



P.O.C

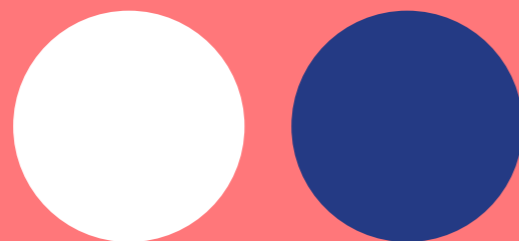
JUIN 2023

Cahier d'innovations Batteries



DÉCOUVREZ LES
MEILLEURES INNOVATIONS
ISSUES DE LA SCIENCE





ÉDITO



Est-ce l'âge de la maturité pour les batteries au lithium ? Présentée comme le verrou technologique central de la mobilité électrique, la batterie au lithium a vu ses coûts de production baisser rapidement depuis une dizaine d'années. Ils sont passés de plus de 1000 \$ le kWh à près de 150 \$ entre 2010 et 2019. La baisse des prix et l'essor de l'électromobilité ont donné naissance à une kyrielle de projets de « giga-usines » en Europe. Ils sont au nombre de 40 actuellement.

Ces investissements, soutenus à bout de bras par les pouvoirs publics, vont faire émerger l'Europe sur le marché des batteries. Mais le Vieux Continent ne veut pas s'arrêter là, et souhaite gagner en souveraineté sur l'ensemble de la filière batterie. Appuyés sur le PIEEC (Projet important d'intérêt européen commun) européen sur les batteries, les pays européens préparent déjà l'après-lithium.

La raison ? Les batteries au lithium à électrolytes liquides atteignent leurs limites en termes de performances. Elles provoquent aussi de graves dégâts sociaux et environnementaux. L'âge du lithium ne prendra pas fin rapidement, car la recherche continue d'améliorer les performances des batteries lithium-ion et parce qu'aucune technologie n'est prête à prendre la relève d'un point de vue industriel avant quatre à cinq ans. Enfin, les prochaines générations de batteries utiliseront du lithium sous de nouveaux aspects, avec des électrodes en lithium métal notamment.

Les laboratoires sont toutefois à pied d'œuvre, et testent tous les jours de nouvelles recettes plus ou moins « disruptives » pour concevoir de nouvelles électrodes ou électrolytes : LMO, LFP, LNMO ou la plus exotique NVPF.

Il reste encore beaucoup d'incertitudes autour de la technologie qui succédera à la batterie Lithium-ion. Une chose est sûre : l'Europe est enfin dans la course sur les batteries.



FLORENT DETROY • Directeur de POC Media

Sommaire

p.5

MARCHÉS

- ✘ L'Europe revient dans la course

p.7

TECHNOLOGIES

- ✘ Une génération 3 « bis » en cours
- ✘ La génération 4 et le « tout solide »
- ✘ La rupture de la génération 5

p.10

LABORATOIRE : IMN

- ✘ Spécialiste des matériaux de batteries

p.12

LABORATOIRE : IPREM

- ✘ L'ère du « post lithium-ion »

p.16

LABORATOIRE : LRCS

- ✘ Modélise la production de batteries

p.18

START UP : MECAWARE

- ✘ L'hydrométallurgie pour recycler les batteries

p.26

CALENDRIER DES CAHIERS D'INNOVATIONS

MARCHÉS

L'Europe revient dans la course

La mobilité représente le principal marché des batteries, et il va progresser dans les années à venir, à mesure que l'électrification du parc automobile va avancer. Elle pèse 50 % de la demande aujourd'hui, et pourrait passer à 80 % dans les années futures selon l'institut Fraunhofer ISI (Institute for Systems and Innovation Research). Pour satisfaire cette demande, la production industrielle de batterie li-ion dans le monde devrait ainsi être multipliée par dix d'ici à 2030.

Le plus intéressant est que l'Europe souhaite devenir un nouveau pôle industriel sur ce marché, monopolisé pour l'instant par l'Asie et les États-Unis. L'Europe pèse entre 20 et 30 % de la demande mondiale, mais reste inexistante dans la production. D'ici à 2030, elle pourrait représenter jusqu'à 30 % des capacités industrielles, selon l'Institut Fraunhofer ISI. Au regard des technologies produites dans les giga-usines en construction, c'est bien la technologie lithium-ion qui est consacrée aussi en Europe. La chute drastique des coûts de fabrication en une dizaine d'années seulement a joué un rôle majeur dans le frémissement, puis le décollage de la mobilité électrique.

Pourtant, d'autres limites freinent la progression à moyen terme des technologies li-ion, notamment de la sous-catégorie NMC (cathode en nickel man-

ganèse cobalt, anode en graphite et électrolyte liquide) : la densité énergétique de ces électrodes plafonne autour de 250/300 Wh/kg. Le coût, l'accès et l'empreinte environnementale et sociale de certains métaux, comme le cobalt, posent de sérieux problèmes écologiques et stratégiques. À titre d'exemple, 65 % de la production de cobalt pourrait être captée par le secteur des batteries d'ici à 2025. C'est 75 % pour le lithium. Renforçant d'autant notre dépendance aux pays producteurs. Enfin, la sécurité des batteries lithium n'est pas optimale, l'électrolyte liquide pouvant conduire à des fuites toxiques ou à des échauffements thermiques ravageurs.

Ces limites expliquent les investissements importants réalisés en R&D pour préparer les générations 4, et 5 de batteries. Le marché de la génération 4 est déjà destiné à un bel avenir, puisque certains analystes pronostiquent une croissance entre 20 et 40 % par an de ce marché dans les années à venir, grâce notamment aux promesses des électrolytes « tout-solide ». Cette quatrième génération ne devrait toutefois pas être industrialisée en masse pour la voiture électrique avant 2030. Le plus probable est que la génération 3 continue d'être améliorée sur les points où il reste une marge de progression, comme la réduction de la consommation de métaux stratégiques.





33%

DE CROISSANCE ANNUELLE
DU MARCHÉ DE LA BATTERIE
D'ICI À 2030 (McKinsey)

400

MILLIARDS €
LE MARCHÉ DES BATTERIES
LITHIUM-ION EN 2030
(CONTRE 85 EN 2022) (McKinsey)

91%

PART DE LA MOBILITÉ SUR
LE MARCHÉ DE LA BATTERIE
D'ICI À 2030 (McKinsey)

6,1

MILLIARDS D'EUROS
L'INVESTISSEMENT EUROPÉEN
DANS LA R&D SUR LES BATTERIES
DANS LE CADRE DU PIIEC

1/3

CAPACITÉS DE PRODUCTION
DE BATTERIES DANS LE MONDE
SERONT INSTALLÉES EN EUROPE
EN 2030 (Fraunhofer ISI)

Une génération 3 « bis » en cours



Le Renault Espace VI sorti cette année est proposé uniquement en version hybride, avec une batterie lithium-ion» ©Renault

10%

le taux de cobalt minimum
contenu dans les dernières
générations de batteries
NMC, contre 100% pour les
premières générations»

La technologie de batterie au lithium a connu des améliorations continues depuis qu'elle a équipé les premiers modèles de voitures hybrides dans les années 2000. La génération actuelle, dite « 3 » présente encore de nombreuses améliorations possibles.

Les efforts les plus importants ont déjà porté sur la réduction de l'utilisation de métaux stratégiques. Depuis les premières générations de batteries au lithium, LCO, contenant 100 % de cobalt, nous sommes arrivés aujourd'hui à des systèmes contenant 33 % dans les technologies NMC, voire 10 %. Le cobalt est remplacé en majorité par du nickel. Des améliorations ont également été importantes sur la réduction des produits chimiques, notamment des solvants, employés pour la fabrication des électrodes.

C'est aussi grâce à la volonté de réduire la présence de métaux stratégiques, chers et/ou toxiques, qu'une technologie est (re)venue dans la course pour concurrencer le procédé NMC : la technologie LFP (lithium-fer-phosphate). La simplicité de la méthode de fabrication, donc l'avantage proposé en termes de coût de production et de sécurité, a permis de compenser la faible densité énergétique des électrodes. C'est d'ailleurs la batterie adoptée par Tesla pour ses modèles 3 et Y.

Les travaux de recherche sur la génération 3 portent aussi sur l'électrolyte. Ainsi, certains laboratoires travaillent sur des électrolytes semi-solides, de type « gel », préparant l'ère du « tout solide ».

La génération 4 et le « tout solide »

« Le verrou principal de cette technologie [tout-solide] reste sa conductivité, qui réduit la mobilité des ions »

SEBASTIEN PATOUX

La génération 4 représente la prochaine génération de batteries. Elle poursuit et amplifie les avancées sur deux critères de performances clés des batteries li-ion : la densité énergétique et la disponibilité des métaux. C'est d'abord autour de l'électrolyte que la principale évolution intervient, puisqu'elle est désormais « tout-solide ».

Ces nouveaux électrolytes peuvent être composés d'oxydes, de sulfures, de polymères ou encore d'une association polymères-céramiques. Chacun des matériaux présente des avantages et des inconvénients. Les sulfures favorisent une forte conductivité et une densité énergétique supérieure (plus de 300 Wh/kg), mais peuvent s'avérer dangereux, alors que les oxydes sont plus stables, mais posent des problèmes d'industrialisation. Les électrolytes polymères sont peu conducteurs, et demandent une température élevée pour bien fonctionner, mais sont plus faciles à industrialiser. Le choix du type d'électrolyte solide conditionne ensuite celui des métaux possibles pour réaliser les anodes et cathodes. Là encore, plusieurs sous-catégories s'affrontent.

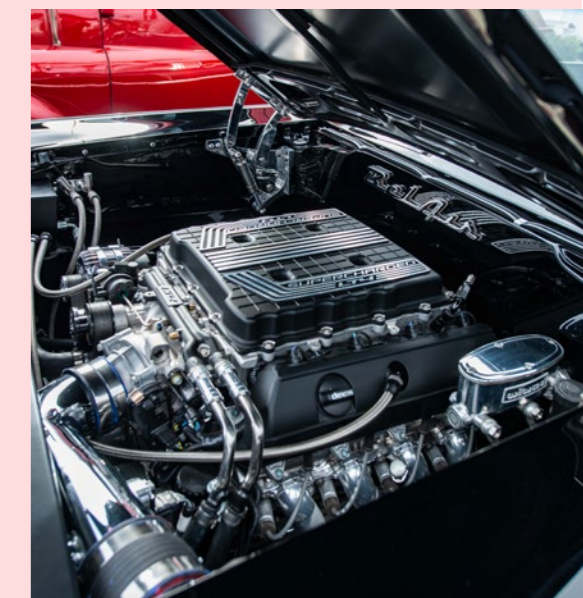
La génération « 4a » intègre ainsi des électrodes (anode) en silicium. Plus dense que le graphite utilisé jusqu'ici, le silicium présente l'inconvénient de gonfler lors de la charge. Des travaux de recherche portent actuellement sur la composition de nouveaux alliages pour réduire ce gonflement. C'est bien la génération « 4 b », avec du lithium métal, qui concentre l'attention. Le gain en densité énergétique

permis par le lithium métal, ajouté à la stabilité et la robustesse de l'électrolyte solide, fait de cette technologie la perspective la plus attirante pour les industriels. Cette nouvelle génération séduit déjà les industriels, Volkswagen, Bosch, Solvay ou Samsung ayant réalisé des investissements dans des start-up ou des capacités de production de composants.

Cette génération 4 a encore des inconvénients. « Le verrou principal de cette technologie [tout-solide] reste sa conductivité, qui réduit la mobilité des ions », souligne Sebastien Patoux, responsable batteries au CEA. La technologie d'électrolyte solide doit permettre d'utiliser sans danger l'électrode de li-métal, connue pour sa problématique de formation de dendrites de lithium en charge dans le cas des électrolytes liquides. Ce phénomène est à l'origine d'un mauvais fonctionnement [court-circuit] de la batterie li-métal à électrolyte liquide. Pour l'instant, Blue Solution (groupe Bolloré) fait partie des rares entreprises à produire ce type de batteries, dotées d'électrolyte tout-solide à base de polymères. Le groupe travaille activement à lever le principal verrou qu'est la température de fonctionnement de ces batteries.

Les batteries à électrolyte solide ne devraient pas arriver sur le marché avant 5 ans.

La rupture de la génération 5



« La technologie li-soufre permet de s'affranchir des matériaux critiques tels que le cobalt et le nickel, tout en offrant une densité d'énergie massique supérieure, de l'ordre de 400, voire de 500 Wh/kg »,



Responsable batteries au CEA

La génération 5 poursuit toujours la recherche d'une densité plus forte, mais en explorant des technologies véritablement de rupture. Une première technologie reprend le concept d'électrolytes solides avec du lithium-métal pour l'électrode négative, mais en remplaçant, cette fois, l'électrode positive par du soufre. « La technologie li-soufre permet de s'affranchir des matériaux critiques tels que le cobalt et le nickel, tout en offrant une densité d'énergie massique supérieure, de l'ordre de 400, voire de 500 Wh/kg », poursuit Sebastien Patoux.

Outre les problématiques inhérentes au lithium-métal et à l'électrolyte solide, le principal verrou qui entrave cette technologie demeure sa fabrication liée à une maturité encore faible. Le soufre n'est pas aussi stable en cyclage que les matériaux d'électrode positive (gonflement, dégradation) et affiche une faible conductivité. Des travaux sont ainsi en cours pour relever les défis de cette technologie néanmoins prometteuse.

Les autres technologies sont plus prospectives encore. La première est la batterie « li-air », qui utilise l'oxydation du lithium à l'anode et la réduction de l'oxygène à la cathode pour produire de l'électricité. Malgré sa forte densité potentielle (500 Wh/kg), cette batterie ne s'avère pas encore assez stable. La technologie li-CO₂, qui affiche sur le papier une capacité plus forte, de près de 2000 Wh/kg, fonctionne au dioxyde de carbone. Elle peut intégrer éventuellement un électrolyte à base de liquide ionique.

Il faut encore parler des batteries à électrolytes aqueux « superconcentrés ». L'innovation porte ici essentiellement sur la partie chimie, puisque cet électrolyte est compatible avec la plupart des électrodes utilisées dans les autres technologies de batteries. La valeur ajoutée de cet électrolyte concentré en sel – elle est d'ailleurs appelée « water-in-salt » – est surtout environnementale. Elle abaisse considérablement, en revanche, la densité énergétique de la batterie.

IMN, spécialiste des matériaux de batteries



L'équipe Stockage et Transformation électrochimique de l'énergie (ST2E) de l'Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (Université de Nantes/CNRS) est spécialiste de l'élaboration de nouveaux matériaux d'électrode, de leurs mises en forme, de leurs caractérisations, ainsi que de l'analyse des mécanismes impliqués dans le fonctionnement d'une batterie. Elle est ainsi particulièrement bien placée pour évaluer les performances des matériaux alternatifs, préférés à ceux, traditionnels, utilisés dans les batteries à base de cobalt ou de graphite.

L'IMN étudie, par exemple, le remplacement du cobalt employé dans les électrodes positives par du nickel, et la substitution du graphite par du silicium dans les électrodes négatives. Les performances sont supérieures, mais la batterie perd en stabilité. L'Institut teste également des électrolytes intégrant des liquides ioniques. Cet ajout rend la batterie plus sûre, mais implique des charges plus longues en raison de la plus grande viscosité de ces électrolytes.

PIONNIER DE LA MODÉLISATION DFT

Une autre spécialité du laboratoire est la maîtrise des outils de simulation et modélisation avancées, pour dépasser les limites des techniques de caractérisation électronique des matériaux.

L'équipe a recourt à de nouvelles technologies de modélisation DFT (Density functional theory, modélisation à partir de la densité électronique des électrons), ainsi que plusieurs procédés spectroscopiques avancés. L'IMN possède ainsi un savoir-faire unique pour évaluer les performances des matériaux.

MATÉRIAUX POLYMÈRES

Elle amène également ses chercheurs à opérer sur des projets affichant des niveaux de TRL plus élevés, au contact, souvent, d'industriels. L'IMN travaille, par exemple, avec le Belge Umicore sur l'analyse de la réactivité de surface de ses matériaux, ou encore avec Arkema concernant les performances des polymères utilisés dans des batteries de quatrième génération.

CONTACTS

BERNARD LESTRIEZ
Enseignant-chercheur
à l'IMN

✉ bernard.lestriez@univ-nantes.fr

PHILIPPE POIZOT
Enseignant-chercheur
à l'IMN

✉ philippe.poizot@univ-nantes.fr



TRL 5

Un labCom avec Blue Solutions

L'IMN a lancé, fin novembre, un laboratoire commun avec l'entreprise Blue Solutions, filiale batterie du groupe Bolloré.

→ Créer une batterie LMP

L'IMNBlue Lab, créé en parallèle de celui du LEPMI, porte sur le développement d'une batterie tout solide, LMP (lithium métal polymère), de quatrième génération. Si l'objectif est de prolonger l'autonomie et la durée de vie de ces batteries, le cœur du projet est de les faire fonctionner à température ambiante.

→ Descendre sous 60° en fonctionnement

« Actuellement, la troisième génération de ces batteries LMP est déjà exploitée dans des flottes de bus, parce qu'il est possible de maintenir ces batteries à plus de 60 °C. Rendre accessible cette technologie au véhicule électrique du particulier est le défi de la quatrième génération », explique Philippe Poizot, enseignant chercheur à l'IMN, membre de l'équipe Stockage et Transformation Electrochimiques de l'Energie.

→ Caractérisation de l'IMN

Le laboratoire a pour mission de poursuivre sa collaboration avec Blue Solutions, en apportant son expertise dans le domaine de la caractérisation des matériaux et de l'optimisation des batteries. Il s'agit d'une nouvelle étape dans une collaboration amorcée en 1997. Le dernier projet de recherche mené par les deux partenaires portait sur la mise au point d'une batterie intégrant une solution aqueuse comme électrolyte.

→ Commercialisation en 2026

Blue Solutions a annoncé vouloir lancer sa nouvelle batterie LMP en 2026. Une usine de production est également prévue pour 2028.



Mise au point d'une Batterie organique

L'IMN travaille sur le concept des batteries « organiques », plus facilement recyclables et intégrant des éléments chimiques naturellement abondants, comme le carbone, l'oxygène ou l'hydrogène. Il collabore actuellement avec le CEA de Grenoble (IRIG/LITEN) sur un prototype de batterie li-ion hybride combinant une électrode organique lithiée et une électrode négative conventionnelle à base de graphite.

TRL 1-3

TRL
3

Un partenariat avec Armor Group

Le projet Defibatt porté par la PME nantaise Armor Group et l'IMN a été sélectionné dans le cadre de France 2030 l'année dernière. Le projet permet de préparer les composants de l'entreprise à la prochaine génération de batterie.

→ Spécialiste des «collecteurs»

L'entreprise installée près de Nantes s'est diversifiée il y a plusieurs années dans les collecteurs de courants fonctionnalisés par un revêtement pour les batteries lithium. Ces composants améliorent l'interface avec l'électrode, et favorise ainsi des charges plus rapides et augmente la durée de vie des batteries.

→ Collecteur 4^{ème} génération

Armor a obtenu en 2022 un financement de 1,3 millions d'euros, dans le cadre de la stratégie d'accélération Batteries de France 2030. Le projet Defibatt, lancé pour quatre ans, a pour objectif de mettre au point ces collecteurs pour les batteries de quatrième et cinquième génération. Il doit permettre spécifiquement d'augmenter les performances des batteries (densité, puissance, longévité et sécurité).

→ Une salle de prototypage créée en 2015

Le laboratoire commun créé en 2015 a déjà permis de démontrer la pertinence de ces collecteurs fonctionnalisés. Une salle de prototypage a été développée à l'IMN pour concevoir et tester les collecteurs dans un petit prototype de batterie « cellule poche », proche des standards industriels (voir encadré).



PLATEFORME TECHNOLOGIQUE Pré-industrialisation des «cellules poches»

La collaboration entre l'IMN et Armor Group a permis de développer une plateforme de prototypage et de cyclage de batteries au format « cellule poche ». L'IMN réfléchit à ouvrir cette plateforme à d'autres entreprises, pour mettre en œuvre une activité de prototypage à la demande pour l'évaluation de matériaux ou composants de batteries. Une entreprise comme One-sixone s'est déjà montrée intéressée.

TRL
6



IPREM, l'ère du « post lithium-ion »



L'Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (UPPA/CNRS), est spécialiste du stockage électrochimique de l'énergie. Seul ou en partenariat avec l'ICMCB (Université de Bordeaux/Bordeaux INP/CNRS), l'IPREM se concentre sur deux problématiques : l'identification des réactions d'oxydoréduction des batteries au Li et les processus de formation des couches interfaciales électrode-électrolyte.

Le laboratoire IPREM développe notamment de nombreux projets de recherche dans le domaine du « post lithium-ion », pour lesquels l'élément lithium est substitué par d'autres, bien plus abondants sur terre, comme le sodium, le calcium, le magnésium ou le potassium, afin d'anticiper les futures tensions d'approvisionnement.

UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE POUR LE « TOUT-SOLIDE »

Dans le cadre de ses travaux sur la physico-chimie des surfaces et des interfaces, il s'appuie sur une

des plus importantes plateformes expérimentales françaises dans le domaine avec des équipements et des environnements dédiés, la plateforme X-Rise, installée au sein du centre de services expérimentale de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA Tech).

L'IPREM maîtrise notamment grâce à cet outil des techniques de spectrométrie et de microscopie afin de sonder la matière à un niveau local (atomique) et d'étudier les phénomènes de surface et d'interface entre les différentes couches solides composant les batteries tout-solide. « *Notre objectif est de comprendre les phénomènes physico-chimiques des interfaces dans le cadre des batteries tout-solide, donc améliorer la performance, appréhender leur vieillissement et renforcer leur sécurité* », explique Hervé Martinez, coordinateur du projet et professeur à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Cette plateforme va être centrale pour mener le projet RAISE 2024 (voir en dessous).

CONTACTS

HERVÉ MARTINEZ

Professeur des Universités UPPA, coordinateur HUB Raise2024

✉ herve.martinez@univ-pau.fr

RÉMI DEDRYVÈRE

Professeur des Universités UPPA

✉ remi.dedryvere@univ-pau.fr



Batterie « tout-solide » avec Total-Saft et Arkema

Le laboratoire mène depuis 2019 le projet de recherche public/privé HUB RAISE 2024 pour développer

→ Partenariat avec Total-Saft et Arkema

Le projet regroupe cinq partenaires, dont trois laboratoires académiques : l'IPREM, le centre d'imagerie à rayon X D-MEX (UPPA-CNRS), Pau Droit public (UPPA) et deux partenaires privés, Total-Saft et Arkema, spécialistes respectivement des batteries et des matériaux polymères avancés.

→ Electrolyte polymère

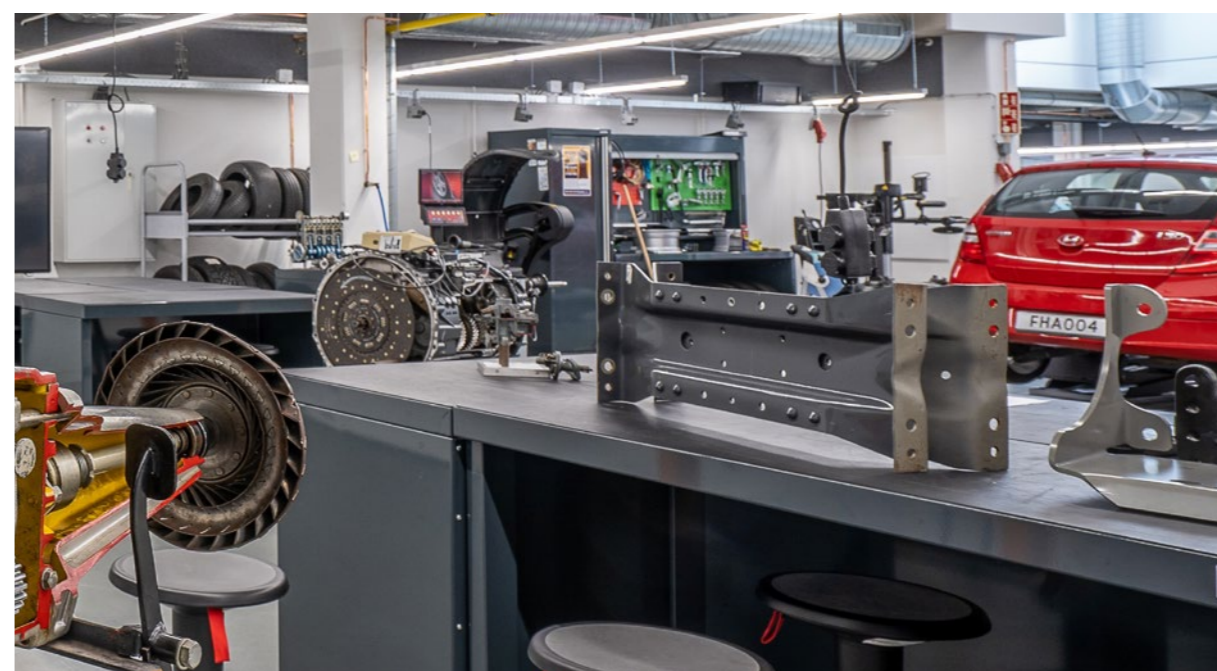
Le projet HUB RAISE 2024 (toward All solid State battery in 2024) porte sur le développement d'un prototype de batteries tout-solide à électrolytes polymères.

→ Modéliser les interfaces

Le projet comprend trois volets principaux : le développement d'électrolytes solides polymères coordonné par Arkema, l'identification et la modélisation des interfaces solide-solide enfouies dans les batteries menées par l'IPREM et D-Mex et enfin l'étude des comportements électrochimiques en cyclage coordonnée par Total-Saft.

→ Un objectif de TRL 6

Les partenaires se sont fixés comme objectif de développer un prototype présentant une maturité technologique (TRL) de 6 en 2024



TRL
5

Un partenariat de long terme avec Total-Saft

Total-Saft est un partenaire industriel du laboratoire Iprem, depuis plus de 15 ans. La collaboration s'est concentrée autour de la caractérisation des interfaces électrode/électrolyte.

→ Des équipements uniques de caractérisation

Le partenariat de Saft, puis de Saft-Total, s'est noué à l'origine autour de compétences en caractérisation des matériaux de l'Iprem. Au début des années 2000, l'institut était un pionnier sur ce domaine, grâce notamment à sa maîtrise de technologies de type spectroscopie XPS. Cette technique permettait de caractériser les surfaces « de faible profondeur », à l'échelle du nanomètre.

→ Augmenter la durée de vie des batteries

Saft cherche justement à l'époque à mieux comprendre le comportement des matériaux aux interfaces, lorsque l'électrode est au contact avec l'électrolyte, afin de limiter leur dégradation et augmenter la durée de vie des batteries. L'entreprise est spécialisée dans le développement de batteries pour des applications industrielles, et ses batteries doivent pouvoir fonctionner entre 10 et 20 ans. Or les interfaces sont au cœur du vieillissement des batteries. L'entreprise se tourne ainsi vers l'Iprem pour analyser les comportements des différentes interfaces.

→ Sept thèses lancées en 20 ans

La collaboration de Saft avec l'Iprem s'est concrétisée tout d'abord par le financement de sept thèses, qui ont parfois donné lieu à l'embauche des doctorants par l'entreprise. L'Iprem et l'industriel se sont également associés pour décrocher cinq projets ANR et trois projets européens, ainsi qu'un projet collectif financé par l'ADEME.

→ Une expertise unique pour les générations 4 & 5

Le partenariat est aujourd'hui toujours dynamique. Tout d'abord parce que la connaissance historique des produits de Saft par l'Iprem est une ressource précieuse pour l'entreprise. Ensuite parce que l'Iprem garde toujours un temps d'avance dans le domaine de la caractérisation. Saft compte notamment sur l'institut pour l'accompagner dans l'analyse des résultats. Et dans le cadre des projets HUB RAISE 2024, les deux partenaires comptent travailler sur le sujet complexe de la caractérisation des interfaces dans les batteries tout-solide.



TRL
1-3

Batterie au soufre et technique ALD

Dans le domaine des batteries tout-solide, le laboratoire développe ou a mis au point différentes collaborations partenariales (notamment avec l'entreprise Renault concernant la stabilité des interfaces dans les batteries tout-solide au lithium, thèse soutenue en 2021), académiques avec le LRCS ou encore avec le CEA Tech Bordeaux, avec deux thèses en cours : l'une sur de nouveaux matériaux de cathodes à base de soufre et l'autre sur l'utilisation de la technique ALD (Atomic Layer Deposition), procédé de dépôt de couches minces atomiques, pour la fabrication de batteries.

L RCS modélise la production de batteries



« Grâce à ces modèles, nous pouvons par exemple prédire l'influence de l'ensemble des paramètres impliqués dans la fabrication d'une électrode sur ses propriétés, comme la performance »



Chercheur au L RCS et spécialiste en modélisation numérique et en IA

Le L RCS (CNRS/Université de Picardie Jules Verne) a développé des compétences particulières en synthèse de matériaux et en électrochimie, et possède donc les compétences pour fabriquer et étudier différents types d'électrodes, électrodes poreuses composites ou épaisses frittées.

Il peut s'appuyer pour cela depuis 2014 sur une plateforme de « pré-transfert », permettant le préprototypage des batteries, à destination des chercheurs du Réseau du stockage électrochimique de l'énergie (RS2E). Ce type d'équipement a permis la création de la start-up Tiamat (batterie sodium-ion) par exemple.

Enfin le laboratoire est doté de ressources en matière de caractérisation des matériaux, grâce à des équipements permettant la diffraction des rayons X (DRX), ainsi qu'en calcul scientifique pour la simulation numérique et l'intelligence artificielle (IA).

Le laboratoire s'est particulièrement illustré par ses capacités à modéliser et simuler des procédés de fabrication des batteries. Les chercheurs peuvent ainsi utiliser ces modèles pour comprendre et prédire l'influence des paramètres de conception sur les propriétés d'électrodes et de cellules, par exemple lithium-ion. « Grâce à ces modèles, nous pouvons par exemple prédire l'influence de l'ensemble des paramètres impliqués dans la fabrication d'une électrode sur ses propriétés, comme la performance », explique Alejandro A. Franco, chercheur au L RCS et spécialiste en modélisation numérique et en IA. Ces modèles permettent de prévoir l'influence de différentes associations de paramètres, et ainsi d'optimiser des propriétés d'électrodes comme leurs conductivité, densité, surface active ou encore tortuosité (distance moyenne parcourue par les ions lithium pour traverser la porosité) des électrodes. Ces modèles pourraient, à terme, optimiser le processus de production industrielle.

Les taux de batteries défectueuses en sorties d'usine ou des lignes pilote oscillent encore entre 5 % et 30 % selon les technologies choisies.

CONTACTS

ALEJANDRO A. FRANCO
Professeur au L RCS, Université de Picardie Jules Verne/CNRS
✉ alejandro.franco@u-picardie.fr

TRL
6

Le premier jumeau numérique d'une ligne de batterie

Alejandro Franco travaille sur plusieurs pistes pour industrialiser et commercialiser sa technologie de jumeau numérique

→ Création d'une plateforme computationnelle

Le chercheur est soutenu depuis 2017, et l'obtention d'une bourse ERC Consolidator de presque deux millions d'euros pour son projet lié à Arstistic. Il consiste à développer un jumeau numérique du procédé de fabrication des batteries lithium-ion. La bourse doit notamment permettre de créer une plateforme computationnelle pour simuler le procédé de fabrication d'une batterie en entier.

→ Une bourse pour commercialiser la plateforme

En 2022, le professeur reçoit une deuxième bourse, l'ERC Proof of Concept, de 150 000 € pour son projet Smartistic, lié à Artistic. Ce financement lui permet de monter en TRL sur son projet, et notamment de commencer à explorer le potentiel commercial de ses recherches.

→ Collaborations industrielles

L'équipe souhaite profiter de l'engouement autour des giga-batteries pour commercialiser sa solution de modélisation et d'optimisation. Le laboratoire est déjà entré en contact avec plusieurs acteurs du secteur, en France et à l'étranger.

→ Une application pour la formation

L'équipe du professeur Franco développe, en parallèle, une version du logiciel pour des activités de formations sur le procédé de fabrication de batteries. Cet outil est développé grâce au soutien financier de la part du programme prématuration du CNRS. Ce logiciel est associé à des lunettes de réalité mixte.

→ Une start-up en préparation

L'équipe travaille enfin sur le lancement d'une start-up, qui pourrait porter plusieurs applications en lien avec le jumeau numérique développé actuellement. Le projet, baptisé The Battery Kitchen, a ainsi été retenu par le programme d'accompagnement à la création d'entreprise RISE du CNRS en décembre 2022.

Mecaware, l'hydrométallurgie pour recycler les batteries



Julien Leclaire, responsable de l'équipe Chimie supramoléculaire de l'Institut de chimie et de biochimie moléculaires et supramoléculaires (ICBMS), est spécialisé de la chimie combinatoire dynamique (voir encadré). Le scientifique découvre, au tournant des années 2010, que certaines structures spécifiques réussissent à capter du dioxyde de carbone. Encouragé par la montée en puissance des enjeux écologiques, il met au point, au sein de l'équipe Chirosciences de l'Institut des sciences moléculaires de Marseille (Centrale Marseille), puis au sein de l'ICBMS à partir de 2013, différentes structures moléculaires, constituées notamment de polyamines et d'aldéhydes, capables de capter des molécules de CO₂. Cette découverte majeure s'accompagne rapidement d'une nouvelle découverte tout aussi remarquable en matière d'hydrométallurgie.

UNE NOUVELLE MÉTALLURGIE

Grâce à l'essor des nouvelles techniques d'analyse structurale, par RMN cristallographique notamment, Julien Leclaire découvre que ces structures moléculaires réussissent aussi à capter des métaux, le CO₂ faisant office de « stimulus » pour former ces précipités. En permettant de capter ces deux

matériaux ensemble, ce nouveau procédé métallurgique pourrait aussi apporter une réponse aux problématiques d'approvisionnements en métaux stratégiques de l'Europe.

Il reçoit un soutien de la part de la Satt Sud-Est, et dépose ses premiers brevets dans le courant des années 2010. Il teste ainsi différents procédés de récupérations de métaux, contenus dans les lampes basse consommation, les batteries au nickel et le CO₂ contenu dans les fumées de pots d'échappement. Le succès de ces premiers travaux conduit à la publication d'un article dans « Nature Chemistry », en 2020. Le chercheur est ainsi encouragé à franchir une nouvelle étape : il cofonde avec l'entrepreneur Arnaud Villers d'Arbouet la start-up Mecaware en 2020, avec le soutien de la Satt Pulsalys. Le procédé commercialisé par Mecaware permet de récupérer le lithium, le manganèse, le nickel et le cobalt des batteries, et de produire ainsi plusieurs kilos de métaux par cycle.

La start-up souhaite installer des usines de recyclage de déchets au pied des « giga-factory » de batteries en construction en France. Mecaware s'est fixé comme objectif de bâtir cinq usines d'ici à 2030.

CONTACTS

JULIEN LECLAIRE

Co-fondateur
de Mecaware
Chercheur à l'ICBMS
✉ julien.leclaire@univ-lyon1.fr

ARNAUD VILLERS D'ARBOUET

CEO de Mecaware
✉ ava@mecaware.com



Un premier projet de ligne de recyclage

Mecaware a été sélectionné dans le cadre d'un appel France 2030 pour installer une ligne pilote dans le centre de recherche de Verkor.

→ Un premier accord avec Verkor

Mecaware a été sélectionné dans le cadre du projet ScrapCO₂MET, financé dans le cadre de l'appel « recyclage, recyclabilité et réincorporation des matériaux » de France 2030. Le projet est porté avec Verkor, MTB Manufacturing et les laboratoires ICBMS et le Lepmi.

→ Un projet unique

Le projet consiste à construire dans un premier temps une unité pilote de recyclage sur le futur site du centre R&D de Verkor à Grenoble (photo), d'une capacité de 50 à 100 t/an. Il se distingue par son focus unique sur les rebuts de production, et son installation « in situ » dans les usines de batteries.

→ Une évolution vers l'usine de Dunkerque de Verkor

Une validation permettra la construction d'une ligne industrielle sur le site de Verkor à Dunkerque. L'industriel doit inaugurer ce site dans le courant de l'année. La ligne de recyclage de Mecaware pourra traiter entre 6000 et 8000 tonnes de rebuts par an.

→ Une 3^{ème} levée de fonds en préparation

La start-up compte financer la construction de sa première usine via une deuxième levée de fonds auprès d'UI Investissement, Kreaxi, EIT Inno Energy, BNP Paribas Développement, Crédit Agricole Création et le réseau Arts et Métiers Business Angels. Une troisième devrait suivre rapidement.



Futur centre de recherche de Verkor à Grenoble

TRL
3

Un projet pour récupérer cuivre, cobalt et nickel

Julien Leclaire travaille actuellement sur l'optimisation de la technologie de Mecaware, afin de faire de la start-up un producteur de métaux plus diversifié et plus écologique.

→ Réduire la consommation d'énergie

Julien Leclaire, « concours scientifique » auprès de Mecaware, travaille sur l'optimisation des techniques de captation de métaux, afin de réduire la consommation d'énergie et de solvants (acides) des technologies utilisées.

→ Capturer de nouveaux métaux

A plus long terme, le chercheur travaille à la mise au point de structures moléculaires pour récupérer de nouveaux métaux. L'équipe CSAp de l'ICBMS s'est associée au département d'ingénierie chimique du MIT (Prof. T. A. Hatton) pour restituer le cuivre, le cobalt ou encore le nickel par voie électrochimique. Un brevet est en préparation.

→ Adapter la techno aux prochaines générations

Julien Leclaire suit enfin de près le développement des nouvelles générations de batteries, afin d'être prêt à adapter les méthodes aux métaux utilisés. « L'avantage de notre procédé est d'être d'une grande souplesse d'adaptation », assure-t-il.



Un laboratoire spécialiste de l'analyse multi-échelle

La chimie combinatoire dynamique consiste à produire de nouvelles molécules par l'association de « blocs moléculaires » liés entre eux par des liaisons réversibles. Cette méthode permet de créer des molécules complexes, comme des matériaux intelligents ou des biopolymères. Grâce aux facultés d'auto-organisation de ce type de structure, elles peuvent ainsi capturer différents types de molécules sans que leurs fonctions soient affectées.

Au sein de l'équipe Chimie supramoléculaire de l'ICBMS, composante du Labex lyonnais iMUST, le chercheur poursuit ses travaux sur la reconnaissance et l'extraction de molécules à haute valeur ajoutée, ainsi que sur la mise au point de procédés plus écologiques pour les secteurs médicaux et industriels.

TRL
1-3



Le rendez-vous des innovations de rupture

POC Impact



Chaque trimestre notre équipe organise un événement pour la sortie de son nouveau Cahiers d'innovation : l'occasion de découvrir en avant-première les innovations de la science qui feront les marchés de demain, et d'échanger avec les chercheurs-entrepreneurs et dirigeants de spin-offs.

Nos évènements sont aussi l'occasion d'échanger avec vos pairs, directeurs R&D, responsables Innovation, CEO, CTO et investisseurs, sur les applications de ces innovations pour vos filières.

POC Media vous propose de parrainer ces évènements de découvertes scientifiques et technologiques, et de positionner votre entreprise à la pointe de l'innovation :



- **Découvrez** les meilleures innovations de rupture en avant-première
- **Anticipez** l'impact pour vos marchés et intégrez dès à présent ces solutions
- **Rencontrez** et collaborez avec des responsables R&D et Innovation d'autres filières
- **Communiquez** sur les ambitions R&D et Innovation de votre entreprise

CALENDRIER



OCT. 2023

Réseaux 5G,
6G & XG

DÉC. 2023

Carburant
de synthèse

MARS 2024

IA Embarquée

JUIN 2024

Chimie
biosourcée

**Vous souhaitez parrainer
nos évènements ?**

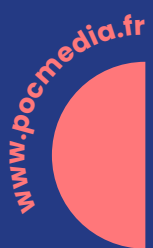
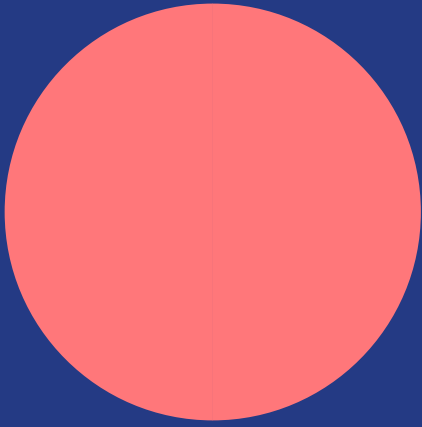
N'hésitez pas à nous contacter.

✉ florent.detroy@pocmedia.fr

☎ +33 (0)6 31 11 19 07



Conception graphique : Jessica Richer
Publication : Mai 2023
Crédits photos : Pexels



POC Media

8 Rue Rouvet, 75019 Paris
florent.detroy@pocmedia.fr
06 31 11 19 07

