

Recyclage

<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/electrochimie/le-recyclage-des-batteries-li-ion>

Le recyclage des batteries *Li-ion* est une opération délicate qui reste très peu automatisée pour le moment car il n'y a pas de normes de standardisation relatives à la conception des packs de batteries. C'est également une opération dangereuse qui présente des risques électriques (l'énergie résiduelle des packs de batteries peut être importante), des risques d'emballage thermique et d'explosion (solvant organique) et des risques chimiques (production de gaz toxiques comme *HF*, exposition aux matériaux potentiellement cancérigènes).

L'opération peut être réalisée suivant 4 étapes :

- **Stabilisation** – le pack est d'abord déchargé au travers d'une résistance ou d'une solution saline (par exemple une solution aqueuse de Na_3PO_4 moins pénétrante et moins corrosive qu'une solution de $NaCl$). Cette dernière technique n'est pas employée pour les modules haute-tension à cause de l'électrolyse non contrôlée de la solution saline (fort dégagement de H_2 et d' O_2 aux terminaux et potentiellement de Cl_2).
- **Prétraitement** – le pack de batterie est démonté afin d'isoler les différents modules. Ces derniers peuvent être ensuite :
 - soit démontés afin de récupérer les électrodes positives et d'en extraire le matériau actif par dissolution du liant (le liant *PVDF* requiert de grandes quantités de solvant organique *NMP* ou *DMF*, en proportions 10/1 en masse, par rapport à *SBR* ou encore *CMC*, qui est soluble dans l'eau), par traitement thermique (60-100°C, 3h) et par sonication (1,5 h).
 - soit écrasés et déchiquetés (comminution) sous atmosphère inerte (N_2 , CO_2 ou mélange $CO_2/Argon$: < 4 % oxygène) ou sous jets d'eau (procédé *Retriev*). Après broyage, une séparation physique des différents matériaux peut être effectuée en fonction de leurs propriétés (taille de particules, densité, ferromagnétisme et hydrophobicité). A l'issue des étapes de broyage et de séparation, une masse noire (« *black mass* ») est obtenue, contenant le carbone hydrophobe et les oxydes de métaux hydrophiles.
- **Hydrométallurgie** – Les métaux sont dissous par lixiviation, principalement acide à température élevée (80°C), puis isolés par extraction liquide/liquide (par des acides organiques : *Cyanex 272*, *D2EHPA*), par précipitation, ou encore par électrodéposition. La dissolution sélective des métaux par des micro-organismes est une voie de recherche actuellement poursuivie. Les sels de métaux récupérés à la cathode peuvent être réutilisés pour la synthèse de nouveaux matériaux actifs (recyclage en boucle fermée).
- **Pyrométallurgie** – Les modules entiers de batterie peuvent être introduits directement dans un four comportant plusieurs zones successives : *i*) zones de préchauffage (< 300°C) afin d'évaporer les solvants, *ii*) zone de pyrolyse (700°C) afin d'incinérer les plastiques (réaction exothermique) et les électrolytes (40-50% du poids de la batterie), et *iii*) zone de fonte permettant la réduction des oxydes de métaux en un alliage de *Co*, *Cu*, *Fe* et *Ni* et la formation de scories (*Li*, *Al*, *Mn*) ainsi que de gaz. Cette étape est très énergivore, exigeant des températures pouvant atteindre 1475 °C pendant 30 minutes.

