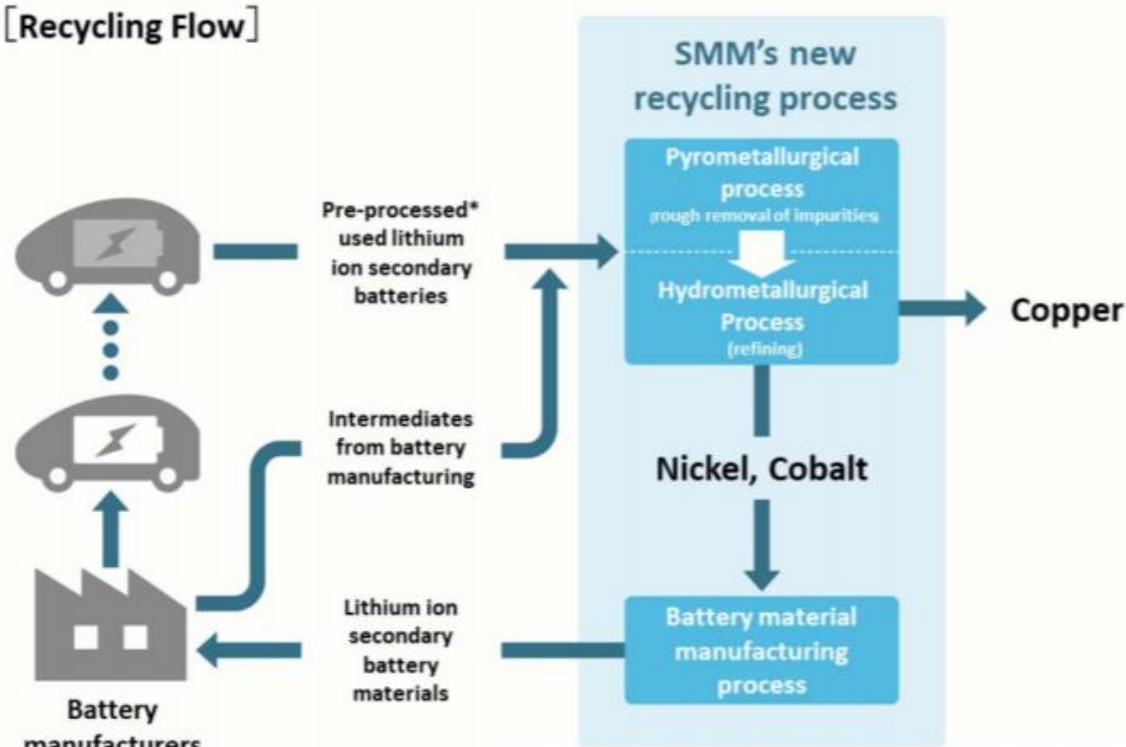
Un communiqué de presse de 2017<sup>135</sup>, explique que le Nickel est récupéré par voie hydro-métallurgique, sous forme de sulfate de Nickel qui peut être réutilisé pour la fabrication de cathodes de batteries Li-ion et que le cuivre est récupéré par électrolyse.

Le procédé est mis en œuvre sur deux sites distincts pré-existants: la partie pyro-métallurgie est réalisée sur le site de Saijo (fonderie et affinage du cuivre) alors que l'hydrométallurgie est réalisée sur le site de Niihama (affinage du nickel), les deux sites étant situés dans la préfecture d'Ehime au Japon.

---

<sup>135</sup> [http://www.smm.co.jp/E/news/release/uploaded\\_files/20170713\\_en.pdf](http://www.smm.co.jp/E/news/release/uploaded_files/20170713_en.pdf)

Un communiqué de presse de 2019<sup>136</sup> indique le démarrage d'un nouveau procédé dédié au traitement de batteries Li-ion qui combine pyro et hydrométallurgie sur le seul site de Niihama et qui permet en complément de récupérer le Cobalt sous forme d'oxyde.



\*Pre-processed: Neutralization through heat treatment, etc.

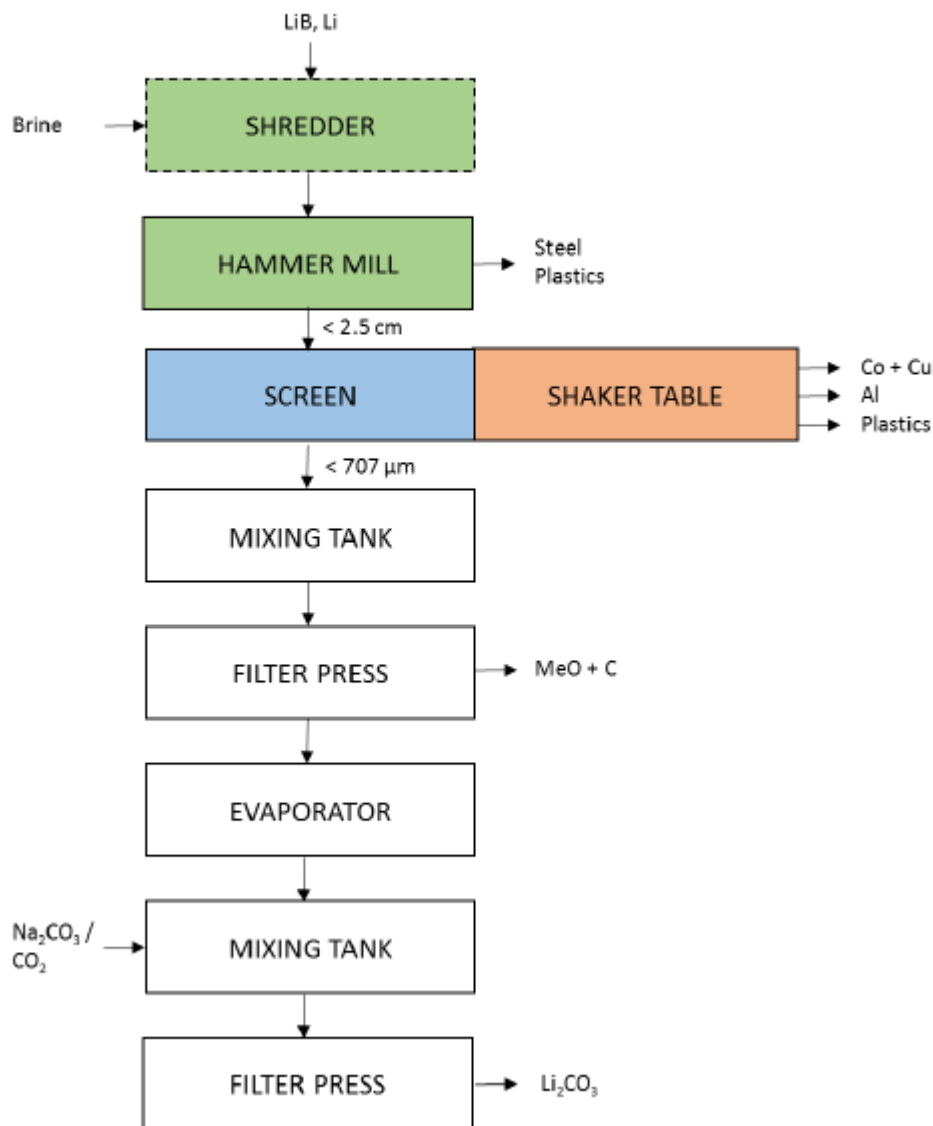
<sup>136</sup> [http://www.smm.co.jp/E/news/release/uploaded\\_files/20190328\\_E.pdf](http://www.smm.co.jp/E/news/release/uploaded_files/20190328_E.pdf)

## 6. RETRIEV TECHNOLOGIES (TOXCO)

### Niveau de développement : INDUSTRIEL

Le procédé mis au point par Retriev Technologies<sup>137</sup> a été développé au départ pour le recyclage de batteries li-ion primaires et ensuite adapté aux batteries li-ion rechargeables. Il traite les batteries lithium en mélange.

Le procédé combine une première phase de traitements et séparations mécaniques permettant de préparer la matière pour un traitement hydro-métallurgique.



Les batteries de VEH sont démantelées au préalable de manière manuelle.

Une première phase de broyage est réalisée la plupart du temps en saumure pour passiver les cellules et éviter une réaction violente du lithium.

A l'origine, Retriev Technologies utilisait de l'azote liquide, ce n'est plus le cas aujourd'hui sauf en présence d'une forte proportion de lithium primaire pour lequel le risque d'incendie est plus important.

<sup>137</sup> Brevet correspondant : US5888463A (30/03/99) – Retriev technologies

La boue obtenue à l'issue de cette première phase de fragmentation contient encore toutes les matières contenues dans les batteries en début de procédé. Plastiques et métaux ferreux sont séparés à ce stade par une méthode qui n'est pas explicitée.

Le reste est tamisé, la fraction supérieure passe ensuite sur une table densimétrique permettant de séparer le cobalt et le cuivre, l'aluminium et le plastique.

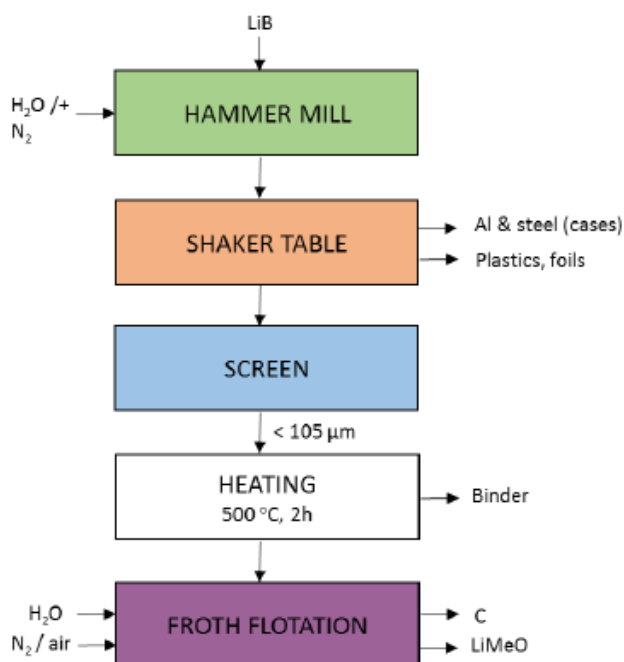
Les fractions métalliques obtenues sont valorisées dans la production d'aciers.

La fraction inférieure est ensuite pressée et filtrée. On obtient un « cake » contenant un mélange d'oxydes métalliques et de carbone (graphite) alors que la phase liquide contenant du lithium est traitée par un ajout de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ou  $\text{CO}_2$  afin d'obtenir du  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (avec une pureté > 99%)

Les fractions d'oxydes métalliques et celle contenant le  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  trouvent des voies de valorisation dans des industries métallurgiques sans qu'il soit nécessaire d'affiner la pureté des fractions même si elles ne permettent pas une réutilisation en boucle fermée.

Ce procédé est mis en œuvre à échelle industrielle sur le site de Trail (Province Colombie Britannique – Canada). Retriev technologie exploite un autre site situé à Lancaster (Ohio – Etats-Unis) sur lequel sont traitées les batteries Ni-Cd et Ni-MH

Retriev Technologies a également déposé un brevet pour un procédé de valorisation directe permettant de régénérer les matériaux de la cathode (à partir de batteries de VEH).



Le procédé de régénération commence par une étape mécanique de broyage humide éventuellement dans un environnement neutralisé (azote). Les fractions sont ensuite séparées par une table densimétrique qui permet d'extraire l'aluminium, les métaux ferreux, les plastiques et collecteurs (Al et Cu). La fraction restante contenant le graphite de l'anode et les matériaux de la cathode est tamisée puis chauffée à 500°C dans une atmosphère pauvre en oxygène. Ce traitement qui dure 2 heures permet d'éliminer le liant sans enflammer le carbone.

La dernière étape consiste à mélanger les matières avec de l'eau distillée avec ajout d'air ou d'azote, pendant 30 minutes dans un dispositif de flottation. Le graphite de l'anode reste en surface alors que les composés métalliques de la cathode sont récupérés au fond et utilisés pour la fabrication de nouvelles cathodes.

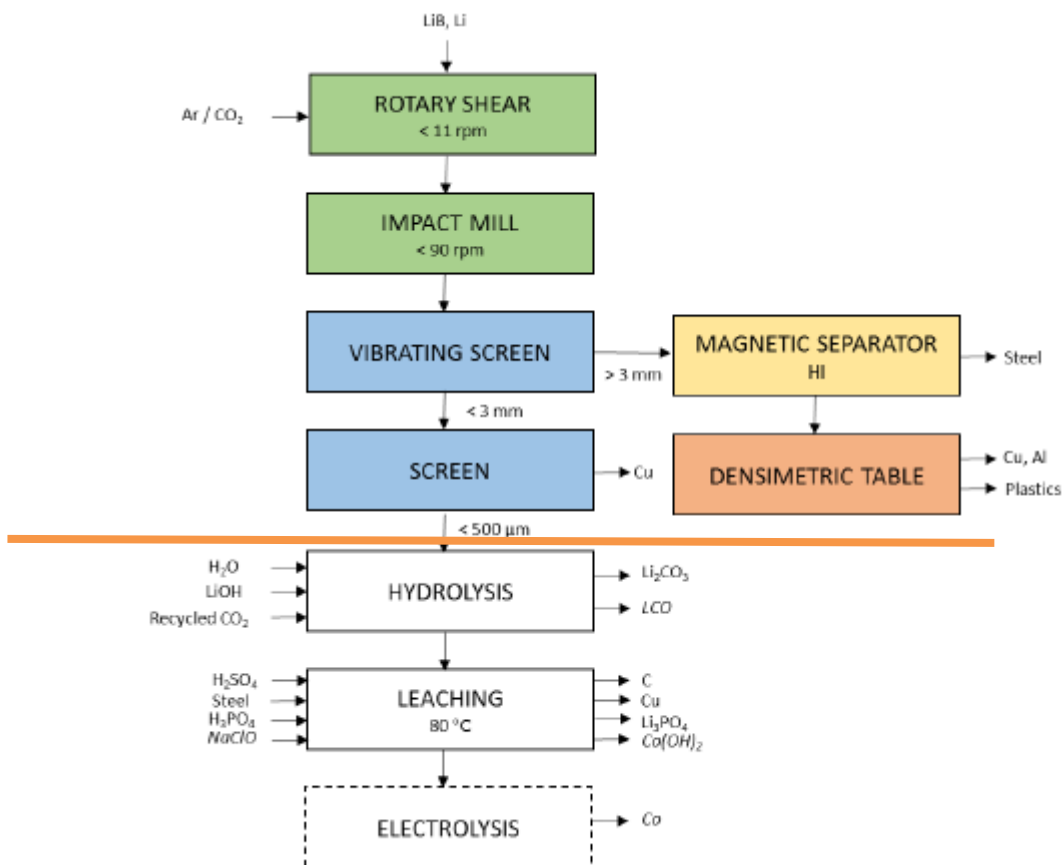
Ce procédé n'est actuellement pas mis en œuvre.

## 7. RECUPYL

**Niveau de développement : Non exploité actuellement (le volet hydrométallurgie n'a jamais été mis en œuvre à une échelle industrielle)**

Brevet correspondant : EP1733451B1 (08/08/2007) – RECUPYL SA

Le procédé développé par RECUPYL a pour objectif de maximiser la récupération de matières avec un procédé à basse température. Ce procédé est décrit par le schéma ci-dessous, il traite aussi bien les batteries Li-ion que les batteries Li-Po.



Pour des raisons de sécurité, la première phase de réduction des fractions dans une cisaille rotative est réalisée en atmosphère inerte (Ar, CO<sub>2</sub>). Après une deuxième phase de réduction utilisant un broyeur à impact, on sépare la fraction > 3mm.

Sur cette fraction, une séparation magnétique permet d'extraire les fractions ferreuses avant que la fraction restante ne passe sur une table densimétrique à l'issue de laquelle on obtient une fraction de métaux non-ferreux (Cu, Al) et une autre fraction contenant plastique et autres résidus de faible densité.

On extrait également le cuivre de la fraction < 3 mm riche en oxydes de métal et en graphite par un tamisage supplémentaire à 500 microns. Cette étape qui réduit la quantité de cuivre à moins de 0,3 % permet d'améliorer la phase ultérieure de lixiviation.

Le site Recupyl situé à Domène (Isère) a cessé son activité en Aout 2018.



**La suite du procédé n'a jamais été mise en œuvre par Recupyl. La blackmass obtenue était envoyée vers Nickelhütte Aue en Allemagne pour un traitement hydro-métallurgique complémentaire. Le site Recupyl a fermé ses portes en Aout 2018.**

La suite du procédé décrit dans le brevet consiste à récupérer le composé obtenu, le mettre en suspension dans de l'eau et mélanger fortement. On ajoute du LiOH qui permet d'augmenter le PH à 12 avant hydrolyse. Le dégagement potentiellement dangereux de H<sub>2</sub> résultant de l'hydrolyse est contrôlé par la vitesse d'alimentation et en créant une turbulence à la surface du bain. La réaction d'hydrolyse a pour conséquence de dissoudre les sels de lithium dans l'eau alors que les autres composés d'oxydes métalliques et graphite restent non solubles.

Le lithium peut ensuite être récupéré sous forme de carbonate (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Pour cela il suffit d'ajouter du CO<sub>2</sub> gazeux (on peut récupérer le CO<sub>2</sub> produit lors de la phase de broyage) dans la solution de sels de lithium et de baisser le PH à 9 pour que le lithium précipite sous forme de carbonate. A ce stade on pourra également récupérer du cobalt sous forme d'oxyde de cobalt lithié.

Le reste de la solution, contenant le graphite et les oxydes de métaux de la cathode est traité par lixiviation à 80°C en utilisant de l'acide sulfurique. Le graphite est extrait par filtration.

Le cuivre résiduel, sous forme de sel est précipité par cémentation avec du fer (le cuivre précipite à la surface du fer par la réaction  $\text{Cu}^{2+}_{(aq)} + \text{Fe}_{(s)} \rightarrow \text{Cu}_{(s)} + \text{Fe}$ )

Le lithium résiduel est précipité sous forme de Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> par ajout de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> et ajustement du pH.

Enfin le Cobalt peut être récupéré par précipitation sous forme de Co(OH)<sub>2</sub> en utilisant du NaClO.

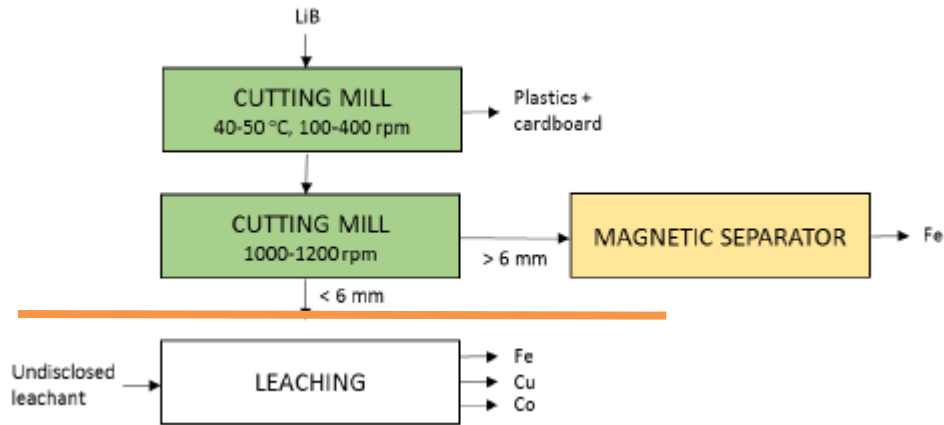
Il peut également être récupéré par électrolyse sous forme élémentaire.

Le brevet correspondant décrit également la récupération des éléments de la cathode pour la technologie LFP mais ce procédé n'a jamais été mis en œuvre.

## 8. AKKUSER

### Niveau de développement : INDUSTRIEL

AkkuSer a développé un procédé de broyage sec et à basse température pour réaliser la séparation des éléments de batteries avant un traitement pyro ou hydro-métallurgique.



Le procédé consiste à réduire la taille des éléments au travers de deux étapes successives. La première utilise un broyeur à couteaux à rotation lente, à la température de 40 à 50°C, pour obtenir une granulométrie de 1,25 à 2,5 cm.

Il ne semble pas y avoir d'atmosphère neutre, la lenteur de l'opération servant à minimiser le risque d'incendie. En revanche, la chambre de broyage est équipée d'un extracteur d'air pour évacuer H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> relâchés pendant l'opération.

Le flux d'air est filtré une première fois pour séparer les fractions légères (plastiques principalement). Il est ensuite traité une deuxième fois pour être purifié avant d'être relâché dans l'atmosphère.

Pour produire un composé riche en métaux, une deuxième étape de fragmentation est mise en œuvre avec un broyeur à couteaux à vitesse rapide qui aboutit à une granulométrie < 6 mm. Le transfert d'un broyeur à l'autre se fait par un conduit sous air comprimé équipé d'un dispositif de refroidissement.

Un extracteur d'air récupère également les poussières.

Après séparation magnétique des ferreux, on obtient un composé riche en Co, Cu, Li, Mn et Ni qui peut être traité par pyro ou hydro-métallurgie.

Cette black-mass est ensuite envoyée vers un autre métallurgiste qui pourra extraire les différents métaux par lixiviation, précipitation, extraction par solvant... etc

Cependant, on ne connaît pas la composition exacte de cette black-mass. La description du procédé ne mentionne pas par exemple la présence d'aluminium (provenant des collecteurs), de graphite...

L'énergie consommée est estimée à 0.3 kWh/kg.

Cependant il faut souligner que même si AkkuSer affirme que le procédé autorise plus de 90 % de taux de recyclage, il n'est en réalité qu'un prétraitement. Un traitement hydro-métallurgique reste nécessaire en complément qui consomme lui aussi de l'énergie et affecte aussi le rendement final de recyclage.

Le site d'Akkuser est localisé à Nivala en Finlande.

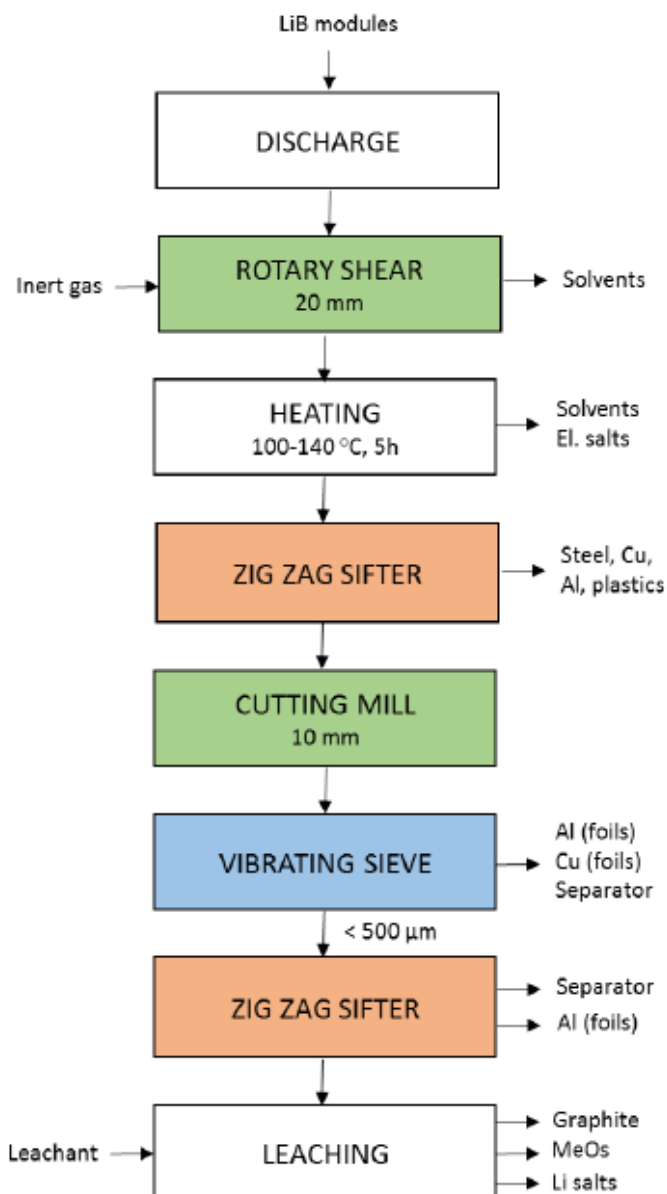
## 9. DUESENFELD

### Niveau de développement : industrialisation en cours

La société DUESENFELD a été créée en 2017 pour mettre en œuvre le procédé mis au point dans le cadre du programme de recherche LITHOREC II. La société a été créée par Christian Hanisch qui pilotait ce programme. Il a été développé spécifiquement pour recycler les batteries de VEH et il vise en particulier à recycler les technologies Li-ion de type NMC.

Sa particularité est qu'il combine plusieurs étapes de tri/séparation mécanique pour éliminer un maximum d'impuretés afin d'améliorer le rendement des procédés hydro-métallurgique utilisés dans la phase suivante.

L'objectif est ici encore de produire en sortie de procédé, des matériaux de qualité « grade batterie » pour être réutilisables en boucle fermée.



Après décharge et démantèlement des batteries, les cellules sont introduites dans une cisaille rotative, sous atmosphère inerte) avec un tamis en sortie, de maille 20 mm. Les solvants issus de l'électrolyte sont extraits et les gaz purifiés par charbon actif.

L'étape suivante de chauffage entre 100 et 140°C pendant 5h permet d'évaporer les solvants résiduels (qui peuvent être ultérieurement recondensés ou brûlés) et de décomposer les sels de lithium ( $\text{LiPF}_6$ ). Cette décomposition produit du fluorure d'hydrogène qui est traité au travers d'un épurateur de gaz.

Les matériaux passent ensuite au sein d'un séparateur à air en zigzag dont le but est de séparer les fractions les plus lourdes avant une deuxième phase de broyage avec un tamis en sortie, de maille 10 mm. Ceci permet de limiter la séparation des matières actives d'électrode des collecteurs et ainsi de ne pas accroître le taux d'impureté dans les fines qui forment la black-mass (un broyage trop important risquerait ici de fractionner les collecteurs qui se retrouverait alors dans les fines).

Après un tamisage à 500 microns permettant d'écarter les fractions de séparateur et de collecteur (Al, Cu), un nouveau passage au sein d'un séparateur à air en zigzag permet d'éliminer les résidus de matières légères (Al et séparateur)

L'ensemble de ces opérations mécaniques permet d'obtenir une black-mass formée des matières actives d'électrodes avec un faible taux d'impuretés (Al, Cu,..etc) afin de maximiser le rendement du procédé hydro-métallurgiques à suivre.

A ce stade, la suite du procédé n'est pas mise en œuvre par Duesenfeld, il est probable que la blackmass soit envoyée vers un affineur type Nickelhütte Aue.

Après lixiviation par  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , le graphite (non lixivié) est récupéré sous forme solide.

Les différents éléments métalliques sont ensuite récupérés de manière sélective sans que les procédés soient clarifiés à ce stade (Ni, Mn et Cu sous forme d'oxydes métalliques et le lithium sous forme d'hydroxyde ou de carbonate).

Le procédé LITHOREC est développé spécifiquement pour les cathodes de type NMC. Du fait de leur composition, les cathodes LCO et LMO devraient pouvoir intégrer le procédé.

La société Duensenfeld est implantée à Wendeburg en Allemagne

## 10. SNAM

### **Niveau de développement : Industriel (volet hydrométallurgie en cours de développement)**

La SNAM traite des accumulateurs Li-ion sur son site de Viviez (12).

Après démantèlement, les batteries Li-ion subissent une pyrolyse.

Cette pyrolyse permet d'éliminer les fractions organiques (plastiques, papiers, cartons) ainsi que les solvants (électrolytes).

La blackmass (concentré de métaux) ainsi obtenue est ensuite renvoyée vers des intermédiaires mettant en œuvre des procédés d'affinage afin d'extraire les métaux contenus. Un procédé hydrométallurgique est en cours de développement.

Interrogée sur les détails de son procédé et la nature des produits en sortie, la SNAM n'a pas souhaité communiquer.

## 11. EURODIEUZE

### **Niveau de développement : Industriel**

Eurodieuze est actuellement la seule société spécialisée dans le recyclage des piles et accumulateurs en France qui met réellement en œuvre un procédé hydro-métallurgique.

Les batteries Li-ion sont démantelées dans un premier temps afin d'en extraire les cellules.

Ces cellules sont ensuite broyées avant de subir un traitement hydro-métallurgique. Il s'agit d'une première étape de lixiviation par utilisation d'acide sulfurique puis de diverses méthodes non explicitées d'extraction permettant d'obtenir divers composés métalliques. Les composés métalliques obtenus (principalement des concentrés métalliques de Cobalt et Nickel sous forme d'oxydes, hydroxydes et/ou sulfates) sont ensuite valorisés auprès d'affineurs de métaux pour la production d'alliage ou de sels de métaux purifiés.

Interrogée pour cette étude, Euro Dieuze n'a pas souhaité communiquer plus de détails.

# **ANNEXE 8**

## **BIBLIOGRAPHIE**

### Généralités, technologies

- <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6107/6107-annexe-principe-de-fonctionnement-et-constituants-dune-batterie-ens.pdf>
- Influence de la recharge rapide sur les performances des accumulateurs lithium des véhicules électriques dans le cadre de l'utilisation postale (Habib Al Jed – université de Bordeaux – 2014 HAL archives ouvertes)
- Etude et développement de séparateurs pour une nouvelle architecture de batteries Li-ion à charge rapide (Damien Djian - INP Grenoble – 2006 HAL archives ouvertes)
- La course aux batteries électriques – IFRI – Juillet 2017  
[https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu\\_course\\_batteries\\_2017\\_0.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu_course_batteries_2017_0.pdf)
- Hydrogen Scaling up – Hydrogen Council Novembre 2017  
<http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- [AFHYPAC: L'hydrogène accélère en 2017 \(2018\)](#)
- World Energy Ressources – E-Storage 2016 (World Energy Council)  
[https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_E-storage\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_E-storage_2016.pdf)
- Levelized cost of Storage Analysis – LAZARD Novembre 2017  
<https://www.lazard.com/media/450338/lazard-levelized-cost-of-storage-version-30.pdf>
- Sodium–oxygen batteries: a new class of metal–air batteries (Shyamal K. Das, Sampson Laub and Lynden A. Archer – May 2014)
- Revue de presse francophone concernant le sujet des batteries entre le 01/01/2017 et le 01/12/2017 (> 1000 articles)

### Marché

- Battery storage for renewables: market status and technology outlook ( irena – janvier 2015)
- Principales technologies du stockage d'énergie au Japon (Ambassade de France au Japon – Aout 2016)
- Growing The Battery Storage Market 2018 Exploring Four Key issues (Energy Storage World Forum – Janvier 2018) Global EV outlook 2017 – International Energy Association (IEA)
- Global EV outlook 2018 – International Energy Association (IEA)
- Le tour du monde en autobus électriques par Pierre Langlois, PhD -24/02/2017
- La course aux batteries électriques, quelles ambitions pour l'Europe - Etude de l'IFRI (Carole Mathieu – Juillet 2017)
- Future of batteries, winners take all ? – ARTHUR D. LITTLE – Mai 2018
- Les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions (France Stratégie – Mai 2018)
- L'avenir de la voiture électrique se joue-t-il en Chine ? (Note d'analyse – France Stratégie Septembre 2018)
- Battery report 2018 (RECHARGE)

### Réglementation

- The Recycling Scheme for Compact Rechargeable Batteries in Japan - under the Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources ( Dr. Tomohiro Tasaki, National Institute of Environmental Studies, Japan) – Janvier 2014
- Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators (Final report – Trinomics / öko Institute) – Octobre 2018

### Seconde vie

- Etude de la seconde vie des batteries de véhicules électriques et hybrides rechargeables – ADEME Juin 2011
- Synthèse projet « Abattrelife » (Automotive Battery Recycling and Second Life) – ADEME octobre 2015

### Coût et disponibilité des métaux

- La transition énergétique face au défi des métaux critiques – Etude de l'IFRI (Gilles LEPESANT – Janvier 2018)
- Raw material for Li-ion and redoxflow batteries – Closeloop – Dr Pertti Kauranen – Nordbatt 2017 (Nov 2017 , Kokkola)
- Mineral Commodity Summaries 2018 – US Geological Survey  
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>
- Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals (MIT - Elsa A. Olivetti, Gerbrand Ceder, Gabrielle G. Gaustad and Xinkai Fu) - October 11, 2017. [https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(17\)30044-2.pdf](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(17)30044-2.pdf)
- Amnesty International : This is What We Die For"- Human Rights Abuses in the Democratic Republic of the Congo Power the Global Trade in Cobalt –January 2016  
[https://amnestyfr.cdn.prismic.io/amnestyfr%2F4db89ef9-168e-458f-9ff4-02d4fb280a03\\_time+to+recharge+report.pdf](https://amnestyfr.cdn.prismic.io/amnestyfr%2F4db89ef9-168e-458f-9ff4-02d4fb280a03_time+to+recharge+report.pdf)
- China Molybdenum & Co Ltd (CMOC) Annual report 2017 -  
[http://www.chinamoly.com/06invest/DOC/2018/E\\_03993\\_04207.pdf](http://www.chinamoly.com/06invest/DOC/2018/E_03993_04207.pdf)
- Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility ( JRC Science for Policy report – EU 2018)
- The growing role of minerals and metals for a low carbone future (World Bank – EGPS / Juin 2017)
- Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe (JRC – EU 2016)
- NICKEL : La revue spécialisée du nickel et de ses applications Vol 32, N°1, Mai 2017
- Recommandations du COMES pour le développement de compétences industrielles françaises dans le recyclage des métaux critiques (Mars 2018)
- Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy (Eleanor Drabik and Vasileios Rizos) - Juillet 2018
- Electrification du parc automobile mondial et criticite du lithium a l'horizon 2050 – ADEME Projet E<sup>4</sup>T – Octobre 2018
- La guerre des métaux (Guillaume Pitron) - 2018

### Recyclage et Procédés

- Recycling of Spent Lithium-Ion Battery : A Critical Review (Xianlai Zeng, Jinhui Li & Narendra Singh) Avril 2014
- The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course (Linda Gaines) – Novembre 2014
- Etude critique sur les procédés de recyclage des batteries rechargeables Lithium-ion et faisabilité (J. Dubu, Y. Lesueur, Y. Petroff, V. Poinsot, E. Sallé, M. Crochet) - Février 2016
- Critical review on Li-ion battery recycling technologies – Johanna Valio – Aalto University School of Chemical Engineering – May 2017
- Lithium Ion Battery Recycling: Imperative and Opportunity 5Adam Chase – E4 Tech) \_ Congrès de Nice octobre 2017
- A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries (Kevin M. Winslow, Steven J. Laux, Timothy G. Townsend - Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida) - Article in Resources Conservation and Recycling · February 2018
- A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries - Article in ACS Sustainable Chemistry & Engineering · December 2017  
<https://www.researchgate.net/publication/321782468>

- An investigation of the current status of recycling spent lithium-ion batteries from consumer electronics in China (Fu Gu, Jianfeng Guo, Xing Yao, Peter A. Summers, Samuel D. Widijatmoko, Philip Hall) Mai 2017
- Direct Recycling technology for plug-in electric vehicle li-ion battery packs (Final project report – March 2015) – Farasys Energy Inc.  
<https://www.energy.ca.gov/2016publications/CEC-500-2016-016/CEC-500-2016-016.pdf>
- Advances in Direct Recycling of Lithium-Ion Electrode Materials (OnTo technology , Mai 2018)  
<https://ecs.confex.com/ecs/233/webprogram/Paper110132.html>
- Randell Environmental Consulting, 2016. Waste Lithium-ion Battery Projections (Retrieved September 22, 2017 from <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/dd827a0f-f9fa-4024-b1e0-5b11c2c43748/files/waste-lithiumbattery-projections.pdf>)
- Comparison of Lithium-Ion Recycling Processes for Electric Vehicle Batteries (Jan Engel and Gretchen A. Macht, Ph.D. The University of Rhode Island - Kingston, RI) 2016.
- Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015 : Current State and Future Prospects (Chalmers University and technology)
- Description du procédé INMETCO pour le recyclage des batteries Ni-Cd  
<https://pdfs.semanticscholar.org/869d/dcc50e422146d67d7978d90cb8b54085257c.pdf>
- Procédés Ni-MH  
<https://www.climate-policy-watcher.org/rechargeable-batteries/nimh-batteries-recycling-scheme.html>
- Recycling of Ni-MH batteries - thèse de Philip Holmberg (Chalmers University of Technology – Sweden , 2017) <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249441/249441.pdf>
- Traitement de la matière active d'accumulateurs Ni-Cd en fin de vie par couplage Electrolxiviation/Electrodéposition (Thèse Claire HAZOTTE – université de lorraine, 2014)
- Development of a Highly Efficient Hydrometallurgical Recycling Process for Automotive Li-Ion Batteries - Honggang Wang, Bernd Friedrich // J. Sustain. Metall. (Avril 2015) 1:168–178 // DOI 10.1007/s40831-015-0016-6
- Gao, Wenfang & Liu, Chenming & Cao, Hongbin & Hong, Zheng & Lin, Xiao & Wang, Haijuan & Zhang, Yi & Sun, Z.H.I.. (2018). Comprehensive evaluation on effective leaching of critical metals from spent lithium-ion batteries. Waste Management. 75. 10.1016/j.wasman.2018.02.023.)
- Communiqué de Presse SAUBERMACHER/REDUX – 5 Juin 2018
- « Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling » ( Rikka Wittstock, Alexandra Pehlken and Michael Wark – Publication Décembre 2016)

### Impacts environnementaux

- The environmental impact of recycling Li-ion portable batteries (Thèse Anna Boyden – Australian National University – Décembre 2014)
- Development perspectives on Li-ion recycling processes for VEH batteries (Jan Engel, University of Rhode Islands – 2016)
- “Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ?” - Carbone 4 - Décembre 2017) disponible <https://europeanclimate.org/levehicule-electrique-dans-la-transition-ecologique-enfrance/>