

BATTERIES POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES : R&D, PRODUCTION, RECYCLAGE

Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes »

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

Malgré le retard considérable pris par la France et l'Europe sur l'industrialisation des batteries Lithium-ion depuis l'amont minier jusqu'au recyclage, l'émergence de nouvelles chimies et de nouveaux process de production est une opportunité de revenir dans cette course à l'horizon 2035 et au-delà, et de développer un écosystème industriel souverain. La technologie Sodium-ion est à soutenir de manière urgente pour les batteries stationnaires et les petits véhicules électriques. En matière de R&D, les chimies Lithium-ion à électrolyte solide, les technologies Lithium-Soufre et Zinc-Air, mais également la simulation multi-niveaux et les technologies minières durables sont à soutenir. Concernant le recyclage, même si les filières ont commencé à s'organiser, il faut envisager une réglementation européenne ambitieuse, bloquant notamment l'export de batteries usagées et de blackmass (poudre de métaux issue du prétraitement des batteries en fin de vie), et un soutien sur les R&D permettant de réduire les étapes du process et d'en améliorer le coût et l'impact environnemental.

1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

Le véhicule à batterie est la principale technologie permettant d'atteindre les objectifs d'émission à 2050 pour les mobilités routières. Son développement dépend essentiellement des progrès de la filière batterie d'une part, de ceux de l'électronique de puissance¹ (véhicules et bornes de recharge) d'autre part. Il reste des évolutions technologiques sur les moteurs électriques et leur pilotage mais celles-ci sont globalement sous contrôle des acteurs.

Le recyclage des batteries, imposé par les réglementations européennes tant du côté des constructeurs de véhicules que du côté des gigafactories (voir glossaire en annexe) de batteries, deviendra massif entre 2035 et 2050, et essentiel autant pour des enjeux d'environnement que de souveraineté (limitation de la dépendance aux matériaux critiques).

Climat : les mobilités routières comptent pour environ 30% des émissions nettes de gaz à effet de serre de la France et environ 22% pour les voitures et véhicules utilitaires légers². Leur décarbonation est donc un enjeu majeur. La réduction de l'empreinte carbone et environnementale de la chaîne de valeur des batteries, y compris de leur recyclage, est essentielle à l'atteinte d'une cible « net zéro »³.

Souveraineté : l'Europe et la France ont pris 15 ans de retard sur le développement et l'industrialisation des batteries Lithium-ion (voir glossaire, majoritaires aujourd'hui) depuis l'amont minier jusqu'au recyclage. On peut espérer que les PIIEC⁴ batteries (avec un support public de plus de 3Md€), les investissements asiatiques en Europe, l'arrivée d'usines de CAM et pCAM (voir glossaire) permettront de rattraper ce retard. Mais l'émergence de nouvelles chimies et de nouveaux process de production est une opportunité de revenir dans cette course à l'horizon 2035 ou au-delà et de développer un écosystème industriel plus souverain à côté des implantations asiatiques actuelles en Europe.

Avant 2050, le recyclage des chimies à base de nickel, cobalt, lithium et peut être de graphite recyclé devraient prendre une place significative, peut-être majoritaire, dans l'approvisionnement amont des gigafactories de batteries, en particulier pour le Lithium, le Nickel et le Cobalt, voire aussi pour le graphite naturel, éléments critiques de la souveraineté européenne. Sauf changements drastiques des chimies d'ici là.

Inégalités : si les voitures électriques sont, hors batterie, moins chères que les voitures thermiques à volume équivalent, le coût complet de la batterie limite, pour l'instant, l'accès des moins aisés à la mobilité décarbonée.

¹ Electronique de conversion de l'énergie électrique. Voir par exemple <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/breve/lelectronique-puissance-au-coeur-des-enjeux-mobilite-electrique>

² <https://www.citepa.org/donnees-air-climat/donnees-gaz-a-effet-de-serre/secten/>

³ L'Accord de Paris a pour objectif de limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C, ce qui suppose de réduire les émissions de 45 % d'ici à 2030 et d'atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici à 2050. Ce « zéro émission nette » signifie que les émissions de gaz à effet de serre sont réduites à un niveau très faible, les émissions restantes présentes dans l'atmosphère étant réabsorbées, par les océans et les forêts par exemple, ou par des solutions technologiques de captage du carbone.

⁴ Projet Important d'Intérêt Européen Commun, Important Project of Common European Interest, voir <https://www.ipcei-batteries.eu/about-ipcei>

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

R&D et production :

- **Batteries** : la Chine a une position ultra dominante sur l'ensemble de l'industrie du véhicule électrique à batterie, en Lithium-ion (⁵) et débute l'industrialisation de la chimie Sodium-ion (Na-ion), technologie dont la France fut pionnière dès 2016 avec les découvertes et brevets du CNRS puis la création de TIAMAT, mais n'a pas su trouver les ressources industrielles et financières pour une industrialisation de masse. La Corée et le Japon restent bien placés, mais avec un marché intérieur des véhicules électriques à batterie encore très petit. Ni l'Europe ni les États-Unis n'ont d'acteur majeur dans ce domaine sauf pour les composants, tels que, en Europe, Umicore et BASF pour les CAM et pCAM, Solvay et Arkema pour l'électrolyte, le séparateur (voir glossaire) ou divers produits de haute technologie pour les électrodes et la sécurité des batteries ; l'Europe et les États-Unis doivent donc compter sur des implantations et des joint-ventures asiatiques pour satisfaire leur demande. Avec les PIIEC batteries, certaines entreprises bien financées arriveront à franchir les barrières compétitives élevées de cette industrie. Le groupe Bolloré propose une technologie à électrolyte solide (voir glossaire), mais avec des températures de fonctionnement pour l'instant rédhibitoires pour un marché de masse. Seule la technologie de recyclage est maîtrisée en France, mais encore peu industrialisée ;
- **Composants de puissance** : position solide mais à surveiller de ST Microelectronics, pionnier pour l'automobile des technologies au Carbone de Silicium (SiC) ou au Nitrure de Gallium (GaN) ;
- **R&D et bas TRL** : Le réseau RS2E⁶ (laboratoires académiques et partenaires industriels) structure la R&D française sur les batteries depuis 2011. Il a permis la création du PEPR⁷ batteries co-piloté par le CNRS et le CEA-LITEN qui travaille à TRL 1-4. En Allemagne le Fraunhofer Institute est très engagé sur les alternatives aux chimies Lithium-ion ;
- **Solid State Batteries** : la R&D Japon-Corée-Chine est très supérieure à l'Europe et à la France ;
- **Recherche amont** : Une longue tradition française en recherche sur ce sujet a permis la création du RS2E (public & privé mais en manque de fonds) puis du PEPR batteries. De plus, le CEA-LITEN, le CNRS (CIRIMAT, LRCS, ICGM, Sorbonne Université), IFPEN sont bien placés en simulation multi-niveaux (voir glossaire) (des atomes au système batterie), un atout essentiel pour la R&D.

Recyclage : Les volumes à recycler restent minimes, que ce soient les scraps (rebuts) des gigafactories ou les batteries en fin de vie. Ils devraient décoller vers 2035. La Chine est le principal recycleur aujourd'hui. La France a des acquis en hydrométallurgie ayant permis les projets d'Eramet (abandonné), d'Orano, de SNAM. Umicore opère en Belgique. D'autres projets sont en cours en France : Hydrovolt (Norvège, démarrage mi-2025), Eurecat, les start-up Battri à Arras, Mecaware à Lyon, ou le développement commun MTB-Saft-Paprec-Orano-CEA.

⁵ Les batteries NMC ont une cathode constituée de nickel, manganèse, cobalt, et représentaient en 2023 environ 2/3 du marché mondial. Les batteries LFP ont une cathode constituée de lithium, fer, phosphate, pour moins de 30% des parts de marché (<https://www.connaissancedesenergies.org/batteries-technologies-europe>). Les batteries NMC comme LFP sont des batteries Li-ion. Dans la suite, les batteries sont caractérisées par leurs éléments chimiques constitutifs.

⁶ <https://www.energie-rs2e.com/fr>

⁷ Programmes et équipements prioritaires de recherche,

3. Les technologies clés à horizon 2035-2050

R&D et production :

- L'extraction puis la purification sous contraintes environnementales et faible impact carbone des lithium, nickel, cobalt et graphite ;
- La fabrication des CAM et pCAM et leur éventuelle intégration ;
- Gigafactories de batteries : le Sodium-ion pour l'industrialisation ; le Lithium-métal à électrolyte solide, le Lithium-Soufre et Zinc-Air en TRL faibles. En revanche, sur le Lithium-ion classique (électrolyte liquide), le retard par rapport à l'Asie semble très difficile et surtout très coûteux à rattraper (longue courbe d'apprentissage) ;
- L'éco-conception des batteries lorsque chimies et cellules se seront un peu stabilisées.

De manière générale, la maîtrise, d'abord, des développements amont (TRL 1,2,3) puis du passage progressif et raisonné vers les TRL 7,8 est indispensable pour réussir une industrialisation (recommandation générale pour la France en matière de gouvernance, voir avis à venir).

Recyclage :

Au-delà des technologies aujourd'hui connues :

- Le recyclage de blackmass (poudre de métaux issue des batteries recyclées) en hydrométallurgie avec passage direct en fabrication de pCAM pour le nickel et le cobalt et ce avec les différentes chimies NMC. Ce recyclage est stratégique car il permettra de sécuriser un accès aux matériaux critiques : nickel, cobalt et lithium ;
- Le recyclage de blackmass avec le procédé MECAWARE⁸ ;
- La baisse du coût du recyclage du lithium à partir de chimies LFP ;
- L'intelligence artificielle peut jouer un rôle plus important sur les techniques de tri mais aussi sur le diagnostic au moment de l'étape de démantèlement (batteries à réutiliser/réparer plutôt qu'à recycler).

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

R&D et production :

Au-delà des efforts à faire pour rattraper le retard pris sur l'ensemble de l'écosystème (réorienter les aides vers les véhicules électriques accessibles tout en maintenant les contraintes d'émissions 2025-2030, converger vers une solution de recharge européenne pour les poids lourds, chargeurs mégawatts ou recharge dynamique urbaine et autoroutière), les recommandations pour préparer 2035-2050 sont :

- Soutien urgent (financement, partenariats avec des industriels sachant fabriquer des batteries Lithium-ion puisque le process est assez semblable) pour une industrialisation de masse du Sodium-ion pour les batteries stationnaires et les petits véhicules électriques ;
- Soutien majeur à la R&D produit-process sur le Lithium-métal « à électrolyte solide » ;
- Programme coordonné avec des partenaires européens de R&D produit-process sur Lithium-Soufre, Zinc-Air et batteries aqueuses ;
- Soutien à la simulation multi-niveau du CEA-LITEN et du CNRS appliqué aux batteries « à électrolyte solide » et aux chimies alternatives, et intégrant les différents stades critiques du process de production (avec Dassault Systèmes ?), les jumeaux numériques et l'intelligence artificielle ;
- Soutien à de potentielles technologies minières (lithium, nickel) soutenables et à faibles émissions de GES ;

⁸ Procédé qui permet d'extraire sélectivement les métaux sans utiliser d'acide et sans générer d'effluents sulfatés, voir <https://www.mecaware.com/>

- Soutien à la R&D produit-process sur les batteries de stockage, indispensables avec l'essor de l'électricité issue de renouvelables, en particulier RedOx flow⁹ au-delà de l'utilisation du Vanadium déjà validé (Chine et Australie).

Ne pas soutenir, pour les mobilités routières : les technologies hybrides (déjà matures), l'hydrogène décarboné (coût, rendement énergétique), les biocarburants (la biomasse, le biogaz ou le biodiesel seront indispensables ailleurs) mais assurer une transition maîtrisée des biocarburants et de la biomasse concernée des mobilités routières vers l'aviation et le maritime tout au long des décennies 2030 et 2040.

Recyclage :

Les filières allant des constructeurs de véhicules aux recycleurs et aux fabricants de pCAM et CAM jusqu'aux gigafactories de batteries ont commencé à s'organiser. Ces acteurs y sont incités par les réglementations européennes, mais cela reste un point à surveiller voire stimuler.

- Pousser à une réglementation européenne bloquant l'export de batteries usagées et de blackmass, et plus ambitieuse sur le taux de recyclage européen imposé aux constructeurs de véhicules et sur le taux d'incorporation de métaux recyclés en Europe dans les batteries dès 2032 ;
- Soutien à la R&D sur le développement de technologies en rupture pour aller vers des boucles de recyclage courtes et à moindre impact environnemental (récupération des matériaux actifs pour recyclage direct en pCAM).

Auteurs principaux (liens d'intérêts en relation avec le thème le cas échéant) : Hélène Olivier-Bourbigou; Patrick Pékata (senior advisor d'Envision AESC, opérateur d'une usine de batterie en France, jusqu'à mi-2024). Les auteurs remercient Patrice Simon, Jean-Pierre Chevalier et Patrick Ledermann pour leurs relectures attentives.

La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.

⁹ Electrolyte différent pour l'anode et la cathode, avec stockage dans deux réservoirs séparés. Ceci permet un découplage entre la puissance disponible et la capacité énergétique du système. En revanche, la taille du système implique une utilisation stationnaire.

Mini glossaire :

- **Anode** : Reliée au pôle négatif de la batterie. Lorsque la batterie est chargée, les ions Lithium portant une charge électrique positive se sont agglomérés sur l'anode. Lors de la décharge, ils migrent vers la cathode, entraînant un flux inverse d'électrons, avec leur charge négative) vers l'anode ;
- **CAM** : Cathode Active Materials. Matériaux actifs de la cathode. Les CAM (pour matière active de la cathode) sont un composé métallique de nickel, manganèse, cobalt et lithium, matériau manufacturé principal entrant dans la composition d'une batterie et représentant jusqu'à 40 % de sa valeur ;
- **Cathode** : Reliée au pôle positif de la batterie. Lors de la recharge, les ions Lithium ion migrent vers l'anode ;
- **Électrode** : nom générique pour les anodes et cathodes ;
- **Électrolyte** : matériau, liquide (technologie de toutes les batteries aujourd'hui excepté celles du groupe Bolloré) ou solide qui contient les ions Lithium et permet leur circulation entre anode et cathode ;
- **Électrolyte solide** : objet de développements multiples avec l'espoir d'améliorer la densité d'énergie et la sécurité des batteries. La conductivité de cet électrolyte est le point dur. Les batteries du groupe Bolloré, à électrolyte solide, nécessitent de fonctionner à une température supérieure à 60°C et doivent donc être réchauffées ;
- **Gigafactory** : usines de très grande taille dédiées à la production de batteries et moteurs pour voitures électriques
- **LFP** : voir Lithium-ion ci-dessous
- **Lithium-ion (batteries)** : batteries dont les ions qui transportent les électrons entre anode et cathode et réciproquement sont des ions lithium. La cathode peut contenir du Nickel, du Manganèse et du Cobalt (dites « NMC), du Fer et du Phosphate (dites « LFP »), du Nickel, du Cobalt et de l'Aluminium (dites « NCA ») ou de l'Oxyde de Manganèse (dites « LMO »). L'anode contient du Graphite avec, éventuellement, un peu de Silicium.
- **NMC** : voir Lithium-ion ci-dessus
- **pCAM** : matériaux précurseurs des CAM, composés de nickel, manganèse et cobalt (NMC), qui servent à la fabrication des CAM par ajout d'hydroxyde de lithium ;
- **RS2E** : Réseau de stockage électrochimique de l'énergie, réseau de chercheurs avec des participations d'entreprises aux côtés de laboratoires publics. <https://www.energie-rs2e.com/fr/notre-organisation> ;
- **Séparateur** : situé entre anode et cathode et baignant dans l'électrolyte, il permet aux ions Lithium de circuler mais empêche qu'un dépôt cristallin de lithium sur l'anode puisse se développer comme une pointe (une dendrite) et créer un court-circuit entre anode et cathode, générant un feu et une destruction de la batterie ;
- **Simulation multi-niveaux** : il s'agit de simuler chaque phénomène à l'échelle la plus pertinente, à l'aide de différents modèles de tailles et de finesses, et en assemblant ensuite les différentes échelles.