



Comment  
**la chimie** peut-elle  
répondre aux problèmes posés par  
les **batteries électriques** ?





# Comment la chimie peut-elle répondre aux problèmes posés par les batteries électriques ?

Concept graphique : C3 (2017/18) | Photo : phillipps, Alight creative, Akiba Stock, © study - © Creative Art - © Datasuper - © SuperBlue/© 069623

## Sommaire

Pages

Présentation / Comité d'Organisation  
Programme

03  
04

Résumés des Conférences  
(dans l'ordre du programme)

### Conférence d'Introduction

**Patrice SIMON**

06

*Les batteries Li-ion : État de l'art et perspectives.*

### Première Partie : Technologies des batteries

**Valérie BUISSETTE**

07

*Batteries « tout solide » Li-ion, innovation et perspectives d'industrialisation des électrolytes sulfures.*

**Anthony BONNET**

08

*Batteries quasi-solide à base de polymères biosourcés.*

**Mathieu MORCRETTE**

09

*Batterie sodium-ion pour applications haute puissance.*

**Sébastien LIATARD**

10

*Le soufre, un matériau non-critique au service des batteries de demain.*

## Deuxième Partie : Domaines d'applications des batteries

### **Philippe STEVENS**

11

*Stockage stationnaire de longue durée, une opportunité pour de nouvelles chimies de batteries.*

### **Pierre CHAUFOUR**

12

*L'électromobilité pour décarboner le transport routier de marchandise.*

### **Jean BOTTI**

13

*Les batteries dans l'aviation électrique, un challenge de premier ordre.*

## Présentation du colloque

La mise au point de **batteries** Li-ion performantes, en termes de **capacité** et de **puissance** massiques, a rendu possible le développement, dans un premier temps, de l'électronique portable (PCs, smartphones), puis de véhicules électriques « légers » d'autonomie acceptable.

Sur la base des technologies Li-ion actuelles, la nécessité d'assurer l'électrification d'une partie du parc automobile (voitures particulières, véhicules utilitaires légers) a conduit à la mise en place de capacités de production qui se compte en GWh annuels, faisant des batteries un **outil essentiel pour le stockage industriel de l'électricité**.

Le présent colloque s'articule autour de deux objectifs. Dans une première partie sont présentées les **technologies** en cours de développement, susceptibles d'améliorer les performances en termes notamment de capacité, de durée de vie et de sécurité.

Une deuxième partie discute l'intervention des batteries dans de nouveaux **domaines** du transport (transport lourd, aéronautique) et dans le **stockage stationnaire de grande capacité** pour la régulation des réseaux, notamment en liaison avec leur alimentation par une fraction croissante d'énergies renouvelables intermittentes.

Le colloque se conclura par une table ronde avec la participation de tous les conférenciers.



<b>Jean Claude BERNIER</b>	Université de Strasbourg
<b>Pascale BRIDOU BUFFET</b>	Fondation internationale de la Maison de la Chimie
<b>Édouard FREUND</b>	Fondation internationale de la Maison de la Chimie
<b>Daniel JASSERAND</b>	UNAFIC
<b>Marc J. LEDOUX</b>	DRCE Émérite du CNRS
<b>Patrick MAESTRO</b>	Membre de l'Académie des Technologies
<b>Patrice SIMON</b>	Membre de l'Académie des Sciences, Professeur en chimie des matériaux à l'Université de Toulouse
<b>Philippe WALTER</b>	Fondation internationale de la Maison de la Chimie Membre de l'Académie des Sciences, CNRS-Sorbonne Université



# Programme

**09h30** Accueil - Introduction  
**Marc J. LEDOUX** • DRCE Emérite du CNRS

## Conférence d'Introduction

**09h35** Les batteries Li-ion : État de l'art et perspectives.  
**Patrice SIMON** • Membre de l'Académie des Sciences, Directeur du Réseau Français sur les Batteries (RSEE) et Responsable du PEPR Batteries, Professeur en chimie des matériaux à l'Université de Toulouse

## Première **Partie** : Technologies des batteries

**10h20** Batteries « tout solide » Li-ion, innovation et perspectives d'industrialisation des électrolytes sulfures.  
**Valérie BUISSETTE** • Directeur Programme Solid State Batteries - Syensqo

**10h50** Batteries quasi-solide à base de polymères biosourcés.  
**Anthony BONNET** • Directeur scientifique matériaux pour l'énergie - Groupe ARKEMA

**11h20** Batterie sodium-ion pour applications haute puissance.  
**Mathieu MORCRETTE** • Directeur de recherche CNRS  
Membre du Réseau Français sur les Batteries (RS2E) - CTO TIAMAT

**11h50** Le soufre, un matériau non-critique au service des batteries de demain.  
**Sébastien LIATARD** • Ingénieur-Chercheur - CEA

**12h20** Table Ronde - Débats animés par **Marc J. LEDOUX**

**12h10** Déjeuner

## Deuxième Partie : Domaines d'applications des batteries

- 14h00** Stockage stationnaire de longue durée, une opportunité pour de nouvelles chimies de batteries.  
**Philippe STEVENS** • *Ingénieur Expert Senior - Département LME - EDF R&D - EDF Lab Renardières*
  
- 14h30** L'électromobilité pour décarboner le transport routier de marchandise.  
**Pierre CHAUFOUR** • *Expert en décarbonation - Renault Trucks*
  
- 15h00** Les batteries dans l'aviation électrique, un challenge de premier ordre.  
**Jean BOTTI** • *CEO et CTO - VoltAero*
  
- 15h30** Table Ronde avec les conférenciers de la journée.  
Débats animés par **Marc J. LEDOUX**

## Conférence d'Introduction

### Les batteries : état de l'art et perspectives.

Patrice SIMON<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse, CIRIMAT UMR CNRS 5085

<sup>b</sup> Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Energie (RS2E), FR CNRS 3459, Amiens

Les systèmes de stockage électrochimiques de l'énergie - les batteries - sont aujourd'hui au cœur d'enjeux sociétaux et technologiques majeurs.

Ils permettent tout d'abord de répondre à des besoins spécifiques accompagnant le développement de nouvelles technologies comme le l'électronique portable (téléphones, ordinateurs, etc.).

Ils jouent également un rôle majeur dans la lutte contre le réchauffement climatique en proposant des solutions innovantes pour le stockage des énergies renouvelables.

Aujourd'hui, l'application qui tire le développement des batteries est la mobilité, dont sa version thermique est responsable d'environ 30% des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans cette présentation, nous décrirons les principales technologies de batteries Li-ion disponibles aujourd'hui ainsi que leurs limitations.

Nous évoquerons dans un deuxième temps les perspectives et futures chimies à l'étude.

## Première Partie : Technologies des batteries

### Batteries « tout solide » Li-ion, innovation et perspectives d'industrialisation des électrolytes sulfures.

Valérie BUISSETTE

*Directeur Programme Solid State Batteries • Syensqo*

Les batteries « tout solide » (ASSB – All Solid State Batteries) sont aujourd'hui perçues comme la technologie la plus prometteuse pour améliorer significativement les performances des batteries lithium-ion des véhicules électriques.

Les électrolytes inorganiques, ou céramiques, jouent un rôle crucial dans l'essor de ces technologies et représentent une innovation de rupture dans le domaine des batteries.

Actuellement, les électrolytes sulfures sont considérés comme les candidats les plus prometteurs pour les batteries à très haute densité d'énergie.

Ils permettent notamment l'utilisation d'anodes plus performantes et la conception de batteries plus compactes.

La présentation illustrera les défis et les facteurs clés de succès dans la montée en échelle de ces électrolytes sulfures, ainsi que la contribution de Syensqo à la construction d'une chaîne de valeur durable et souveraine pour les batteries tout solide en Europe.

**Mots Clés :** Batteries Li-ion tout solide, Électrolyte Sulfure.

## Batteries quasi-solides à base de polymères biosourcés.

Anthony BONNET<sup>a,\*</sup>, Léa MANGANI<sup>b</sup>, Justine REGIS<sup>c</sup>, Clémentine CHAMPAGNE<sup>d</sup>

<sup>a,c</sup> ARKEMA France, Siège Social, Puteaux

<sup>b</sup> ARKEMA France, CRRAPierre Benite

<sup>d</sup> ARKEMA inc, USA

Les efforts actuels de R&D sur la technologie Li-ion avec des électrolytes liquides se concentrent sur l'augmentation de la densité énergétique. Cela se traduit par le développement de nouveaux matériaux d'insertion de lithium plus « énergétiques » tels que les matériaux de cathode dits haute tension ou haute énergie ou encore à l'anode avec l'introduction de silicium dans des électrodes en graphite.

Les efforts de R&D sur la technologie Li-ion actuelle (appelée gen 3) atteignent une limite, notamment sur l'aspect densité énergétique. Pour atteindre une densité d'énergie allant jusqu'à 500 Wh/kg ou 1 000 Wh/L, une percée technologique est nécessaire.

Cette nouvelle technologie (ASSB) vise à remplacer l'électrolyte inflammable et liquide par un électrolyte solide qui fera office d'électrolyte mais aussi de séparateur. Trois solutions sont actuellement à l'étude chez ARKEMA pour réaliser ce basculement :

1. Quasi solide où des liquides et un sel de lithium sont piégés dans une matrice polymère.
2. À base de polymères conducteurs non plastifiés.
3. Basé sur des mélanges combinant céramiques conductrices et polymères.

L'étude présentée porte sur la technologie quasi-solide qui vise à faire un premier pas dans le monde du tout solide en remplaçant l'électrolyte liquide et le séparateur par une formulation pouvant être constituée d'un polymère fabriqué ex situ ou bien d'un polymère ayant été synthétisé in situ à partir de monomères préalablement introduits dans la cellule, d'un plastifiant et d'un sel de lithium.

La méthode de fabrication des composants de la cellule utilise les procédés habituellement utilisés pour la technologie Lithium-ion. ARKEMA développe cette solution autour de la chimie des acryliques bio sourcés ou bio-attribués, et des liquides ioniques permettant d'envisager une industrialisation rapide de cette technologie à partir de matériaux durables.

**Mots Clés :** Quasi-solide, Polymérisation in situ, Biosourcé.

## Batterie sodium-ion pour applications haute puissance.

Mathieu MORCRETTE<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Tiamat Energy, HUB de l'Energie

<sup>2</sup> Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides, CNRS UMR7314

<sup>3</sup> Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Energie (RS2E), FR CNRS 3459, Hub de l'Energie

Les batteries sodium-ion font l'objet d'une attention particulière, principalement en raison de la grande abondance du sodium. TIAMAT développe des cellules de batteries sodium-ion basées sur les travaux de recherche sur le stockage électrochimique du CNRS et du CEA. Les cellules de batterie proposées offrent des performances de puissance élevées, une longue durée de vie et une grande sécurité.

L'optimisation des matériaux d'électrode, de l'électrolyte seront présentées jusqu'à la production de cellules de grande capacité et leurs surprenantes propriétés.

La présentation résumera également le développement du produit pour diverses applications, de la preuve de concept avec les principaux clients jusqu'à la commercialisation.

Enfin, une deuxième génération de batteries Tiamat en cours de développement sera présentée, utilisant des oxydes lamellaires permettant d'obtenir de plus grandes capacités pour les applications de mobilité.

## Le soufre, un matériau non-critique au service des batteries de demain.

Sébastien LIATARD

Université Grenoble Alpes, CEA, Liten, DEHT

Le soufre est un élément abondant sur terre et par conséquent non critique et peu coûteux. Il a en plus l'avantage d'être peu toxique et présente une bonne stabilité à l'air ambiant. Sur le plan électrochimique, il se distingue par une capacité spécifique théorique de  $1\,672\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ , valeur bien supérieure à celles des matériaux de cathode utilisés dans les batteries lithium-ion commerciales, tels que la NMC811 ( $\sim 280\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ) ou le LFP ( $\sim 170\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

Ces propriétés devraient faire du soufre un matériau d'électrode positive idéal, pourtant, la technologie d'accumulateurs lithium-soufre n'est toujours pas commercialisée.

Son déploiement industriel demeure en effet freiné par plusieurs verrous technologiques : la solubilité des polysulfures dans l'électrolyte organique conduisant à un effet de navette redox, la faible conductivité intrinsèque du soufre et des produits de décharge ( $\text{Li}_2\text{S}$ ,  $\text{Li}_2\text{S}_2$ ), ainsi que l'instabilité chimique de l'électrode négative de lithium métallique.

Ces limitations impactent la durée de vie des cellules, leur efficacité coulombique et leur plage de température d'utilisation.

La conférence s'attachera donc à présenter un bref historique du développement de la technologie Li-S, et à mettre en lumière les stratégies développées pour surmonter ses limitations.

Une attention particulière sera portée aux travaux de recherche menés au CEA Grenoble.

**Mots Clés :** Lithium-soufre, Matériaux critiques, Gen5.

## Deuxième Partie : Domaines d'applications des batteries

### Stockage stationnaire de longue durée, une opportunité pour de nouvelles chimies de batteries.

**Philippe STEVENS**

*EDF Lab Renardières, LME/Groupe Technologies de batteries*

La majorité du stockage batterie sur le réseau électrique<sup>1</sup> est aujourd'hui destiné à du réglage de fréquence pour maintenir la fréquence du réseau à 50 Hz. Le stockage sert de tampon de courte durée pour compenser des variations immédiates entre la production et la consommation d'électricité pouvant entraîner une variation de la fréquence. La durée de ce stockage courte durée est typiquement de l'ordre d'une demi-heure et les technologies Lithium-ion sont particulièrement bien adaptées à cette durée de stockage.

De nouveaux besoins en stockage commencent à émerger qui sont liés à des périodes d'excès de production à partir d'énergie renouvelable, en particulier du solaire et de l'éolien.

Pour pallier cet excès, la production renouvelable doit être bridée et un marché d'électricité à prix négatif existe maintenant ; les producteurs sont payés pour réduire leur production !

Ce nouveau marché offre des opportunités pour un stockage de plus longue durée (Long Duration Energy Storage, LDES en anglais) pour lequel les batteries Lithium-ion ne sont pas optimales.

De nouvelles technologies de batteries et de nouvelles chimies commencent à arriver pour répondre à ce besoin. Ces nouvelles chimies sont moins gourmandes en matières premières peu abondantes et elles offrent de nouvelles opportunités pour une fabrication européenne.

#### **Références :**

1- EDF R&D, « Le stockage de l'électricité, un défi pour la transition énergétique », Tec et Doc - Lavoisier, ISBN : 978-2-7430-2301-0

**Mots Clés :** LDES, Énergies renouvelables, Écrêtage.

## L'électromobilité pour décarboner le transport routier de marchandise.

Pierre CHAUFOUR

*Renault Trucks*

Le poids lourd électrique à batteries constitue désormais une réalité tangible, répondant déjà à de nombreux usages dans l'état actuel des technologies de batteries. Dans un avenir proche, la majorité des applications deviendront compatibles, faisant de cette solution la voie privilégiée pour décarboner le transport routier de marchandises.

La présentation dressera un état des lieux des solutions existantes et les évolutions annoncées en montrant les spécificités des batteries développées pour les poids lourds.

Nous examinerons comment les constructeurs s'organisent pour maîtriser la chaîne de valeur de leurs batteries, depuis l'extraction des minerais jusqu'au recyclage, afin de minimiser les impacts dans un contexte réglementaire contraint.

**Mots Clés :** Poids lourd électrique à batteries, Impact batteries.

## Les Batteries dans l'aviation électrique, un challenge de premier ordre.

Jean BOTTI

CEO et CTO de VoltAero

Il n'existe que deux options pour alimenter les véhicules ou les avions électriques : les piles à combustible ou les batteries<sup>1</sup>.

Comme le montrent les recherches d'Airbus, l'hydrogène peut être utilisé pour alimenter les réacteurs des avions ou comme source d'énergie pour alimenter des piles à combustible.

L'hydrogène et l'électricité nécessaires peuvent être produits à partir de sources renouvelables. Chaque kilogramme de poids de batterie permettant d'augmenter l'autonomie de vol augmente le poids de la structure, le couple moteur requis est plus élevé et, par conséquent, le nombre de batteries nécessaires à assurer la portance est majoré.

Le facteur poids limite l'autonomie d'un avion jusqu'à ce qu'une amélioration significative de la densité énergétique par kg (Wh/kg) des batteries se concrétise dans les années à venir. Des pistes intéressantes semblent être les batteries tout solide.

Pour les véhicules à pile à combustible à hydrogène (voitures), le poids ne pose pas de problème par rapport aux batteries. Mais pour les avions ce n'est pas nécessairement le cas.

À première vue, l'hydrogène présente tous les avantages d'un remplacement des combustibles fossiles. L'hydrogène délivre une énergie massique de près de 40 000 Wh/kg. Les batteries lithium-ion peuvent atteindre 260 Wh/kg, soit 151 fois moins d'énergie par kg que l'hydrogène ! Il faut cependant tenir compte du poids du réservoir de l'hydrogène embarqué, ce qui limite l'avantage de l'hydrogène.

Grâce à sa densité énergétique et à sa légèreté, l'hydrogène offrirait une autonomie prolongée sans alourdir significativement le véhicule, ce qui constituerait un atout majeur pour son intégration dans l'industrie aéronautique.

Par ailleurs, l'efficacité énergétique des véhicules à pile à combustible se situe à 30 %, contre 76 % pour les véhicules électriques à batterie.

Actuellement, les pertes d'énergie et les inefficacités mentionnées ci-dessus dynamisent le marché, où la majorité des investissements et de la recherche portent sur les véhicules électriques à batterie. C'est encore plus vrai pour les avions. Compte tenu des méthodes actuelles de production, de stockage et de conversion de l'hydrogène en électricité, ces inefficacités limiteraient la croissance de la part de marché de l'aviation à court terme.

### Références :

1) *Hydrogen guarantees much longer autonomy than the batteries but what about bio-fuels*, Jean Botti 2021

**Mots Clés :** Batteries, Piles à combustible, Hydrogène, Densité énergétique, Poids.



Fondation de la Maison de la Chimie

Maison de la Chimie  
28 rue Saint-Dominique  
75007 PARIS