

# Valorisation d'un VHU électrique par catégorie de matières

## Table des matières

1) La liste des abréviations, des sigles et des acronymes.....	2
2) Contexte .....	3
3) Les matières présentes dans les véhicules électriques .....	4
4) Procédés de recyclage des différentes matières issues d'un VHU électrique .....	5
a) Batteries .....	5
b) Câbles électriques .....	6
c) Pneus .....	7
d) Moteurs électriques .....	7
e) Structure du pack batterie .....	8
f) Polymères .....	9
g) Cartes électroniques.....	9
h) Carcasse métallique.....	9
3 Sources .....	10

## 1) La liste des abréviations, des sigles et des acronymes

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène

Ag : Argent

Co : Cobalt

Cu : Cuivre

Dy : Dysprosium

Li : Lithium

Nd : Néodyme

NdFeB : Néodyme Fer-Bore

Ni : Nickel

PA : Polyamide

PE : Polyéthylène

Pl : Platine

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle

PP : Polypropylène

Pr : Praséodyme

PS : Polystyrène

Pr : Praséodyme

PUR : Polyuréthane

PVC : Poly Chlorure de Vinyle

Tb : Terbium

VE : Véhicule Electrique

VEH : Véhicule Electrique et Hybride

VHU : Véhicule Hors d'Usage

## 2) Contexte

Environ 1,3 millions de véhicules hors d'usage thermiques sont traités chaque année en France dans les 1 700 centres de traitement de VHU et les 60 broyeurs agréés.

Les VHU sont des déchets dangereux tant qu'ils n'ont pas subi une dépollution complète. Leur gestion revêt des enjeux environnementaux et économiques importants.

La directive européenne 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux VHU fixe des objectifs à atteindre en termes de performances environnementales :

- Un taux minimum de réutilisation et de recyclage de 85 % en masse du VHU
- Un taux minimum de réutilisation et de valorisation de 95 % en masse du VHU

Les véhicules concernés sont les voitures particulières, les camionnettes et les cyclomoteurs à trois roues. Les voitures particulières représentent la grande majorité des VHU (plus de 93 % environ) pris en charge par les centres VHU agréés (environ 1,3 millions par an en moyenne sur les trois dernières années).

Sur le plan national, le cadre réglementaire régissant les VHU est défini par le code de l'environnement, notamment, les centres VHU agréés ont l'obligation de réaliser la dépollution complète du véhicule (retrait des batteries, des pots catalytiques, des réservoirs GPL, des huiles usagées, des liquides de refroidissement, des fluides, des pneumatiques...), le démontage de certaines matières et le retrait des pièces de réutilisation (pièces mécaniques, éléments de carrosserie) avant de transmettre les carcasses de véhicule à des broyeurs agréés, qui assurent leurs broyages, puis séparent les matières restantes (acier, plastiques, ...) pour les recycler.

Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/vehicules-hors-dusage-vhu>

Dans 10 ans les véhicules électriques et hybrides représenteront 35% du parc des VHU, contre 1% aujourd'hui. (1)

### 3) Les matières présentes dans les véhicules électriques

#### Moteurs électriques

- Stator : cuivre et acier
- Rotor : aimants permanents NdFeB (terres rares) ou cuivre (Nouvelle Zoé de Renault), aluminium et acier
- Acier : structure

#### Polymères (4)

- 28% PP
- 4% ABS
- 6% PA
- 8% PUR
- 19% PE
- 35% autres polymères

#### Cuivre

En moyenne les VEH contiennent 90 kg de cuivre soit 3 à 4 fois plus que dans les voitures thermiques (3)

#### Cartes électroniques

Les VE et véhicules thermiques contiennent de plus en plus d'électronique. Les cartes électroniques sont composées d'environ 30% de métaux, 30% de plastique et 30% de fibre de verre

A noter : Les voitures autonomes nécessiteront encore plus de cartes électroniques pour fonctionner que les véhicules actuels.

#### Batterie (ex : NMC 111) (1)

- 9% Cuivre : anode
- 17% Aluminium
- Graphite 8,2%
- Cobalt 3,1%
- Acier 3%
- Nickel 3%
- Manganèse 2,8%
- Lithium 1%

A noter : les nouvelles chimies de batteries contiennent moins de cobalt et plus de nickel (NMC 811)

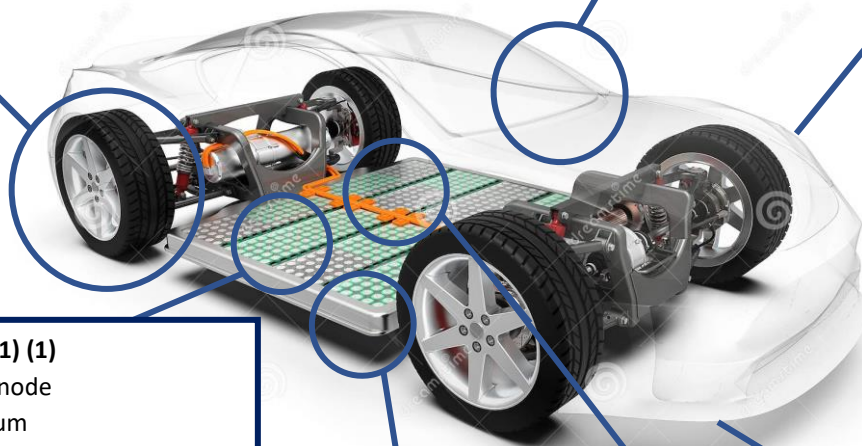
Les fabricants de batteries travaillent sur des batteries sans nickel ni cobalt et sans électrolytes liquides, dites « batteries tout-solide », plus stables et plus puissantes.

#### Structure du pack batterie (en moyenne)

- 60% aluminium
- 40% acier
- Plastique

#### Câbles électriques

- 30% PE
- 70% Cuivre



#### 4) Procédés de recyclage des différentes matières issues d'un VHU électrique

##### a) Batteries

Le processus de recyclage des batteries est complexe au vu des nombreux matériaux qui les composent et des risques liés à la présence de matières inflammables telles que le lithium. Des contrats long terme sont passés entre les constructeurs automobiles et les recycleurs de batteries. Renault recycle ses batteries VEH chez Euro Dieuze Industrie (SARPI VEOLIA) à Dieuze (Moselle) et Stellantis recycle ses batteries chez SNAM à Saint Quentin Fallavier (Isère).

Le recyclage des batteries commence par une mise en sécurité et une décharge du pack en centre agréé VHU.



Mise en sécurité de la batterie d'un VE après décharge (5)

Vient ensuite l'étape du démantèlement dans laquelle la structure de la batterie est ouverte pour atteindre les modules



Ouverture d'un pack de batterie de VE, les modules contenant les cellules sont visibles

Ensuite, de manière simplifiée, ils existent aujourd'hui deux procédés de recyclage pour extraire les métaux d'intérêt contenus dans les cellules des batteries (Co, Li, Ni, Cu, Ag) :

- Le traitement hydrométallurgique (ou chimique), connu pour récupérer des métaux sous une forme plus pure, est constitué des étapes suivantes :
  - Broyage
  - Séparation mécanique
  - Séparation chimique
  - Affinage des métaux

Ce traitement permet de récupérer le lithium et est peu énergivore mais produit des résidus ultimes (déchets).

- Le traitement pyrométallurgique, consommateur d'énergie et producteur de CO<sub>2</sub>, est lui connu pour produire des alliages métalliques par oxydoréduction dans un four métallurgique ou de fusion. Il ne permet pas la récupération de certains métaux comme le lithium. Il a pour avantage de traiter plusieurs types de batteries en mélange sans tri préalable.

#### b) Câbles électriques

Les VEH contiennent de grandes quantités de câbles électriques composé de PE (gaine) et de cuivre (âme).

En 2019, 12% des câbles électriques des VHU thermiques sont récupérés par les centres VHU, 78% par les broyeurs automobiles et 10% sont perdus et enfouis. (12)

L'augmentation de la quantité de câbles en cuivre présents dans les VEH constitue une opportunité pour améliorer le taux de valorisation de cette matière de plus en plus stratégique.

Le recyclage des câbles se décompose en étapes de broyage et de séparations mécaniques (séparateurs magnétiques, par courant de Foucault et densimétrique). Un acteur majeur et innovant maîtrisant ce procédé en France est MTB Recycling. (7)

#### c) Pneus

Chaque VHU contient en moyenne 40 kg de pneu (12). D'après INDRA, 100% des pneumatiques sont actuellement récupérés et valorisés par les centres VHU. Les pneus qui le peuvent sont rechapés et réemployés pour une seconde vie dans le transport dans 15% des cas (8). Les autres pneus sont broyés pour être valorisés en tant que matière pour des produits de TP, terrains de foot, roulettes (9). Certains broyats de pneus sont utilisés en chaufferies urbaines et en cimenteries en substitution du pétrole ou du gaz.

#### d) Moteurs électriques

Dans les VEH, nous retrouvons deux types de moteurs électriques : les moteurs synchrones, majoritaires, sont adaptés à la conduite urbaine, les moteurs asynchrones sont adaptés pour les grandes distances. (6)

Les moteurs synchrones sont composés d'acier, de terres rares et de cuivre (notamment dans le rotor de la Renault Nouvelle Zoé)

Le procédé de recyclage des moteurs individuels se déroule de la façon suivante :

- Extraction du moteur du VEH
- Extraction manuelle du rotor
- Découpe du stator (10)
- Séparation automatisée du cuivre et de l'acier (10)
- Recyclage des deux matières dans les filières classiques cuivre et acier

Le procédé de recyclage des moteurs en continu se déroule de la façon suivante :

- Concassage et pré-broyage dans un broyeur à marteaux pour produire des meatballs, mélange imbriqué de cuivre et d'acier
- Granulation
- Séparations mécaniques



Moteurs électriques sous la forme de « meatball » après concassage

Concernant le recyclage des aimants permanents contenus dans certains rotors, plusieurs projets à des niveaux de maturité différents sont en cours :

- Magresource : production d'aimants liés et frittés à partir d'aimants recyclés via un procédé innovant basé sur la décrépitation à l'hydrogène.
- Carester : extraction des terres rares (Nd, Pr, Tb, Dy) issues des aimants permanents. En cours d'industrialisation.
- Projet Magnolia : production d'aimants fritté à partir d'aimants permanents recyclés. ORANO, Paprec, Daimantel, Valéo, CEA-Liten. Lancement du projet en février 2022.

Il n'existe pour le moment pas de modèle économique viable pour le recyclage des aimants permanents. Les aimants des D3E présents dans les VHU se retrouvent souvent collés à l'intérieur des broyeurs ou avec la ferraille et polluent le flux de matière.

#### e) Structure du pack batterie

Elle est majoritairement en acier et en aluminium (60% d'aluminium en moyenne), elle peut être recyclée dans la filière classique de l'acier et de l'aluminium.



## f) Polymères

En 2019, parmi les polymères présents dans les VHU thermiques sont enfouis :

- 31% des polymères ABS, PVC, PMMA, PS
- 7% du PE des réservoirs
- 17% du PE hors réservoir
- 9% du polypropylène des pare-chocs
- 17% du PP hors pare-chocs
- 32% du PA
- 34% des mousses PUR

Ce sont les broyeurs qui valorisent la majorité de ces matières (jusqu'à 76%), sauf pour les réservoirs et les pare-chocs pour lesquels les centres VHU valorisent respectivement 23% et 33%. (12)

Après séparation, les différents polymères sont dirigés vers des recycleurs dédiés qui vont augmenter leur pureté et tenter d'atteindre les exigences des plasturgistes pour que ces matières reviennent dans la chaîne de production.

## g) Cartes électroniques

Les cartes électroniques contiennent des matières toxiques et sont considérées comme des déchets dangereux. Peu de chiffres existent sur leur collecte au sein des VHU.

Une fois collectées les cartes électroniques doivent être recyclées pour extraire les métaux d'intérêt qu'on y trouve : or, argent, tantale, cuivre, germanium, platine. Leur processus de recyclage est complexe et nécessite des compétences particulières. Des entreprises recyclent les cartes électroniques en France notamment WEECYCLING en Normandie et WEEEMETALLICA (Igneo) à Isbergues. Néanmoins, les déchets de cartes électroniques sont le plus souvent exportés et les taux de récupération des métaux (hors Cu, Ag, Pl et or) restent encore très faibles.

## h) Carcasse métallique

Les carcasses dépolluées de VHU thermiques sont ensuite broyées dans des broyeurs automobiles. D'après recycleur belge COMET une carcasse de VHU actuel est composée à 75% d'acier (11). Des métaux non-ferreux tels que le cuivre, le zinc, le laiton ou l'aluminium représentent environ 28 kg de la carcasse d'un VHU soit 3.3% (12). Une grande partie du flux de métaux non-ferreux issus du broyage de VHU est envoyée en Asie pour être triée manuellement (11). L'enjeu serait de développer un tri viable de ces métaux valorisables en France ou en Europe.

Le projet PICKIT de l'Université de Liège, en collaboration avec COMET, porte sur le développement d'une ligne de tri pour des métaux non-ferreux basée sur plusieurs systèmes de détection et de capteurs.



*3 robots delta ABB en ligne pour le tri des ferrailles issues des VHU- Projet PICKIT*

### 3 Sources

(1) Site officiel INDRA, à retrouver ici :

[https://www.indra.fr/fr/catalogue-re-source\\_engineering\\_solutions/categorie-materiel-recyclage-voiture/31/vehicules-electriques](https://www.indra.fr/fr/catalogue-re-source_engineering_solutions/categorie-materiel-recyclage-voiture/31/vehicules-electriques)

(2) Jan Diekmann et al. J. Electrochem. Soc. 2017; 164: A6184-A6191 - Composition d'une batterie Li-ion NMC 111 complète

(3) Jean-Sébastien Jacques ex PDG Rio Tinto

(4) Composition massique d'un véhicule récent-site officiel INDRA

A retrouver ici : <https://www.indra.fr/fr/activites-france/le-recyclage>

(5) Vidéo INDRA - Re-source process de prise en charge des batteries de véhicules électriques

A retrouver ici :

[https://www.youtube.com/watch?v=qvKpsjM7UCE&ab\\_channel=INDRAAUTOMOBILERECYCLING](https://www.youtube.com/watch?v=qvKpsjM7UCE&ab_channel=INDRAAUTOMOBILERECYCLING)

(6) Comment fonctionne un moteur de voiture électrique ? Site officiel Renault Group, à retrouver

ici : <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-moteur-de-voiture-electrique/>

(7) Vidéo MTB Cable Box - Société MTB Recycling

A retrouver ici : [https://www.youtube.com/watch?v=QCU6r-VuDBA&ab\\_channel=MTBRECYCLING](https://www.youtube.com/watch?v=QCU6r-VuDBA&ab_channel=MTBRECYCLING)

(8) Vidéo Aliapur présente : la seconde vie du pneu

A retrouver ici :

[https://www.youtube.com/watch?v=2G0IWYUnRro&list=TLGGc\\_yFMjC8K6gwMzA4MjAyMg&t=71s&ab\\_channel=CommunicationAliapur](https://www.youtube.com/watch?v=2G0IWYUnRro&list=TLGGc_yFMjC8K6gwMzA4MjAyMg&t=71s&ab_channel=CommunicationAliapur)

(9) Valorisation matière des pneus - Entreprises Roll-Gom. A retrouver ici :

<https://www.roll-gom.com/fr/>

(10) Vidéo Casse moteur électrique Bronneberg – LC technologies. A retrouver ici :

[https://www.youtube.com/watch?v=qBeW1\\_kVQN0&ab\\_channel=LCTECHNOLOGIES-Recyclagedesm%C3%A9taux](https://www.youtube.com/watch?v=qBeW1_kVQN0&ab_channel=LCTECHNOLOGIES-Recyclagedesm%C3%A9taux)

(11) Page du projet PICKIT, site du laboratoire GeMMe, Université de Liège. A retrouver ici :

<http://www.gemme.ulg.ac.be/index.php/accueil/research/pickit/>

(12) Automobiles : données 2019- ADEME. A retrouver ici : <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5089-automobiles-donnees-2019.html>