



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



QUELS MATÉRIAUX POUR L'EUROPE DES BATTERIES ?

janvier / 2023

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
BATTERIES : OBJECTIF 2030	4
▪ LES RESSOURCES EN MATÉRIAUX, TALON D'ACHILLE DE L'EUROPE DES BATTERIES ?	4
▪ QUELS MATÉRIAUX POUR LES BATTERIES DU FUTUR ?	6
▪ « LE RECYCLAGE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES BATTERIES EST UN ENJEU IMMÉDIAT »	8
▪ « NOTRE AMBITION EST DE DEVENIR LEADER SUR LE MARCHÉ DES BATTERIES DE MOYENNE PUISSANCE »	11
POUR ALLER PLUS LOIN	14
▪ OPTIMISER LE RECYCLAGE DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES	14
▪ LES BATTERIES STRUCTURELLES POURRAIENT RÉVOLUTIONNER LE STOCKAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES	16
▪ VERS DES BATTERIES PLUS DURABLES CONSTRUITES EN EUROPE	18
▪ EN 2025, DES BATTERIES AUTOMOBILES AVEC UNE AUTONOMIE DE 800 À 1000 KM	20
▪ ASSOCIER DES POLYMÈRES POUR AUGMENTER LA DURABILITÉ DES BATTERIES	22
▪ LES THÈSES DU MOIS : QUELS MATÉRIAUX POUR L'EUROPE DES BATTERIES ?	23

INTRODUCTION

L'usage des batteries dans le monde n'a rien de nouveau : cela fait des décennies que les batteries inondent notre quotidien. Depuis les années 2000, les chercheurs développent des batteries pour des usages de plus en plus énergivores et quotidiens. L'exemple certainement le plus symbolique concerne les appareils connectés, les smartphones par exemple. Suivent les usages portés sur l'internet des objets par exemple, secteur où les appareils connectés sont de plus en plus nombreux, de plus en plus réduits, d'où des besoins en batteries spécifiques. Autre exemple : les drones. Qu'ils soient utilisés pour les loisirs ou pour un usage professionnel, notamment en agriculture, ces appareils nécessitent des batteries ayant un rapport poids/autonomie qui va décider de la qualité et de l'efficacité du produit.

Enfin, dernier exemple, le transport : c'est ce secteur, générateur d'une quantité faramineuse de gaz à effet de serre, qui booste la recherche sur des batteries de nouvelle génération. Car aujourd'hui, c'est la batterie lithium-ion qui est utilisée de manière très majoritaire, pour deux raisons : la première, c'est que ces batteries sont développées depuis longtemps et que les aspects technologiques de ces appareils sont maîtrisés, mûres industriellement. La seconde, c'est que les batteries lithium-ion font toujours l'objet aujourd'hui d'améliorations, ce qui les rend extrêmement compétitives, encore aujourd'hui.

Devant l'écrasante domination chinoise sur le terrain des batteries, l'Europe a décidé de réagir, en développant, d'ici à 2030 selon les objectifs affichés, une véritable filière industrielle européenne de la batterie. Une ambition cohérente avec les ambitions du vieux continent en matière de mobilité électrique, mais un véritable défi, quand on sait l'avance prise par la Chine sur ce terrain, et quand on connaît le peu de ressources en matériaux composant les batteries existant en Europe... et la nécessité d'importer massivement ces matériaux, de Chine notamment.

BATTERIES : OBJECTIF 2030

LES RESSOURCES EN MATÉRIAUX, TALON D'ACHILLE DE L'EUROPE DES BATTERIES ?

L'utilisation des batteries est au cœur des modes de vie actuels, et le sera encore plus dans les décennies à venir. Aujourd'hui, l'évolution des mobilités par exemple, draine avec elle le développement d'une filière entière. La question de la disponibilité des matériaux pour les batteries se pose, à mesure que différentes technologies se développent pour le futur.

L'Europe a décidé de se battre contre le monopole chinois sur la fabrication de batteries destinées à la mobilité électrique. Ainsi, c'est une véritable industrie européenne de la batterie qui est en train de voir le jour. A l'heure actuelle, les **batteries Lithium-ion** s'octroient la quasi-totalité des parts de marché, dans le domaine des **véhicules électriques**. Si d'autres modèles sont **développés par les industriels**, et pour d'autres usages, le **modèle lithium-ion est aujourd'hui incontournable**.

L'objectif du vieux continent est d'atteindre 25% de la production mondiale d'ici à 2030, en développant pas moins de 30 gigafactories, dont cinq en France. **Cela équivaut à une capacité de production de 500 GWh par an.**

Cette croissance programmée de la production made in Europe de batteries, justifiée par l'électrification, également programmée, des transports, va engendrer un besoin croissant en matériaux, pour les produire à grande échelle. C'est ici que les problèmes commencent.

Tout d'abord, quels sont les matériaux qui composent la batterie lithium-ion, qui est aujourd'hui la batterie la plus fabriquée ? Ces batteries sont composées d'une électrode positive composée de lithium et de cobalt, et d'une électrode négative composée de graphite. L'usage de **métaux de transition**, ayant la faculté de s'oxyder à la charge et de

se réduire à la décharge pour constituer de nouvelles électrodes positives, va voir les industriels également utiliser du nickel, du fer, ou du manganèse.

L'effervescence autour du développement de batteries innovantes dans les années à venir ne permet pas aujourd'hui de prédire quels sont les matériaux qui constitueront les batteries du futur. Pour ce qui est du futur proche, les batteries lithium-ion sont toujours en phase d'amélioration, et leur coût de production baisse d'année en année.

La question des ressources naturelles se pose donc certainement. **L'institut BMI prévoit une demande de graphite multipliée par 18,9 entre 2019 et 2029.** Une hausse faramineuse qu'il faut anticiper.

Pour le nickel, le volume de demande sera multiplié par 26 ! Cette hausse calculée au niveau mondial sera probablement plus forte encore en Europe, étant donné les investissements actuels. Or, l'Union Européenne n'a pas d'autre choix que d'importer massivement ces matériaux pour soutenir un rythme élevé de production. En effet, le taux de dépendance à l'importation de notre continent est proche des 100 % pour de nombreux matériaux comme le lithium, le graphite ou le cobalt. Les grands pays producteurs de ces matériaux, comme la **Chine**, le Chili ou encore le Congo, rendent l'hexagone et le continent entier extrêmement dépendant de ces fournisseurs de matériaux pour développer une filière industrielle des batteries compétitive et pérenne. Ces tensions à venir sur le marché des matériaux entrant dans la composition des batteries existent déjà aujourd'hui, et expliquent en partie **l'augmentation des prix constatés pour des matériaux comme le lithium ou le graphite.**

De plus, à l'heure actuelle, la compétition internationale pour le développement de batteries les plus performantes possible tend les chaînes de production. Une illustration récente de ce phénomène est la difficulté actuelle des producteurs de matériaux cathodiques à suivre la demande grandissante en Europe. D'où la nécessité de s'adresser aux pays asiatiques, [Chine et Corée en tête, pour la fourniture de ces matériaux](#).

Pour résumer, si l'Europe a décidé de se donner les moyens de développer une véritable filière continentale pour assurer ses besoins en batteries et développer une mobilité électrique massive, il paraît difficile d'imaginer une véritable autonomisation industrielle à ce niveau, tant les besoins en matériaux, et de manière plus contextuelle en composants, est important. Un chiffre pour illustrer cet état de fait : aujourd'hui, la Chine dispose sur son sol de 80% des capacités mondiales du traitement du minerai des batteries.

Une première réponse a été donnée par l'Europe sur ce point, avec la volonté de recycler de plus en plus ces matériaux pour les réutiliser. Une approche qui pourrait payer sur le long terme, mais qui va dans un premier temps affecter la compétitivité de l'industrie européenne par rapport à la concurrence.

19/01/2023

QUELS MATÉRIAUX POUR LES BATTERIES DU FUTUR ?

Si les batteries lithium-ion sont aujourd'hui, de loin, les plus utilisées, d'autres pistes sont aujourd'hui étudiées. Cependant, atteindre le niveau de performance des batteries lithium-ion avec de nouveaux matériaux représente un véritable défi technologique.

Que ce soit pour équiper des véhicules électriques de plus d'une tonne, ou les objets connectés qui envahissent notre quotidien, l'usage des batteries lithium-ion est devenu incontournable dans de nombreux secteurs d'activité. Et pour cause : le lithium, métal alcalin extrêmement léger, présente une densité énergétique importante, tout en occupant un volume très faible. Ces propriétés ont permis de miniaturiser les batteries, pour in fine produire de nouveaux produits technologiques - montres, smartphones, ordinateurs, drones... - aux tailles de plus en plus réduites. De plus, la technologie lithium-ion permet de produire des batteries qui ne nécessitent pas d'entretien, et présentant un taux d'autodécharge extrêmement réduit.

Différentes technologies électrochimiques permettent de fabriquer des batteries au lithium :

- La plus répandue est le lithium-manganèse-cobalt (NMC), réservée pour les solutions embarquées ;
- Le lithium-polymère (LiPo) est également très utilisé, mais sa durée de vie est courte au regard de son prix.
- Le lithium-fer-phosphate (LFP) est une technologie de plus en plus utilisée pour des applications stationnaires, notamment car elle possède une grande stabilité.
- Le lithium-cobalt-nickel-aluminium (NCA) est une technologie dense en énergie, mais qui présente une certaine fragilité, qui empêche une utilisation intensive.
- Le lithium manganèse (LMO) est une technologie où le cobalt est remplacé par le manganèse, qui lui confère une durabilité plus importante à un moindre coût.

D'autres technologies sont aujourd'hui étudiées et pré-

sentent un potentiel qui intéresse les industriels. On peut citer le lithium-titanate (LTO), le lithium-air, ou encore le lithium-cobalt-oxyde (LCO). Ces technologies présentent certaines contraintes, notamment en termes de stabilité et de coût, mais également un potentiel intéressant qui justifie les recherches menées actuellement.

Aujourd'hui, l'usage massif de lithium oblige l'industrie et la recherche à plancher sur la mise au point de **batteries composées de matériaux innovants**, permettant d'améliorer leurs performances par rapport aux technologies lithium-ion que nous utilisons massivement aujourd'hui. Le principal problème lié à l'usage du lithium est la quantité astronomique d'eau nécessaire - 2,2 millions de litres - pour obtenir une tonne de ce matériau. Si le lithium peut potentiellement être réutilisé, à l'heure actuelle les **technologies de recyclage** ne sont pas généralisées dans l'industrie. Il est probable que la situation évolue dans les prochaines années, et l'**Europe légifère** dans ce sens actuellement.

Ceci dit, quelles sont les alternatives existantes pour se passer du lithium ? Plusieurs pistes existent, à des degrés de maturité technologique différents.

Proche chimiquement du lithium, le sodium, élément très abondant sur terre, intéresse la recherche. C'est une **alternative intéressante au lithium**, avec deux inconvénients majeurs : son poids - il est trois fois plus lourd que le lithium -, et la puissance des batteries ainsi obtenues, inférieure à celle des technologies au lithium.

Le fer pourrait également se révéler être un **excellent substitut au lithium**. Cet élément chimique permet de stocker les énergies renouvelables sur un temps beaucoup plus long, ce qui pourrait constituer un avantage fondamental dans le développement d'un mix énergétique à forte teneur en énergies solaires, éoliennes, hydrauliques... L'inconvénient majeur de l'utilisation du fer est le volume des batte-

ries, qui les rendraient trop grosses pour être incorporées dans des smartphones, et même dans la plupart des véhicules électriques.

Troisième solution, le silicium. Cet élément chimique ne remplace pas le lithium mais y est ajouté, en remplacement du graphite composant les anodes des batteries. Cela permet de produire des batteries plus sûres, mais également plus légères : aujourd'hui, le silicium est probablement la piste la plus prometteuse, en tout cas celle présentant un [potentiel très important, selon les chercheurs](#).

D'autres matériaux sont à l'heure actuelle testés dans les laboratoires de recherche du monde entier, comme [l'eau de mer](#), le [magnésium](#) et même le [chanvre](#). L'urgence écologique poussant l'industrie à développer, par exemple, une mobilité électrique a drainé des investissements massifs qui permettront, sur le moyen terme, de faire émerger des technologies de batteries nouvelles, basées sur des [matériaux](#) alternatifs au lithium... bien que ce dernier ne soit pas voué aux oubliettes, si son [recyclage](#) se généralise dans les années qui viennent.

23/01/2023

« LE RECYCLAGE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES BATTERIES EST UN ENJEU IMMÉDIAT »

Verkor est une start-up grenobloise qui ambitionne de produire sur le territoire français des batteries bas carbone en grandes quantités, pour répondre à la demande liée au développement planifié des véhicules électriques en Europe.

Gilles Moreau, co-fondateur en charge du développement durable et de l'innovation partenariale au sein de [Verkor](#), est un expert dans le domaine des batteries. Ayant été tour à tour chef de projet au CEA sur des projets de [batteries lithium-ion](#) puis expert piles à combustibles chez 3M puis Renault, entre autres, Gilles Moreau fait partie de l'équipe chargée, en 2020, d'étudier la faisabilité d'une gigafactory de production de batteries sur le territoire français.

Aujourd'hui, Verkor a validé l'intérêt de développer une gigafactory, choisi un site à Dunkerque, où les travaux commenceront dans les mois à venir.

Gilles Moreau, également vice-président de l'association européenne des industriels de la batterie [Upcell](#), a expliqué aux Techniques de l'Ingénieur l'importance de développer sur le sol européen des gigafactories pour produire des batteries tout en développant des process innovants, notamment en termes de traçabilité, de recyclage des matériaux et d'impact carbone.

Techniques de l'Ingénieur : Pouvez-vous revenir sur la genèse de Verkor ?

Gilles Moreau : Verkor est issue de l'alliance européenne des batteries impulsée par l'EIT ([European Institute Energy](#)). Cet organisme européen a pour mission de faire émerger des start-up innovantes dans le domaine de l'énergie, à l'image de [Northvolt](#) par exemple.

L'EIT [InnoEnergy](#) a souhaité la naissance d'autres projets

de gigafactories en Europe, et a rassemblé des experts des batteries, dans la région de Grenoble. De plus, l'électricité bas carbone, peu chère et sécurisée produite dans l'hexagone, ainsi que les compétences - uniques en Europe - du CEA en électrochimie, constituent une base solide pour se projeter sur une gigafactory en France.

En juillet 2020, une petite équipe a été constituée pour évaluer la faisabilité de cette Gigafactory : constituer une équipe, trouver un terrain, des clients... un an plus tard, nous avons une idée précise du terrain sur lequel construire la Gigafactory, et surtout nous avons réussi à convaincre Renault de nous suivre dans cette aventure. Avoir un client comme Renault est un atout fondamental pour se projeter sur une production de batteries en masse.

Où en est Verkor aujourd'hui ?

Cela fait un an et demi que nous sommes dans l'étape d'exécution du projet, à travers la mise en œuvre d'une ligne pilote, qui nous permet de tester les process, les produits, et qualifier les premiers prototypes qui pourront être inclus dans les véhicules Renault.

En parallèle, nous travaillons sur le site que nous avons choisi à Dunkerque pour construire la Gigafactory, dont les premiers travaux doivent débuter dans deux à trois mois.

Expliquez-nous en quoi la problématique de la durabilité est fondamentale pour développer une industrie de production de batteries pérenne ?

La problématique de sustainability (durabilité) est fondamentale aujourd'hui pour le développement de projets industriels innovants, notamment pour obtenir des financements européens.

Au niveau de Verkor, nous avons identifié quatre piliers qui doivent permettre à l'entreprise de s'installer durablement dans le paysage industriel européen.

Tout d'abord, la traçabilité des matériaux, pour mieux les choisir en fonction de leur origine. Le second pilier est le recyclage : il est **important de recycler** au maximum, pour être le moins dépendant possible des activités extractives.

Ensuite, l'impact carbone de notre activité est un facteur déterminant qui aiguille notre développement.

Dernier pilier, la formation des talents. Nous nous sommes développés dans un premier temps en allant chercher les talents, notamment en Asie, sur le développement d'usines de batteries. Aujourd'hui, nous voulons développer ce savoir-faire en interne. C'est dans cette optique que nous avons créé, avec des partenaires spécialisés dans la formation, l'**école de la batterie**, pour former des jeunes amenés à nous rejoindre, où à développer des projets innovants au sein de l'écosystème dans lequel évolue Verkor. Plus cet écosystème sera pérenne, plus les chances de l'entreprise de durer dans le temps seront importantes.

Quels produits seront fabriqués dans la future Gigafactory de Dunkerque ?

Nous développons des **cellules de batteries NMC** (nickel-manganèse-cobalt) souples (pouch) relativement grosses. On en trouve environ 200 dans un véhicule électrique. Nos batteries ne constituent pas une innovation en tant que telle. Le pari se situe plus sur le fait que la demande pour ce type de batteries existe aujourd'hui, et qu'avant de se projeter sur des batteries innovantes, il faut déjà réussir à répondre à la demande actuelle de manière efficace et durable.

Un facteur important est aussi de réussir à développer en Europe un écosystème performant et durable sur les technologies existantes, pour être compétitif par rapport, notamment, aux acteurs asiatiques.

Quelle est votre stratégie pour vous fournir en matières premières ?

Nous travaillons sur la supply chain existante, c'est-à-dire la

Chine, puisque 90% du raffinage se fait là-bas. Au-delà de cette réalité, l'objectif à terme est de se fournir en Europe. Aujourd'hui, les tensions à venir sur la supply chain, au vu du nombre de projets de gigafactories en Europe, sont prévisibles. Dans les faits, il va y avoir une dichotomie très claire entre les acteurs ayant des clients et les autres, pour qui exister durablement sera très compliqué.

Dans les années qui viennent, les fournisseurs de cellules qui vont pouvoir travailler en Europe, sont selon toute vraisemblance : les gros fournisseurs asiatiques déjà connus, et les trois gros fournisseurs européens qui ont déjà des clients : NorthVolt, ACC et Verkor.

Quelles sont les perspectives possibles en termes d'approvisionnement en matériaux pour les fournisseurs de batteries européens ?

La demande concernant ces matériaux augmentant considérablement, de nouvelles sources de lithium, de nickel ou de manganèse sont aujourd'hui en développement, que ce soit au niveau de l'extraction, du raffinage ou de la synthèse. Aussi, une partie non négligeable de ces projets vont voir le jour en Europe, au vu du mix énergétique en grande partie décarboné disponible, et de la demande croissante sur ces matériaux. La relocalisation de ces activités sur le vieux continent est un énorme enjeu pour les années à venir.

Le recyclage des batteries et des matériaux qui les constituent est-il un enjeu de compétitivité immédiat ou de moyen voire long terme ?

Selon moi, le recyclage des batteries est un atout immédiat. Quand on regarde l'industrie du recyclage, on observe qu'une grande quantité de véhicules électriques vont être en fin de vie dans 5 à 10 ans. Ainsi, une grande quantité de batteries vont devoir être recyclées à partir de 2035. Il y a deux façons d'appréhender cette réalité : soit on peut se dire que cela nous laisse du temps, soit on peut se dire qu'il faut s'y préparer dès aujourd'hui.

S'y préparer dès aujourd'hui est la solution que nous privilégions, notamment grâce aux déchets de production direc-

tement issus des gigafactories. Ces derniers constituent une source de matériaux plus facilement recyclables que ceux issus des batteries usagées.

Concrètement, une gigafactory consomme environ 60 000 tonnes de matériaux par an. Même en étant très performant, il est impossible d'éviter une perte de matériaux lors de l'usinage, qu'on va estimer aux alentours de 10%. Ce qui fait 6 000 tonnes de matériaux non usinés à retraiter.

Aujourd'hui, la capacité française de recyclage de batteries plafonne à 3 000 tonnes par an. Ainsi, rien qu'en considérant l'activité de notre Gigafactory, il est évident que nous allons nous retrouver très rapidement face à un goulet d'étranglement si rien n'est fait. Il s'agit d'un enjeu immédiat, si on veut éviter de voir nos déchets de production partir en Asie pour être recyclés. Il est donc fondamental, selon moi, qu'il y ait une montée en compétence rapide, au niveau français et européen, sur le recyclage des déchets de production.

Cette montée en compétence facilitera par la suite le développement des compétences sur le recyclage des batteries usagées. Pour résumer, il est important de prendre en marche le train du recyclage des batteries le plus rapidement possible.

Parlez-nous de la réglementation européenne établie en fin d'année dernière concernant la production de batteries sur le sol européen.

La [réglementation européenne](#) va obliger d'ici à 2030 les fournisseurs au recyclage des batteries en fin de vie, à l'incorporation de [matériaux recyclés](#) dans les batteries, à la traçabilité des matériaux et limiter l'impact carbone de la production. Il s'agit d'une réglementation extrêmement volontariste, puisqu'en 2030 les fournisseurs de batteries ne rentrant pas dans les clous de cette réglementation ne pourront pas vendre en Europe. Le recyclage ne sera alors plus un facteur différenciant entre les acteurs, mais une condition obligatoire pour pouvoir vendre en Europe. De notre côté, nous avons inscrit ces obligations dès le départ dans l'ADN de Verkor, ce qui explique en partie notre position plutôt avantageuse à l'heure actuelle.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

24/01/2023

« NOTRE AMBITION EST DE DEVENIR LEADER SUR LE MARCHÉ DES BATTERIES DE MOYENNE PUISSANCE »

La start-up amiénoise Tiamat développe et produit des batteries innovantes utilisant des ions sodium dans un format industriel standard.

Outre leurs performances spécifiques, ces batteries offrent une alternative à la technologie lithium-ion dont la production repose sur des matériaux critiques par leur rareté et leur provenance géostratégique.

Issu du réseau français sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E) porté par le CNRS, [Tiamat](#) dispose aujourd'hui de plusieurs prototypes fonctionnels, et planche actuellement sur la construction d'une gigafactory sur le sol français dans les années à venir, pour alimenter un marché européen qui va fortement croître dans les années à venir.

Hervé Beuffe, Président de Tiamat, a expliqué à Techniques de l'Ingénieur ce qui fait la spécificité des technologies sodium-ion et de la société Tiamat.

Techniques de l'Ingénieur : Présentez-nous la société Tiamat et la spécificité des batteries au sodium que vous développez ?

Hervé Beuffe : Nous développons une façon spécifique de réaliser des batteries sodium-ion. Comme pour les batteries lithium-ion, on retrouve dans la famille des batteries au sodium plusieurs chimies de cathode, qui ont chacune leurs spécificités. On distingue ainsi trois chimies différentes.

La première, les PBA (Prussian Blue Analogs) sont des [matériaux](#) de cathode peu chers et disponibles facilement. Cependant, ils vont offrir des performances de batteries moyennes. La seconde famille de chimie de cathode, les

matériaux polyanioniques, constituent les cathodes de notre première génération de batteries, qui sont aujourd'hui sur le marché. Ces composés cristallographiques ont une très forte densité de puissance, ce qui permet de fournir une forte quantité de courant sur un laps de temps très court. Ce qui permet, par exemple, de charger nos batteries de génération 1 en 10 minutes. Nous nous situons avec cette génération de batteries sur une densité d'énergie que je qualifierais de moyenne, d'environ 100 Wh/kg.

Quelles sont les applications pour ces batteries de puissance ?

Les applications pour ce type de batterie de puissance vont être l'hybridation automobile, les applications stationnaires de puissance, l'accompagnement des fuel cells d'hydrogène, les power tools... Au final, cette batterie de génération peut intéresser un ensemble de secteurs de marchés assez dispersés, mais qui au final représentent un volume relativement important. Notre ambition est de devenir la référence des batteries de puissance. Le matériau que nous avons développé pour cette application, le MVPF, est de plus breveté, ce qui nous permet d'être protégés quant à la spécificité de nos batteries de première génération.

Quels sont les matériaux qui constituent la troisième chimie de cathode des batteries au sodium ?

Les composés lamellaires constituent la troisième catégorie de matériaux utilisés. Ils concentrent d'ailleurs une très large majorité des recherches et des innovations actuelles. Notre seconde génération de batterie, que nous développons en parallèle de la première, fonctionne avec ces

composés. L'ambition avec cette seconde génération de batteries est de se rapprocher des performances des batteries LFP (lithium-fer-phosphate). voire de les dépasser. Il ne s'agit pas d'un produit de puissance comme peut l'être notre batterie de première génération, mais d'un produit de densité moyenne, qui peut par exemple trouver des débouchés dans le secteur de la mobilité électrique.

Les ambitions européennes en termes de production de batteries dans les années à venir sont très importantes. Comment relever ce défi ?

En 2030, une [étude du cabinet McKinsey](#) estime qu'il faudra 4,7 TWh de fabrication de batteries annuelles dans le monde. Ces chiffres illustrent entre autres la volonté européenne d'aller vers une mobilité électrique rapidement, pour répondre aux enjeux climatiques. Pour réaliser cela, les ressources en matériaux manquent. Nous ne disposerons d'ici à 2030 que de seulement 50% du lithium et du nickel nécessaires pour atteindre cet objectif. Et 80% pour le cobalt. Il est donc indispensable de développer des solutions alternatives. Les technologies sodium-ion que nous développons peuvent permettre d'atteindre cette ambition de 4,7 TWh, notamment car nous sommes d'ores et déjà en phase d'entrée sur le marché.

Qu'en est-il du recyclage des batteries au lithium ? Pourrait-il permettre d'éviter l'écueil du manque de ressources ?

Pas avant 2030, c'est certain. Les premières batteries à recycler seront disponibles dans environ cinq ans, et elles ne représenteront qu'une part infime des besoins à ce moment-là. Le [recyclage](#) sera toujours à la marge par rapport à l'utilisation de matériaux neufs, il ne peut pas être la solution au problème. Même s'il est bien sûr nécessaire de recycler les batteries, cela fait aujourd'hui partie de notre mission, et elle est indispensable. Mais cette mission de recyclage est à décorrélérer des objectifs de production de batteries européens pour 2030.

Pouvez-vous nous expliquer les contours du projet de gigafactory porté par Tiamat ?

Nous disposerons d'une usine à la fin de l'année 2025, qui aura une capacité de 1 GW extensible à 5 GW et qui fournira le marché européen en cellules prismatiques à destination de marchés que nous avons identifiés. Nous aimerions installer cette usine près de notre emplacement actuel à Amiens. Il se trouve que de nombreux acteurs français du secteur des batteries se trouvent dans le Nord, il existe donc une opportunité pour développer un écosystème de la batterie dans la région qui profiterait à l'ensemble de la filière.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

26/01/2023

POUR ALLER PLUS LOIN

OPTIMISER LE RECYCLAGE DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

L'essor de la mobilité électrique rend plus que jamais nécessaire le développement de techniques de recyclage des batteries lithium-ion qui soient économiques et peu impactantes pour l'environnement. Une équipe de chercheurs suédois de la Chalmers University of Technology a mis au point un processus de recyclage optimisé à destination de l'industrie. Cette méthode permettrait un recyclage en à peine 30 minutes.

Les procédés de recyclage des **batteries Li-ion** usagées sont constitués d'étapes successives permettant de séparer les matériaux récupérables des impuretés. La méthode qui suscite actuellement beaucoup d'intérêt est une combinaison d'une étape de prétraitement thermique avec un processus d'**hydrométallurgie**. Bien que plusieurs entreprises soient en train de développer cette méthode au niveau industriel, celle-ci demeure encore largement optimisable.

Prétraitement par pyrolyse ou incinération ?

L'étape de **prétraitement thermique** a pour objectif d'éliminer les composés organiques ainsi que le carbone susceptible d'interférer avec les autres étapes de récupération.

Ce prétraitement thermique peut être réalisé de deux façons : par incinération (en présence d'oxygène) ou par pyrolyse (pas d'oxygène). Néanmoins, si cette étape est nécessaire, elle peut aussi conduire à une perte importante de métaux si les paramètres ne sont pas maîtrisés, ce qui réduit l'intérêt économique du recyclage.

Par ailleurs, la plupart des industriels du recyclage utilisent toujours l'incinération à la place de la pyrolyse et les études qui comparent ces deux techniques sont rares. La pyrolyse semble pourtant être une approche prometteuse, d'après

les résultats obtenus par les chercheurs de Chalmers.

Des résultats qui peuvent faciliter fortement le recyclage des batteries

L'**étude publiée** dans le journal Waste Management avait pour objectif principal de comparer les effets des procédés de pyrolyse et d'incinération sur la récupération des métaux par hydrométallurgie.

Elle a permis de mettre en avant plusieurs points clés :

- L'incinération rend plus difficile la réduction carbothermique des oxydes de Co, Mn et Ni en des formes solubles.
- La pyrolyse, au contraire, permet de contrôler et d'améliorer la réduction, ce qui favorise la lixiviation(1).
- Augmenter la température de la pyrolyse améliore clairement le rendement de la lixiviation, ce qui n'est pas le cas avec l'incinération.
- Une température de pyrolyse de 700°C permet de mettre en solution la totalité de Li, Mn, Co et Ni.
- À 700°C, l'augmentation de la durée de pyrolyse au-delà d'un certain seuil réduit le rendement de lixiviation, dans le cas de Co et Ni(2). La cinétique semble également diminuer.

Réaliser une pyrolyse à 700°C pendant 30 min semble donc être l'idéal. Dans l'étude, les chercheurs indiquent également que dans ces conditions favorables, « *la récupération complète par lixiviation à l'acide sulfurique à température ambiante est atteinte après 2 min pour le Li, 5 min pour le Mn et 10 min pour le Co et le Ni.* »

L'hydrométallurgie : un procédé utilisable à température ambiante

C'est aussi l'une des principales conclusions de cette étude : le processus hydrométallurgique peut très bien être réalisé à température ambiante. Selon les chercheurs,

c'est un phénomène qui n'a jamais été testé auparavant, mais qui a des avantages majeurs du point de vue de la réduction de l'impact environnemental et du coût de recyclage des batteries.

Dans un [communiqué de presse](#), Burçak Ebin (3), l'un des principaux auteurs de l'article, est enthousiaste :

« Nos recherches peuvent faire une énorme différence pour les développeurs dans ce domaine. Dans certains cas, il s'agit de réduire la température de 60 à 80 degrés Celsius à la température ambiante, et de passer de plusieurs heures à seulement 30 minutes ».

1. Processus qui consiste à mettre en solution des métaux, généralement en milieu acide.

2. Le rendement de la lixiviation passe de 100 % à 30 et 60 min, à 70 % en 90 min.

3. Chercheur au Department for Chemistry and Chemical Engineering de Chalmers.

16/03/2022

LES BATTERIES STRUCTURELLES POURRAIENT RÉVOLUTIONNER LE STOCKAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES

Grâce aux matériaux multifonctionnels, il va être possible à l'avenir de stocker l'électricité dans la structure même des voitures, notamment la carrosserie. Cette prouesse technologique permettra d'alléger les véhicules et donc augmenter leur autonomie.

Et si demain, l'énergie des voitures électriques n'était plus stockée dans des **batteries** telles qu'on les connaît aujourd'hui, mais dans la structure même des véhicules, comme le plancher ou la carrosserie ? Ce changement de paradigme pourrait devenir une réalité et repose sur une nouvelle technologie, celle des batteries structurelles. Ces dernières ont la particularité d'être conçues à partir de matériaux dits multifonctionnels, capables à la fois de **stocker de l'électricité** tout en possédant une intégrité mécanique. L'intérêt est double : gagner en encombrement, mais surtout en poids, afin d'alléger les véhicules et donc augmenter leur autonomie. Au-delà des voitures, cette technologie pourrait intéresser toutes les applications de transport, allant des vélos électriques jusqu'aux avions de petite taille.

Ces batteries structurelles fonctionnent selon le même principe que les batteries électrochimiques au lithium, sauf que les matériaux utilisés ne sont pas les mêmes. Ici, elles peuvent par exemple être constituées de **polymères renforcés par des fibres** de carbone qui servent à la fois d'électrode et de renforcement structurel mécaniquement porteur. Plus précisément, les fibres de carbone sont noyées dans un matériau formant une matrice à l'image d'un composite. Plusieurs couches sont ainsi formées et empilées les unes

sur les autres. « Cette configuration permet le transfert de charge entre les fibres ainsi que le transport des ions lithium, explique Gaël Guégan, ingénieur veille stratégique au Cetim, et [auteur d'une note sur ce sujet](#). Ce qui n'est pas le cas des batteries standard qui sont constituées de matrices, par exemple en vinylester ou époxy sur des composites thermodurcissables. »

D'importants obstacles restent à surmonter avant de voir cette technologie sur le marché, notamment en matière de conception de ces matériaux multifonctionnels et d'industrialisation. Néanmoins, les perspectives sont très encourageantes. Ainsi, l'entreprise américaine Kitty Hawk a mis au point un petit avion électrique dénommé Cora, au gabarit proche de celui d'un taxi volant, et équipé de batteries structurelles dont l'énergie spécifique atteint 220 wattheures par kilogramme. « Pour développer le marché des voitures volantes, il est couramment admis qu'il faudrait atteindre 400 wattheures par kilogramme, complète l'ingénieur du Cetim. Cela signifie qu'il ne reste plus qu'un facteur de deux pour atteindre cet objectif. »

Le plancher de certaines voitures du constructeur Tesla stockera l'électricité

Tesla semble très avancé dans ce domaine puisque le constructeur de voitures électriques a annoncé que son modèle Y, construit dans sa *gigafactory* à Berlin, sera équipé de batteries structurelles, tout comme son modèle S Plaid. « Leur technologie a été annoncée il y a plusieurs années à travers des brevets, mais c'était tellement avant-gardiste qu'on s'est demandé comment ils allaient s'y prendre pour l'intégrer dans leurs voitures. Ils ont non seulement une lon-

gueur d'avance sur les aspects électriques, mais aussi en l'occurrence sur les systèmes de stockage. » Ces batteries structurelles devraient être intégrées dans le plancher des véhicules, à l'aide d'une presse hydraulique de 8 000 tonnes qui sera capable de fabriquer à terme ces planchers en une seule pièce. La firme automobile a annoncé que cette nouvelle technologie lui permettrait de multiplier par 5 l'énergie stockée, par 6 la puissance, et d'augmenter de 16 % l'autonomie du véhicule. « L'intérêt de cette technologie pour le secteur automobile est qu'en réduisant le poids de la voiture, vous pouvez massivement améliorer son autonomie, puisque retirer la moitié du poids du véhicule permet de doubler son autonomie, analyse Gaël Guégan. Ainsi, choisir un matériau qui stocke l'énergie nécessaire à la propulsion et sert également à supporter la charge mécanique de la voiture sera considéré comme un réel avantage. »

En Europe, plusieurs projets de développement de cette technologie sont menés, notamment celui baptisé SORCERER (*Structural pOweR CompositEs foR futurE civil aiRcraft*). Il réunit quatre universités européennes : l'Imperial College London au Royaume-Uni, l'IMDEA (Instituto Madrileño de Estudios Avanzados) en Espagne ainsi que le KTH (Kungliga Tekniska högskolan) et l'Université technologique de Chalmers en Suède. En plus d'améliorer les performances électriques et mécaniques de ces matériaux multifonctionnels, son objectif est de résoudre les problèmes liés à leur intégration et à leur mise à l'échelle. Les applications visées sont cette fois-ci à destination de futurs avions électriques et hybrides. À terme, il est question de construire un démonstrateur à vocation industrielle, en partenariat entre autres avec Airbus.

03/12/2021

VERS DES BATTERIES PLUS DURABLES CONSTRUITES EN EUROPE

Le Conseil Economique et Social Européen a récemment rendu un avis pour augmenter la durabilité des batteries au sein de l'Union Européenne. Le rapporteur Bruno Choix nous explique les grands axes de réflexion.

La Commission européenne étudie actuellement la définition d'objectifs pour améliorer le cadre législatif européen sur les batteries et les déchets de batteries. Dans ce cadre, elle a publié fin décembre une [proposition de règlement](#). Dans son dernier avis [Exigences concernant la durabilité des batteries dans l'UE](#), le Conseil Economique et Social Européen (CESE) soutient cette démarche.

Le CESE appelle toutefois la Commission à renforcer le contrôle des substances chimiques utilisées. Il souhaite aussi mieux prendre en compte les questions liées à la santé, à la [sécurité et aux conditions de travail](#) tout au long de la chaîne, de l'extraction des matières premières au recyclage et à la réaffectation des [batteries](#). « *La priorité dans cet avis est de renforcer la réglementation européenne en amont de la construction des usines de batteries en Europe et de ne plus être dépendants des pays asiatiques pour l'approvisionnement des matières premières* », avance Bruno Choix, rapporteur de ce nouvel avis.

Préparer la révolution des batteries à venir

La réflexion en cours à la Commission européenne concerne toutes les batteries mises sur le marché en Europe, qu'elles soient industrielles, automobiles, de [véhicules électriques](#) et portables. En particulier, l'enjeu est aujourd'hui de préparer cette « *grosse révolution dans le monde industriel automobile européen* », prévient Bruno Choix. Ainsi, il faut préparer le terrain à la réindustrialisation des batteries en

Europe en amont du déploiement des « *gigafactories* », ces méga-usines qui verront le jour « *pour les véhicules, le naval et le train* », précise l'expert.

Le défi économique est considérable. « *La Commission estime que la demande mondiale de batteries va être multipliée par 14 d'ici 2030 par rapport à son niveau de 2018 et l'UE devrait représenter 17 % de cette demande. Le nombre de batteries lithium serait multipliée par 700 entre 2020 et 2040* », rappelle l'avis.

Des défis considérables pour des batteries « durables »

Plusieurs défis restent à relever pour fabriquer des batteries avec la plus faible incidence possible sur l'environnement, avec des matériaux provenant de mines « *responsables* » et en respectant la sécurité au travail. « *Nous souhaitons une traçabilité complète de la batterie, de sa fabrication jusqu'à son traitement final. Nous voulons être sûrs du retraitement de la batterie pour réutiliser au maximum les composants avant d'aller les puiser dans nos ressources* », ajoute ce conseiller du groupe Mary, président de branche maintenance de la Fédération nationale de l'artisanat automobile (FNA).

La Commission européenne a notamment proposé d'augmenter l'obligation actuelle du taux de collecte des batteries de 50 % actuellement à 65 % en 2025 et 70 % en 2030. Elle prévoit des taux de recyclage spécifiques pour les métaux critiques : cobalt, nickel et cuivre, lithium. Pour aligner le projet de règlement sur les batteries avec l'objectif de neutralité carbone européen, le CESE propose en plus dans son avis « *d'introduire rapidement des seuils maximaux concernant l'empreinte carbone associée à la fabrication des batteries ainsi qu'à la logistique d'approvisionnement*

en amont des matériaux ».

Augmenter la durée de vie des batteries

L'idée est également d'augmenter la durée de vie des batteries. Il faut ainsi pouvoir les réaffecter à d'autres usages, les reconditionner avant de les recycler lorsqu'elles ne sont plus utilisables en l'état. « *Lorsqu'une batterie automobile atteint 70 % de sa puissance initiale, on veut pouvoir lui donner une deuxième vie : qu'elle soit réparable, qu'elle parte dans le retrofit ou qu'elle serve comme batterie stationnaire* », précise Bruno Choix.

Une durée de vie plus grande passe aussi par plus d'éco-conception. Dans cette perspective, le CESE recommande une responsabilité incitative du producteur. Elle passerait notamment par le fait de « *dissocier la fin de vie des batteries de la fin de vie des appareils qui les utilisent* ». Le fait d'introduire une notion de « fin d'usage » en complément de celle de « fin de vie » permettrait aussi de « *favoriser le réemploi, la rénovation ou la seconde vie et le recyclage des batteries* », conclut l'avis du CESE.

07/05/2021

EN 2025, DES BATTERIES AUTOMOBILES AVEC UNE AUTONOMIE DE 800 À 1000 KM

La start-up française Nawa technologies développe des tapis de nanotubes de carbone verticalement alignés. Sa technologie permet de booster les performances des matériaux composites et des batteries. Entretien avec Pascal Boulanger, le fondateur de cette entreprise.

Durant 20 ans, Pascal Boulanger a travaillé dans la recherche au CEA sur différentes thématiques : le nucléaire, le solaire et les [nanotechnologies](#). Lors de l'une de ses missions, il doit identifier des technologies, encore au stade de la recherche fondamentale, aptes à être transférées vers l'industrie. Il en repère plusieurs mais l'une d'elles l'intéresse plus particulièrement, celle des tapis de [nanotubes de carbone](#) verticalement alignés. Il décide alors de transférer lui-même cette technologie et de tenter l'aventure entrepreneuriale en créant sa start-up en 2013. Aujourd'hui, son entreprise compte 46 salariés et est sur le point de concevoir ses premiers prototypes industriels. Rencontre avec Pascal Boulanger, fondateur de Nawa technologies.

Techniques de l'Ingénieur : Quelle est l'origine de la technologie développée par votre start-up ?

Pascal Boulanger : Au départ, il y a la découverte des nanotubes de carbone en 1991, un nanomatériau dont les propriétés de conductivité électriques et thermiques sont remarquables. Sauf qu'ils ressemblent à des spaghettis cuits dans une assiette, éparpillés dans tous les sens et extrêmement flexibles. Lorsque les chercheurs ont tenté de les intégrer dans des matériaux, ils ont rencontré énormément de difficultés. Les propriétés individuelles de ces nanotubes de carbone se trouvaient noyées dans le produit

fini et, au final étaient fortement réduites. Le CEA a alors développé des tapis de nanotubes de carbone alignés qui ont la particularité d'être droits et parallèles les uns par rapport aux autres. Cette configuration a permis d'obtenir des propriétés globales bien supérieures à leurs propriétés individuelles, un peu comme si en additionnant un plus un, on obtenait trois. L'alignement de ces nanotubes a également permis de les intégrer plus facilement dans des matériaux.

Aujourd'hui, quel est le savoir-faire de Nawa technologies ?

Il existe dans le monde plusieurs entreprises travaillant sur les nanotubes de carbone alignés. Par contre, nous sommes aujourd'hui la seule capable d'industrialiser cette technologie. Concrètement, nous fabriquons des tapis de nanotubes de carbone alignés sur de grandes surfaces et sommes en mesure de faire varier leur diamètre, l'espacement entre les tubes et la longueur en fonction des applications. Par exemple, pour concevoir des supercondensateurs, ces dispositifs de stockage d'énergie, nous fabriquons des tapis plutôt épais et denses, avec un grand nombre de nanotubes par cm². Alors que pour des matériaux composites, les tapis sont plutôt plus fins et moins denses.

Quels bénéfices apporte votre technologie aux matériaux composites ?

Nous travaillons avec des matériaux composites composés de plis de carbone empilés les uns sur les autres. Nos tapis de nanotubes de carbone alignés vont venir se positionner entre ces plis et ainsi renforcer l'endroit le plus fragile de ces matériaux. Ils vont permettre d'obtenir une résistance

à la fatigue beaucoup plus importante. Par exemple, un matériau qui au départ pouvait endurer 5 000 cycles va voir sa limite repoussée à 50 000 cycles, soit une multiplication par 10. Autre exemple : lorsqu'on projette une bille sur un matériau composite classique, il va se briser ou subir des marques dès le premier impact. Grâce à l'ajout de nos nanotubes de carbone alignés, dix impacts seront nécessaires avant d'observer la moindre trace.

Et sur les performances des batteries automobiles ?

Grâce à nos tapis de nanotubes de carbone alignés, nous fabriquons des électrodes pour stocker de l'énergie. Ces nanotubes étant 50 fois plus petits que les électrodes actuelles, nous obtenons une surface spécifique, à l'intérieur des **batteries**, très importante et au final une capacité à stocker beaucoup plus de charges. Notre technologie va venir se greffer à des batteries déjà existantes fabriquées par nos clients. Nous allons ainsi contribuer à doubler voire à tripler l'autonomie de leurs batteries, celles-ci pourront atteindre 800 à 1 000 km. De plus, grâce à l'alignement de nos nanotubes, la vitesse de déplacement des ions, c'est-à-dire des charges électriques, se trouve fortement accélérée. En effet, contrairement aux batteries standard, ces déplacements ne subissent aucune tortuosité. Résultat : le temps de recharge des batteries est très rapide. Certains de nos clients ont calculé qu'ils devraient réussir à recharger leur batterie à 80 % en 5 minutes.

À quelle échéance ces batteries seront-elles commercialisées ?

Pour l'instant, nos résultats restent à l'échelle du laboratoire, mais étant donné que nous avons démontré notre capacité à fabriquer ces nanotubes de carbone alignés sur de grandes surfaces, le processus vers la phase industrielle va aller vite. Les performances ultimes dont je viens de parler arriveront sur le marché en 2025. D'ici là, un important travail de R&D est encore à réaliser, car concevoir des batteries reste toujours très complexe. Nawa technologies ne va pas fabriquer ces batteries du futur, mais va contribuer à ce que l'un de ses clients le fasse. Nous avons actuelle-

ment un projet en cours avec l'entreprise française Saft et qui est financé par l'ADEME. Nous travaillons également avec d'autres clients, mais je ne peux pas citer leur nom car nous sommes tenus par des accords de confidentialité.

Au-delà de son savoir-faire technologique, qu'est-ce qui différencie votre jeune entreprise ?

Nos valeurs environnementales. Pour faire croître nos tapis de nanotubes alignés, nous avons besoin de carbone. Nos concurrents utilisent du gaz, mais il est très peu dense. Nous avons fait le choix de travailler avec des liquides et à terme de l'huile végétale, dont le rendement est beaucoup plus élevé. Nous venons ainsi récupérer le CO2 capté par les plantes pour concevoir nos nanotubes de carbone alignés. Et à la fin de leur cycle de vie, ils seront dégradés pour à nouveau redevenir du CO2 ; on ferme ainsi la boucle du carbone. Nous construisons également nos usines de production afin qu'elles aient le moins de surface au sol et dans le but de réduire leur impact sur l'environnement. Tesla rencontre par exemple des problèmes en ce moment dans la construction d'une grande usine de batteries en Allemagne à cause notamment de l'arrachage d'arbres. Nos unités de production auront un impact au sol plus réduit d'environ un quart à un tiers.

22/12/2020

ASSOCIER DES POLYMÈRES POUR AUGMENTER LA DURABILITÉ DES BATTERIES

Pour les applications nécessitant le stockage et la conversion de grandes quantités d'énergie, des batteries présentant à la fois une grande densité d'énergie, un coût faible, une grande sécurité et une longue durée de vie sont nécessaires. Parmi les différentes technologies en développement, les batteries « tout solide » lithium métal polymère sont particulièrement prometteuses.

Un extrait de [Électrolytes polymères pour les batteries au lithium métal](#) par Renaud BOUCHET et Trang N. T. PHAN

Les [batteries lithium métal](#) polymère présenteraient de nombreux avantages. D'abord, une densité d'énergie élevée dans des batteries plus minces et moins lourdes, associée à une amélioration importante de la sécurité grâce à l'utilisation d'un polymère non volatil. De plus, l'électrolyte polymère permet de sceller l'ensemble électrode/électrolyte et assure ainsi une bonne qualité de l'interface. Par conséquent, les coûts de production se voient diminués par une facilité de fabrication via des procédés automatisés d'[extrusion](#). Le tout fourni par une technologie plus verte du fait de l'élimination des solvants organiques volatils. Le développement de nouvelles familles d'électrolytes polymères, et notamment les copolymères à blocs polyanioniques, ouvre des perspectives importantes en permettant de cumuler différentes propriétés (mécanique, conductivité, nombre de transports, stabilité électrochimique...) en jouant sur la nature chimique des blocs.

Les atouts des électrolytes copolymères à blocs

Pour rassembler dans un même matériau une bonne conductivité et une bonne tenue mécanique, une solution évidente est de mélanger deux polymères. Or, peu de polymères sont miscibles entre eux. Cela entraîne par exemple une hétérogénéité des propriétés physico-chimiques de l'électrolyte. Pour s'affranchir de ce problème, la réalisation d'électrolytes à base de copolymères à blocs a donné des résultats très

prometteurs. En effet, au sein de ces macromolécules, les polymères de natures distinctes sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Cela permet d'avoir une combinaison synergique des propriétés des polymères constituant les divers blocs. Quels que soient la structure (dibloc ou tribloc) et le type d'architecture (greffés ou linéaires), les électrolytes des copolymères à blocs ont des valeurs de conductivité comprises entre 10^{-2} et 10^{-3} S/m à 40 °C, avec une tenue mécanique plus ou moins grande selon la [composition du copolymère](#).

Cependant, ces systèmes présentent une forte limitation en puissance due au faible nombre de transports des ions lithium Li^+ , appelé t^+ ($t^+ < 0,3$). Durant la décharge de la batterie, les cations lithium sont consommés à l'électrode positive et produits à l'électrode négative, créant ainsi aux interfaces des excès de charges (positive à l'électrode négative et négative à l'électrode positive). Pour compenser ce phénomène, les anions mobiles diffusent de l'électrode positive vers l'électrode négative, ce qui entraîne la formation d'un gradient de concentration de sel au sein de l'électrolyte. Ce gradient de concentration conduit à une polarisation de concentration et à un courant de diffusion qui limite la puissance des batteries. La charge doit donc être faite à des courants faibles... Un problème résolu en attachant les anions sur les chaînes du polymère hôte afin de les immobiliser et de tendre ainsi idéalement vers un t^+ de 1. Dans ces conditions, le transport des ions ne se fait plus par diffusion-migration, mais uniquement par migration. Il n'y a alors plus de courant limite de diffusion.

Exclusif! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 9 février 2023 !

[Électrolytes polymères pour les batteries au lithium métal](#), par Renaud BOUCHET et Trang N. T. PHAN

26/01/2023

LES THÈSES DU MOIS : QUELS MATÉRIAUX POUR L'EUROPE DES BATTERIES ?

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier de janvier, "Quels matériaux pour l'Europe des batteries ? ", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

Nanofils de silicium à façon pour nanocomposites de batteries Lithium-ion à haute densité d'énergie *Caroline Keller* Thèse de doctorat en Chimie physique moléculaire et structurale, soutenue le 22-03-2022 *Systèmes moléculaires et nanomatériaux pour l'énergie et la santé* *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux*

Copolymères en peigne à greffons éthers et carbonates : du design macromoléculaire à leur utilisation comme électrolyte de batterie au lithium *Thomas Clément* Thèse de doctorat en Sciences des polymères, soutenue le 26-03-2021 *Systèmes moléculaires et nanomatériaux pour l'énergie et la santé* *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux*

Développement d'un procédé innovant pour la valorisation en boucle fermée des matériaux cathodiques usagés provenant de batteries lithium-ion *Delphine Yetim* Thèse de doctorat en Matériaux, mécanique, génie civil, électrochimie, soutenue le 26-01-2022. *Laboratoire d'électrochimie et de physicochimie des matériaux et des interfaces*

Nouvelle génération de batteries Li-Air basées sur l'utilisation de MOFs flexibles (Metal-Organic Frameworks) *Yujie Zhang* Thèse de doctorat en Chimie, soutenue le 04-04-2022 *Nanosciences et Innovation pour les Matériaux, la Biomédecine et l'Energie*

Fonctionnalisation de Nanotubes pour la fabrication de batteries Lithium/Soufre et Lithium/Organique *Hanine Kamaledine* Thèse de doctorat en Chimie, soutenue le 10-03-2021 *Nanosciences et Innovation pour les Matériaux, la Biomédecine et l'Energie*

Matériaux pour conversion et stockage simultanés de l'énergie *Jérémy Sum* Thèse de doctorat en Chimie, soutenue le 20-01-2022 *Chimie de la matière condensée de Paris*

Synthesis, characterization and study of the properties of new exotic lithium ion intercalation compounds *Thomas Marchandier* Thèse de doctorat en Chimie des matériaux, soutenue le 10-12-2021 *Laboratoire de chimie du solide et énergie*

Advanced Electrolytes for Calcium Batteries Antonio Scafuri Thèse de doctorat en Chimie et Physico-Chimie des Matériaux, soutenue le 29-03-2021. *Institut Charles Gerhardt*

Particules core-shell à base de silicium comme matériaux d'anode pour batteries Li-ion Bastien Rage Thèse de doctorat en Chimie Séparative, Matériaux et Procédés, soutenue le 09-12-2021 *Institut Charles Gerhardt*

Synthèse de cathodes multimétalliques fluorées pour batteries Lithium métal Fabien Eveillard Thèse de doctorat en Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés, soutenue le 03-12-2021 *Institut de Chimie de Clermont-Ferrand*

Up-scaling methodology for lithium-ion battery modeling Oumaima Chaouachi Thèse de doctorat en Mécanique des fluides Energétique, Procédés, soutenue le 12-03-2021 *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux*

26/01/2023

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Elaboration et recyclage des métaux

Intégrez le recyclage dans la conception de vos produits!
Ref : TIP554WEB

PRÉSENTATION

Des usines sidérurgiques à la fabrication des demi-produits: **un panorama complet des procédés d'élaboration et de première transformation des métaux ferreux,**
La description précise de **la métallurgie des principaux métaux non ferreux,**
L'analyse des **nouvelles techniques de récupération, de recyclage et de valorisation** des divers métaux.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP554WEB	Elaboration et recyclage des métaux	1 670 €	1	1 670 €
Total H.T en €				1 670 €
T.V.A : 5,5%				91,85 €
Total TTC en €				1 761,85 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr
Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.