



## Face au changement climatique, le champ des possibles



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

28-29 Janvier, 2020



*Les batteries sont-elles la  
bonne option pour un  
développement durable ?*

*Prof. Jean-Marie Tarascon*

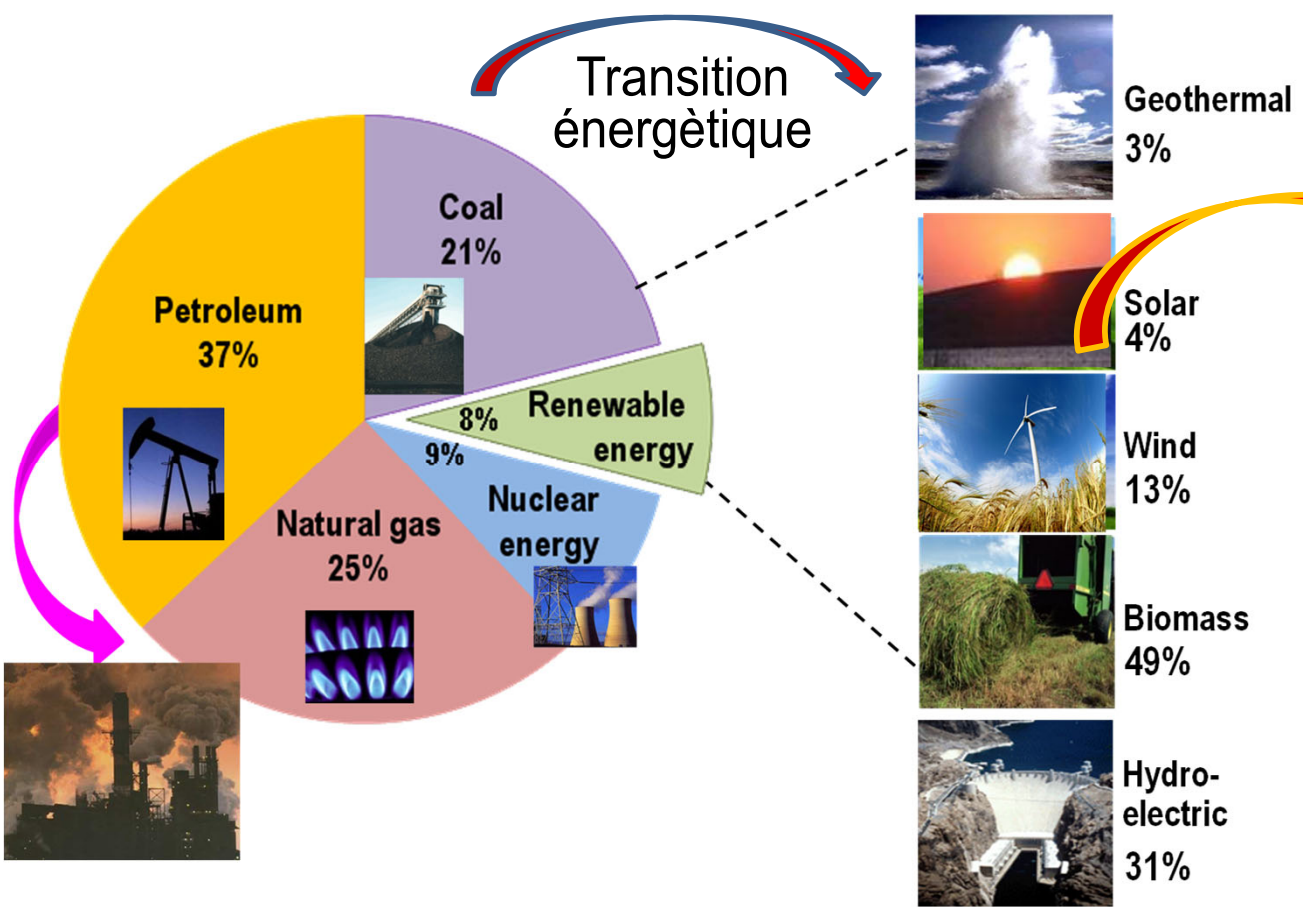


COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

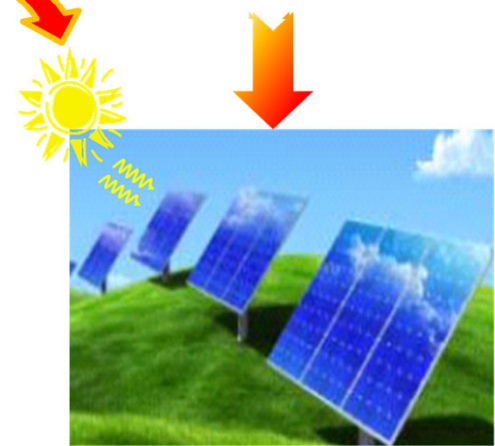


ENERGIE  
RS2E

# Rôle de la batterie dans la transition énergétique

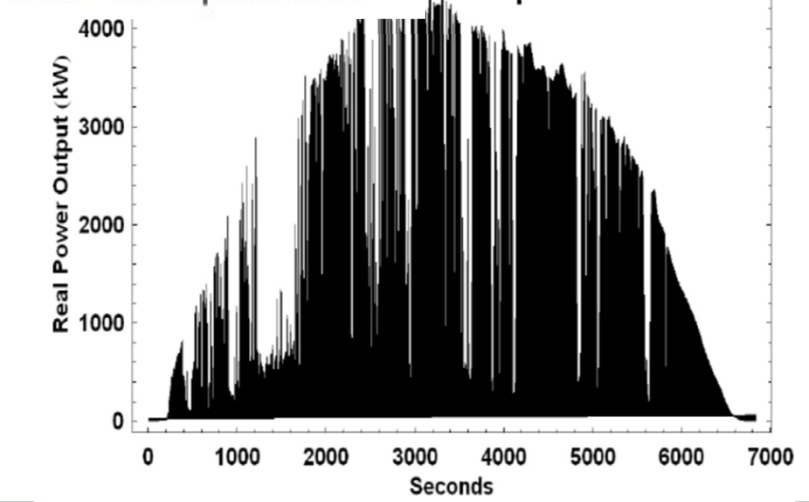


Le soleil envoie sur notre planète 10 000 fois l'énergie dont nous avons besoin



Efficacité de (~20%) à un coût de 3 US cents par kWh

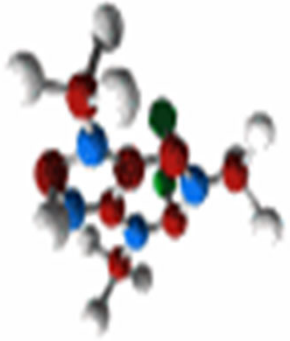
EPRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE  
Variation de la puissance d'un panneau solaire



Stockage ← Comment lisser ces fluctuations ? ← Large variations

# Une option pour stocker l'énergie : Le stockage électrochimique

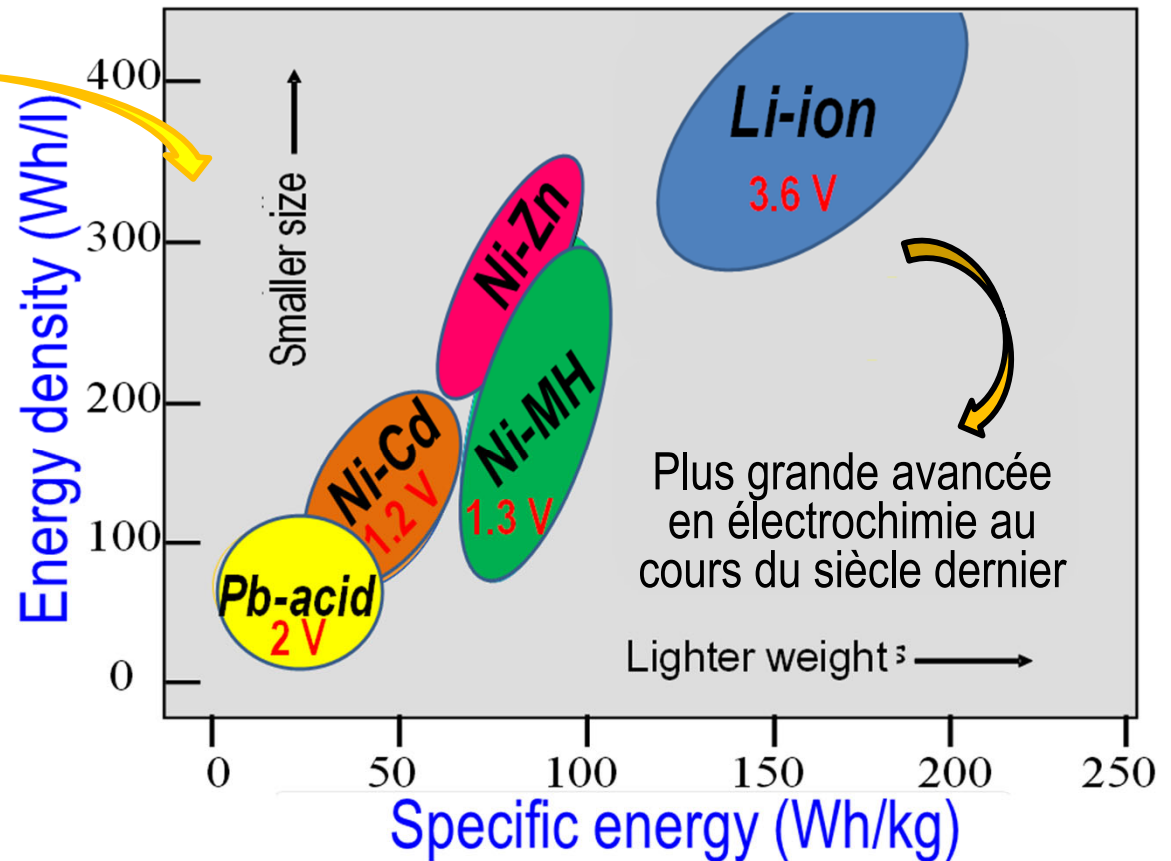
Chimique



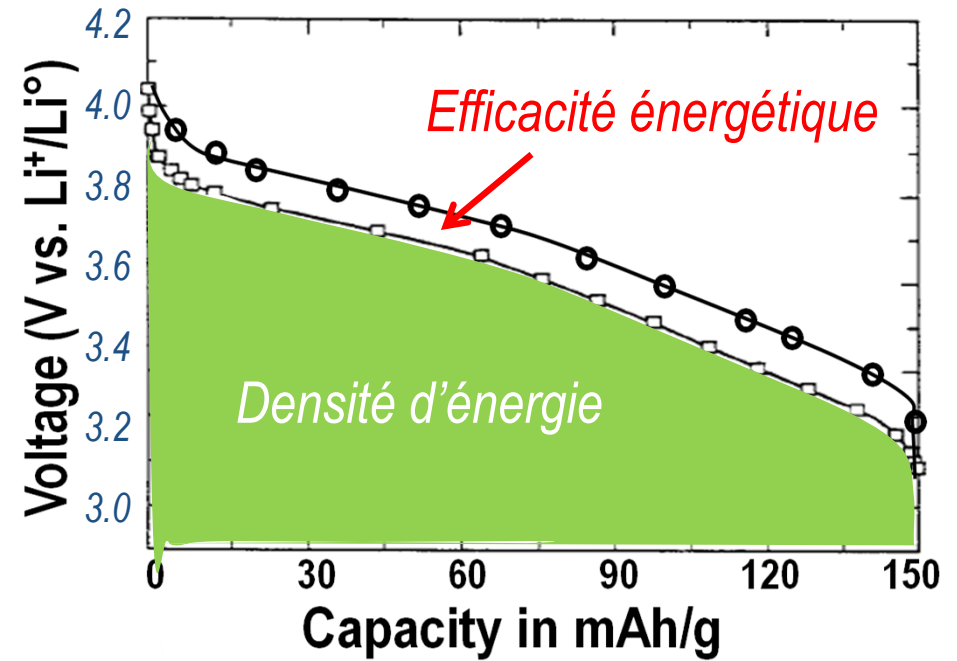
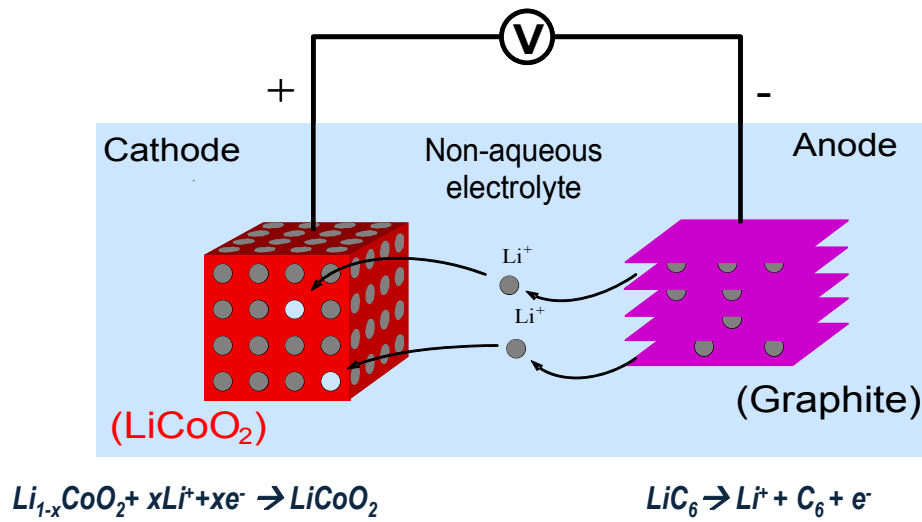
Électrique



Batteries



# Batteries à ions lithium: principes de fonctionnement

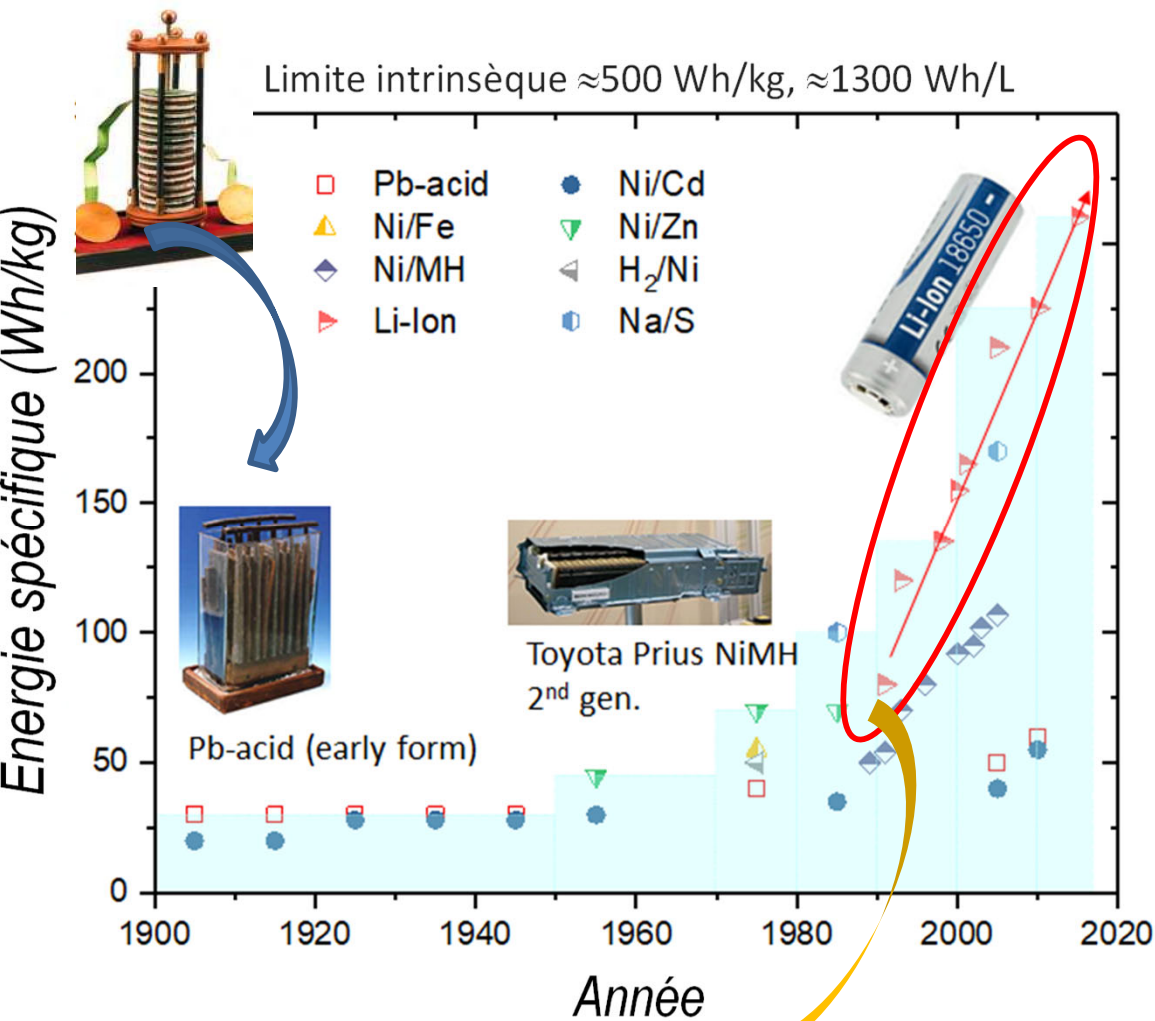


$$\text{Densité d'énergie (Wh/kg)} = \text{Potentiel V (volts)} \times \text{Capacité (Ah/kg)}$$

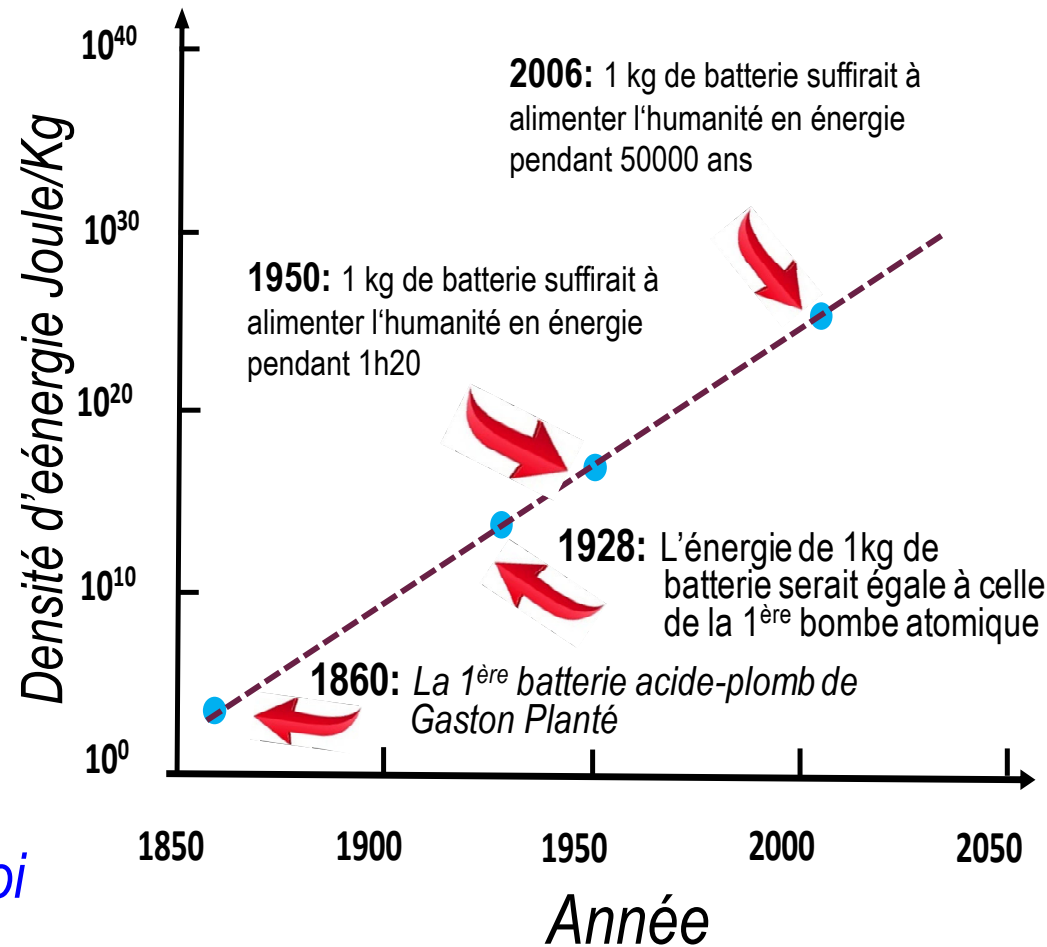
Tension de sortie d'une batterie qui dépend de la structure électronique du matériau

Quantité d'énergie électrique délivrée par une batterie d'1 kg en une heure

# Evolution de la densité énergétique des piles rechargeables



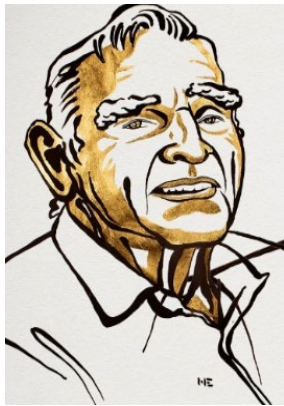
➔ Où en serions-nous si les batteries avaient suivi la loi de Moore ???



La batterie Li-ion a doublé sa densité d'énergie en 30 ans ➔ Très loin de la loi de Moore ?

Les progrès ont été limités par la chimie...

# Batterie Li-ion: un travail de longue haleine - Nobel 2019



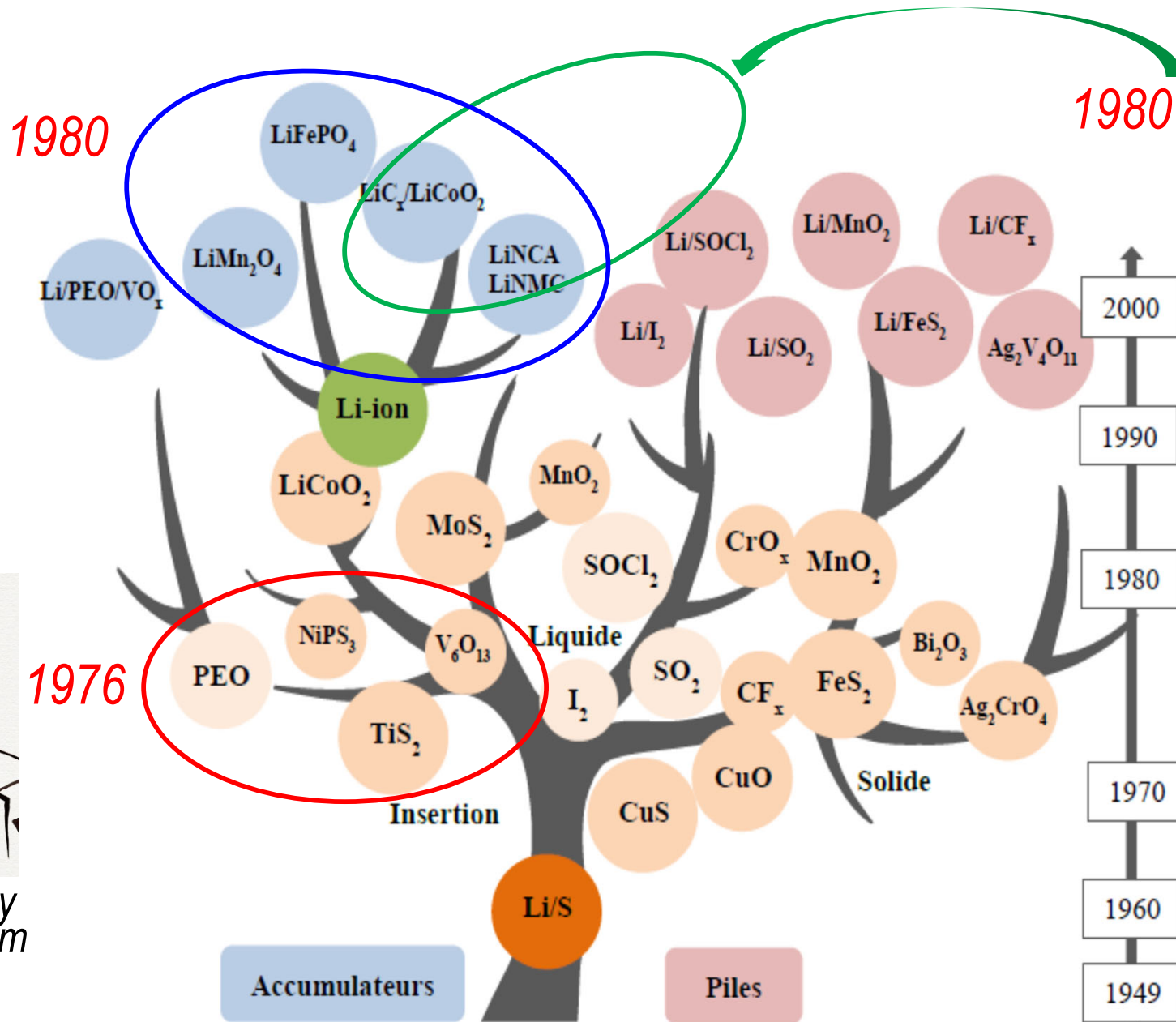
John B. Goodenough



M. Stanley Whittingham

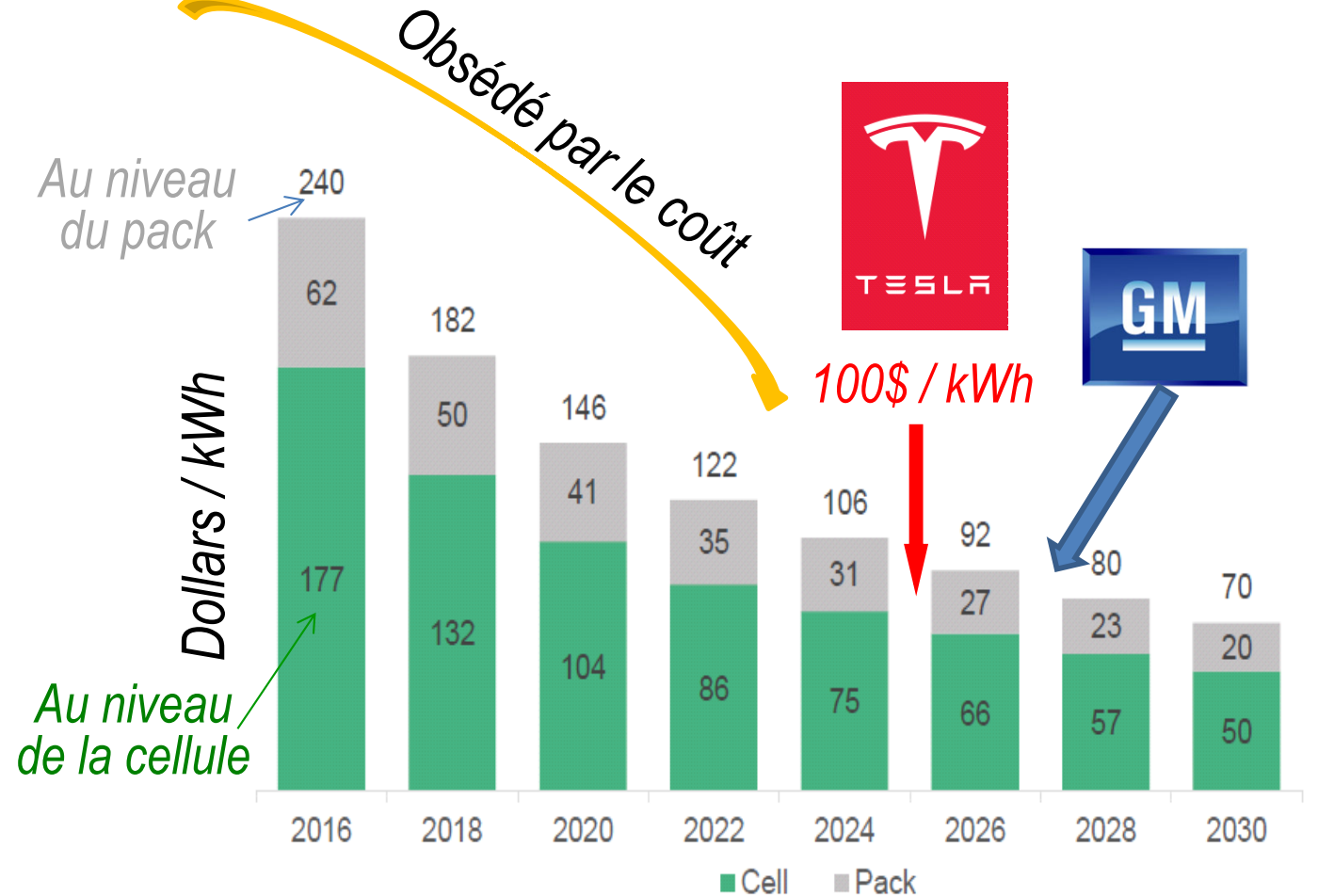
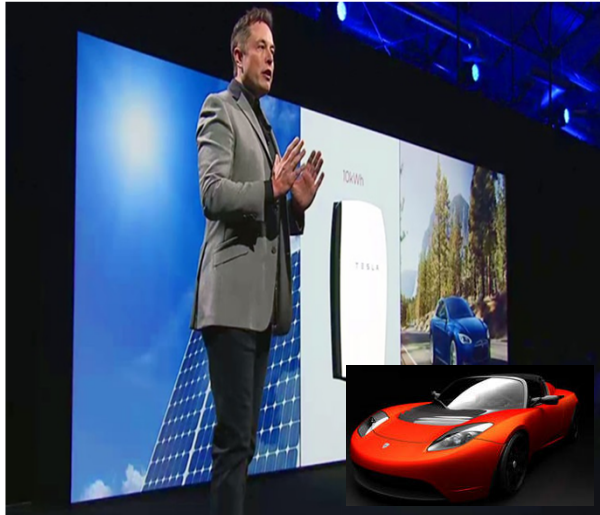


Akira Yoshino



# Dernière révolution en matière de coût

☐ Annonce d'E. Musk en avril 2015



Source: Bloomberg New Energy Finance Scenario 5: Tesla Gigafactory NCA/graphite-Si  
(Prix divisé par 10 sur les 10 dernières années)

Révolution dans le monde des fabricants et utilisateurs de batteries

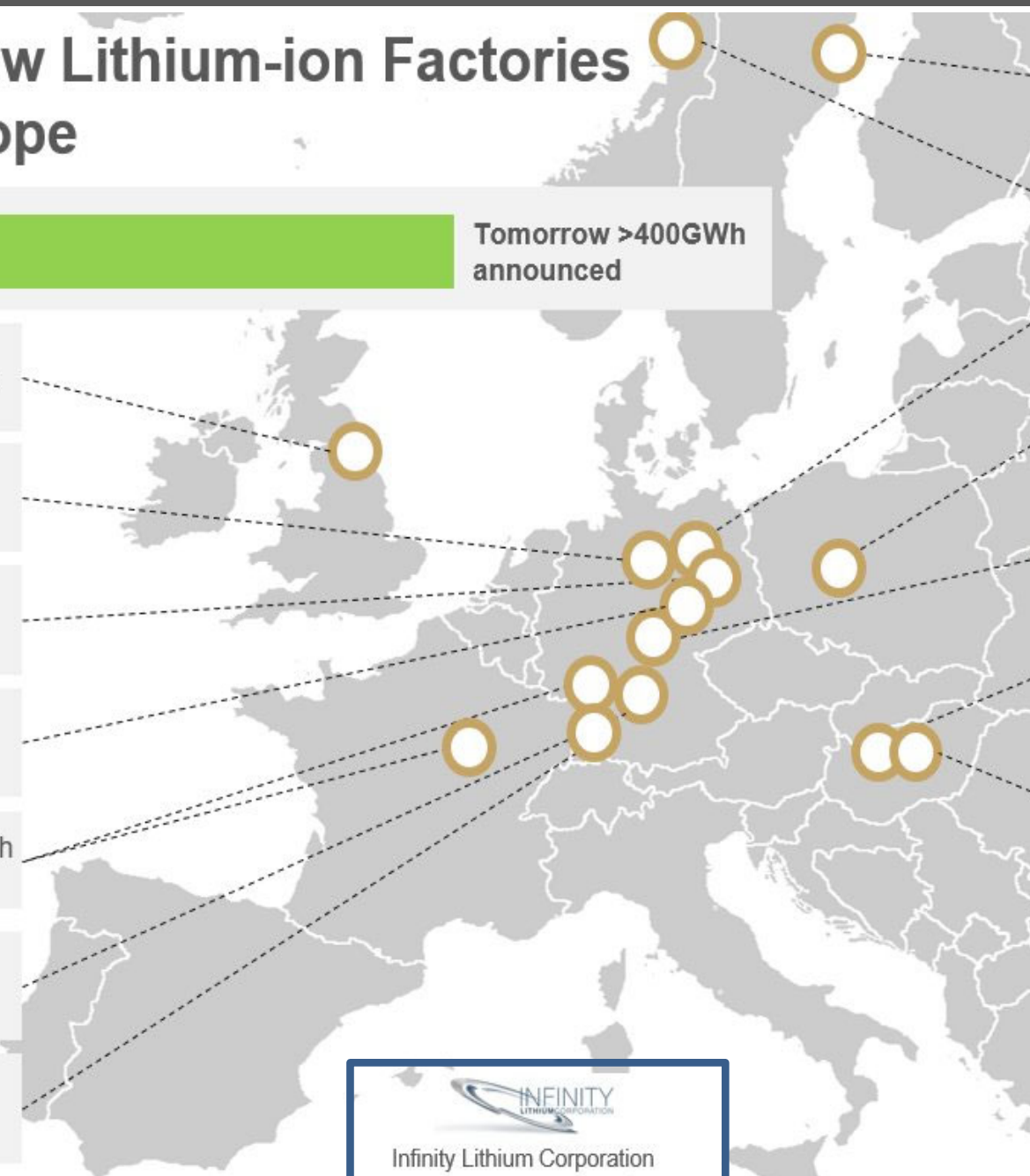
# Répercussions en cours au niveau de l'Europe

## Multitude Of New Lithium-ion Factories Planned In Europe

Today <10GWh Capacity

Tomorrow >400GWh announced

-  Started 2010, 2.5GWh
-  16GWh to start and ramp up to 30GWh
-  To build Gigafactory starting in 2021
-  Start 2022, up to 10GWh
-  Start 2022, 16GWh then 64GWh
-  Start 2023, up to 24GWh
-  Start 2020, up to 1GWh



-  Start 2021, up to 40GWh
-  Start 2023, up to 32GWh
-  Start 2021, up to 12GWh
-  Started 2018 6GWh later up to 70GWh
-  Start 2022, up to 100GWh
-  Start 2020, up to 24GWh
-  Started 2018 3GWh, later 15GWh
-  Potential plant in Hungary
-  Potential plant in Europe
-  Potential plant in Germany



Infinity Lithium Corporation



# Le BOOM du véhicule électrique (VE)



1884



1899



1942

1942: L'oeuf électrique



1960

1960: Ford Comuta



1997

Toyota "Prius"



2013

Tesla

2020



(GM "Volt")

(Peugeot "iON")

Renault "Fluence"

(Bolloré "Bluecar")

(Nissan "Leaf")

Vente des VE devraient dépasser la limite des

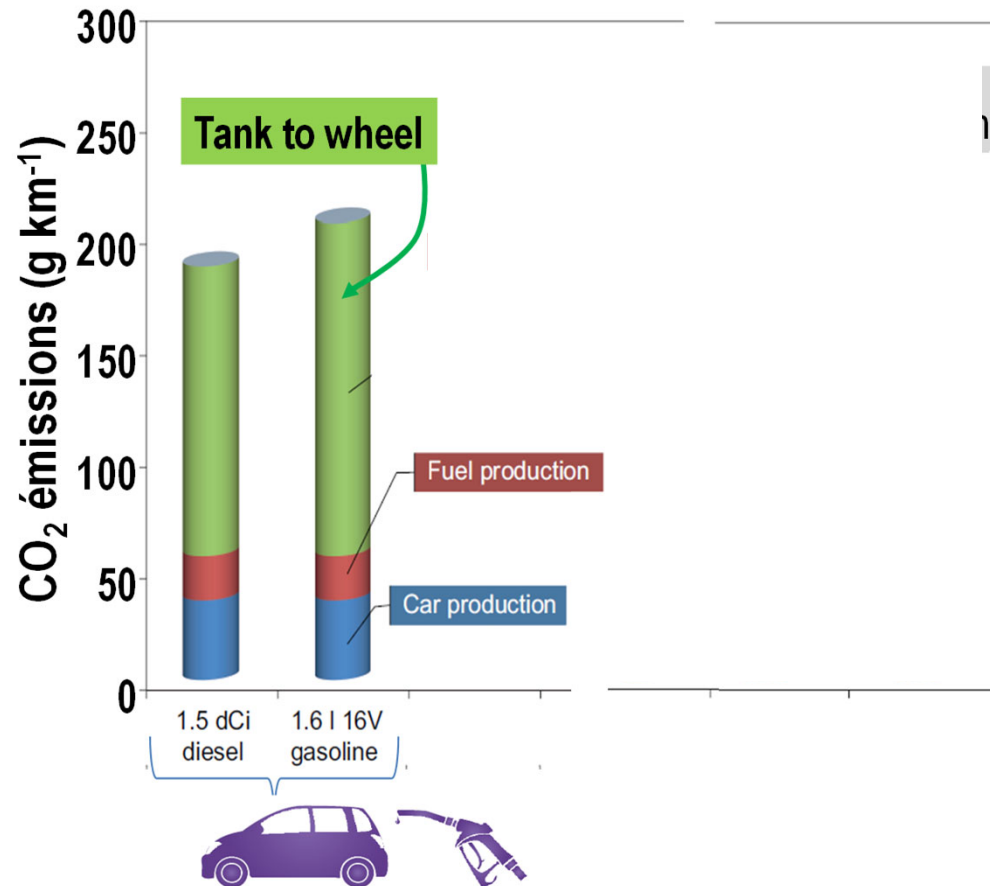
25 millions en 2025

Plus de 400 modèles annoncés

Le véhicule électrique est-il la solution pour un monde durable ?

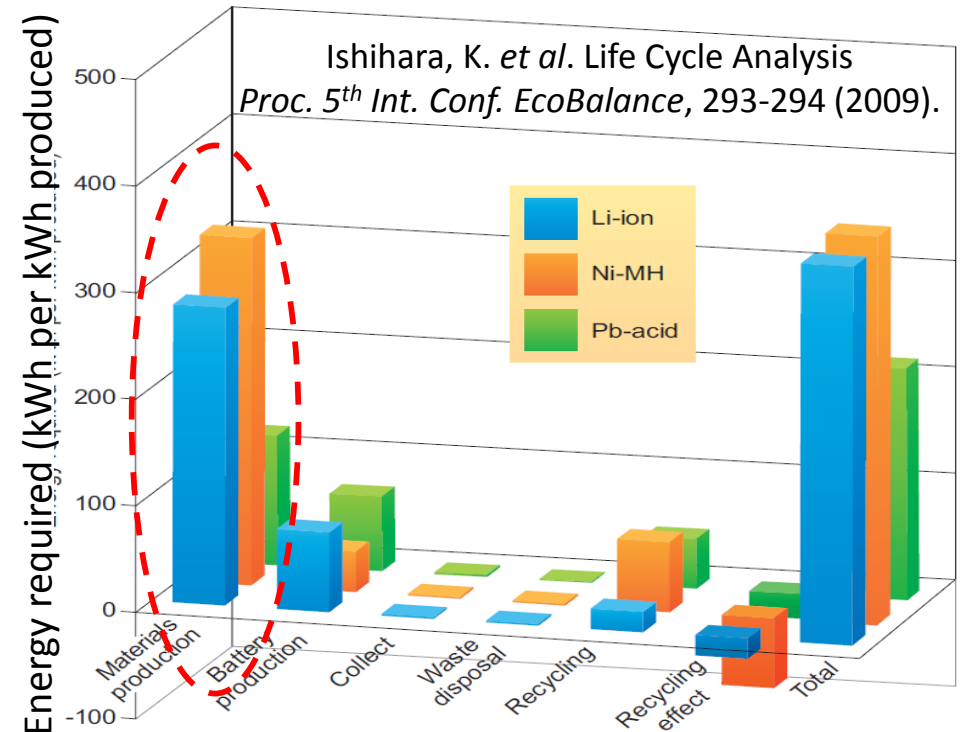
# La meilleure solution pour une faible empreinte CO<sub>2</sub> ?

## Importance de la source d'énergie primaire



Energie provenant de centrales thermiques : Non

## Analyse du cycle de vie



➤ Assemblage d'une batterie de 1kWh

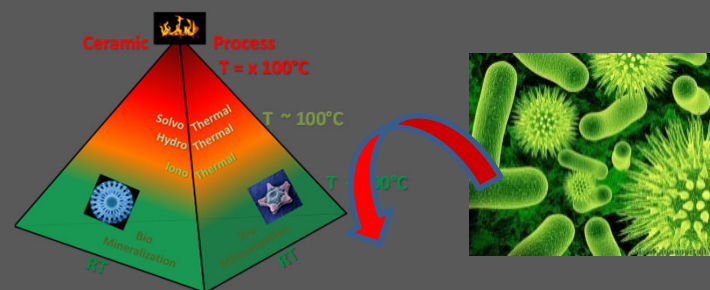
- ✓ Energie nécessaire ≈ 327 kWh
- ✓ CO<sub>2</sub> rejeté ≈ 90 kg

# Science et innovation pour le développement de batteries plus vertes : Quelles tendances ?

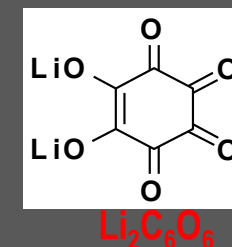
Elaboration de matériaux performants à partir d'éléments abondants

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	Be																Ne
Na	Mg																Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe

Développement de synthèses moins énergivores



Utilisation d'électrodes organiques renouvelables provenant de la biomasse

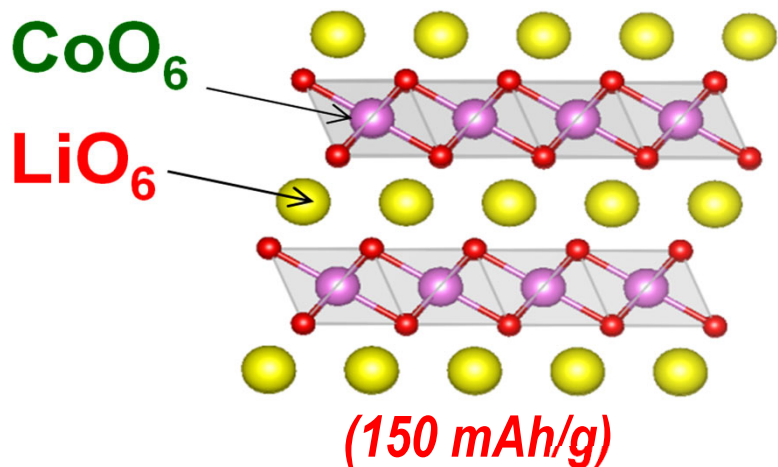


Exploration de nouvelles chimies au-delà du Li, plus éco-compatibles

Développer des batteries intelligentes à longue durée de vie

# Les oxydes lamellaires : Evolution de leur capacité au fil des années via la chimie

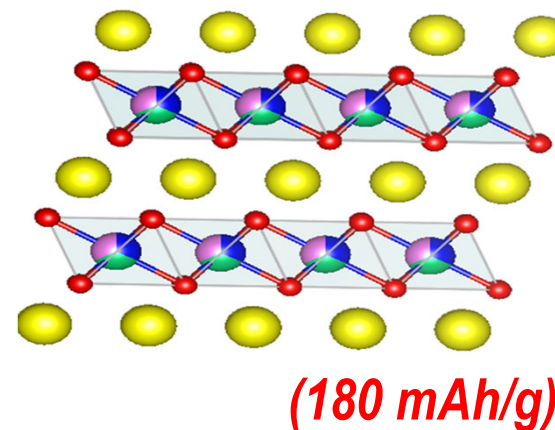
## □ LiCoO<sub>2</sub> (1991)



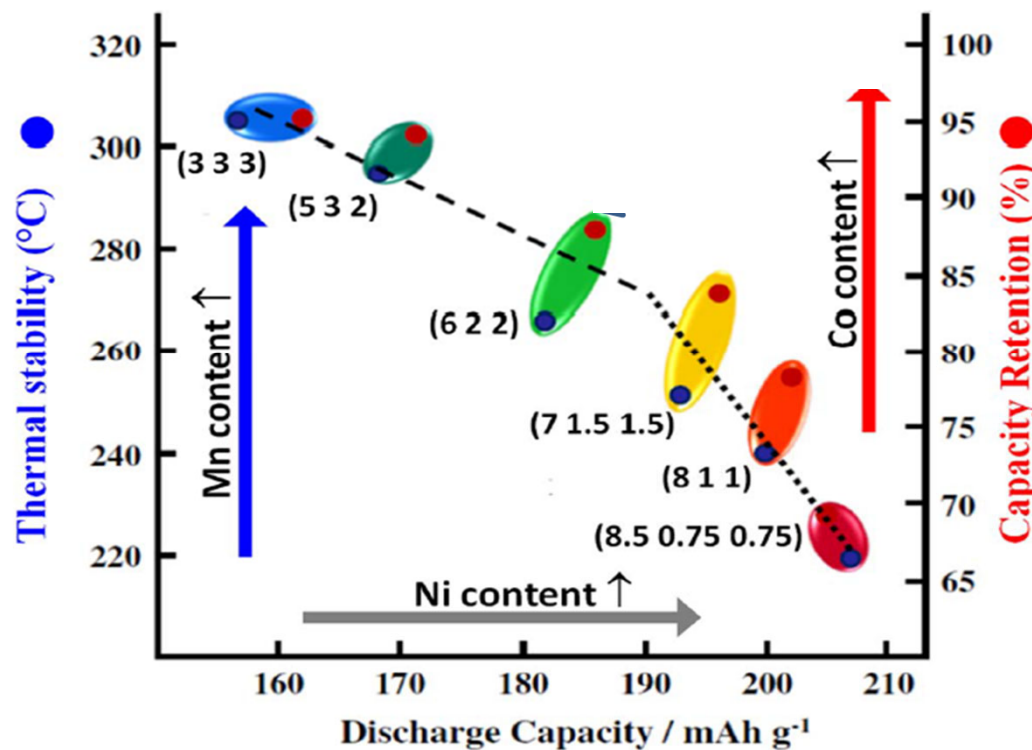
Remplacement du Co par le Ni et Mn



## □ Oxydes lamellaires (2008)



Extraction du Co:  
une question d'éthique



Durabilité  
de la  
technologie  
Li-ion actuelle  
?

# La batterie Li-ion : Maitrise de sa chimie pour une grande durabilité



J. Dahn



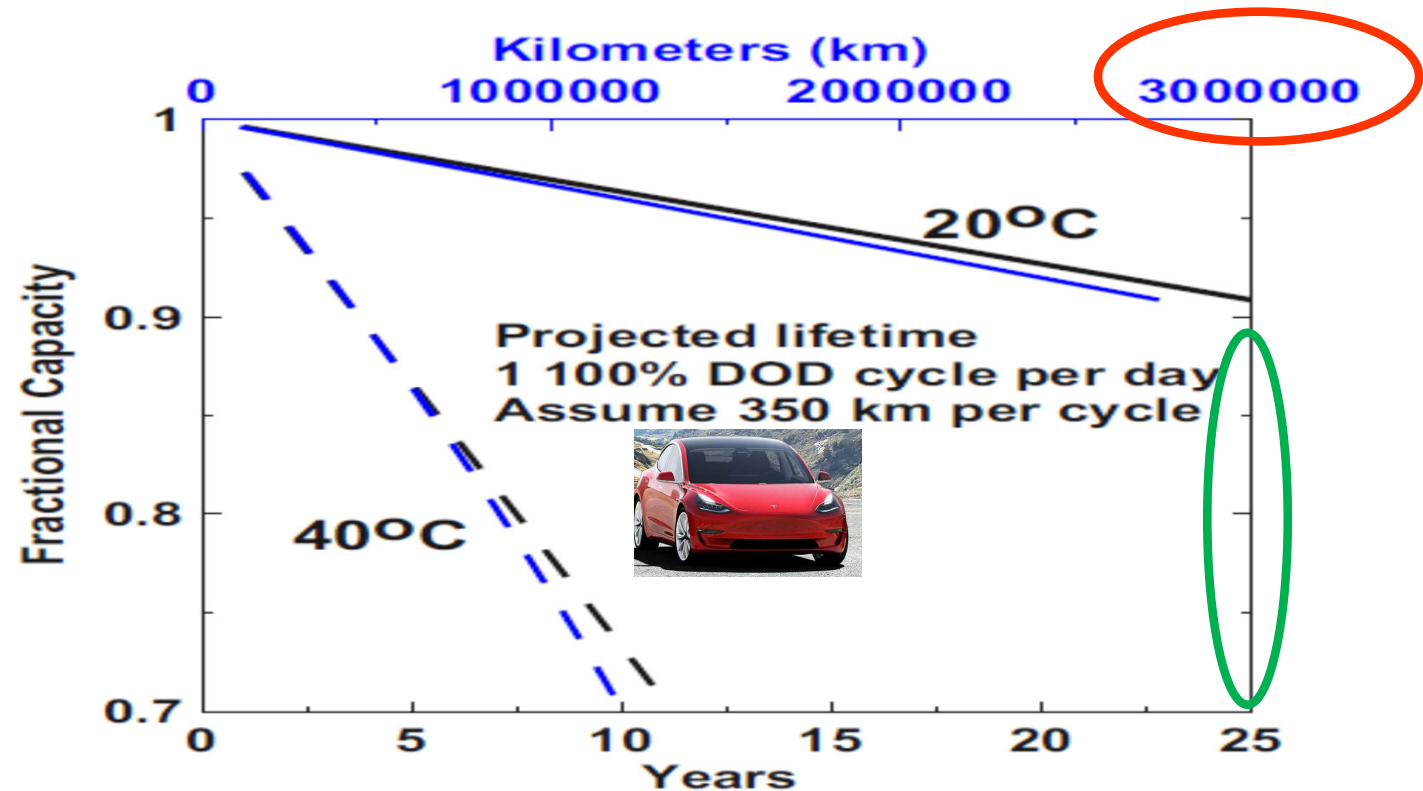
## A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies

Jessie E. Harlow,<sup>1,2</sup> Xiaowei Ma,<sup>1,2</sup> Jing Li,<sup>1,2</sup> Eric Logan,<sup>1,2</sup> Yulong Liu,<sup>1,2</sup> Ning Zhang,<sup>1,2</sup> Lin Ma,<sup>1,2</sup> Stephen L. Glazier,<sup>1,2</sup> Marc M. E. Cormier,<sup>1,2</sup> Matthew Genovese,<sup>1,2,\*</sup> Samuel Buteau,<sup>1,2</sup> Andrew Cameron,<sup>1,2</sup> Jamie E. Stark,<sup>1,2</sup> and J. R. Dahn<sup>1,2,\*\*,z</sup>

Septembre  
2019  
260000 fois

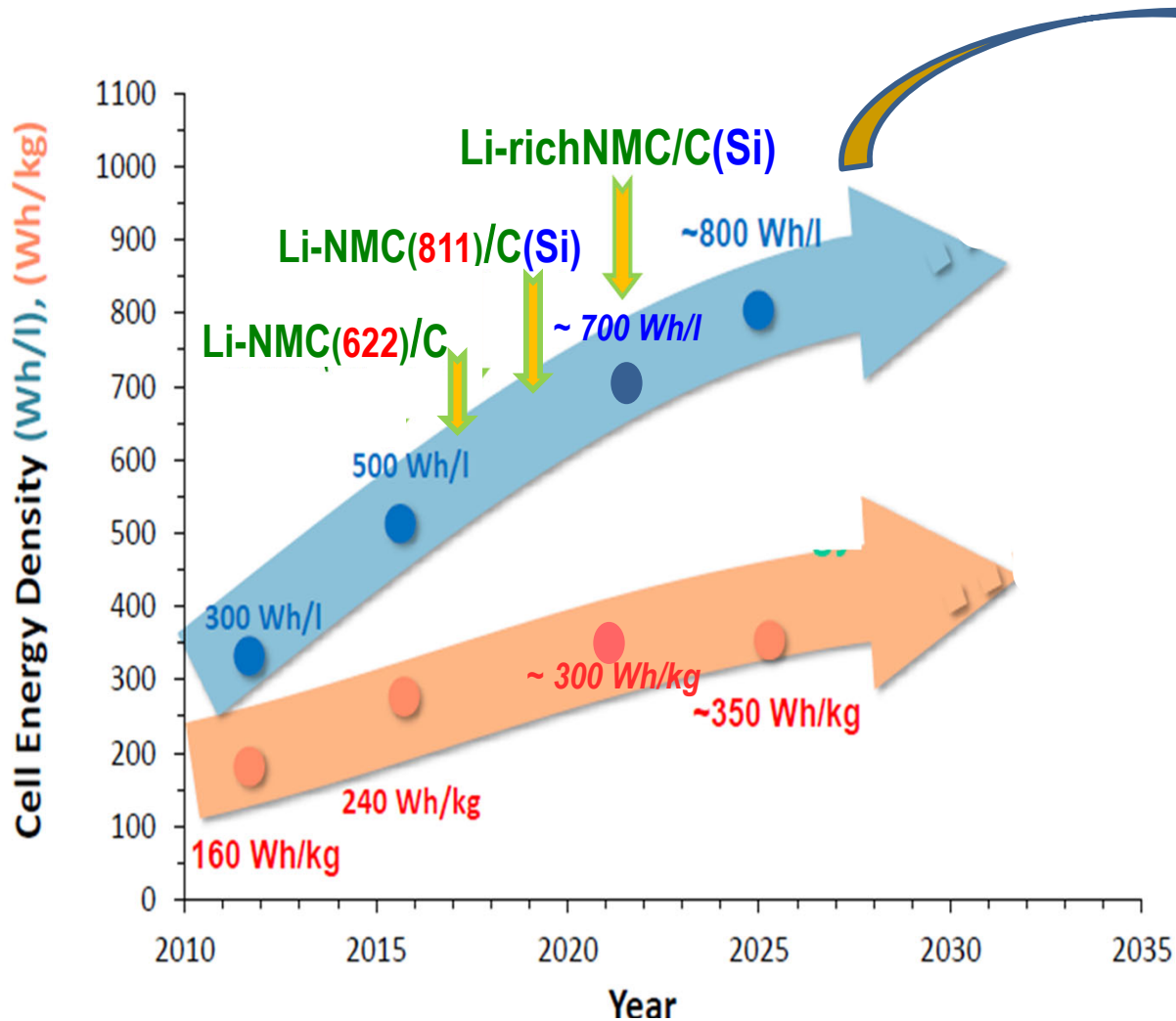


Trois années  
de tests sur  
Cellules  
(NMC(532)/Carbone)

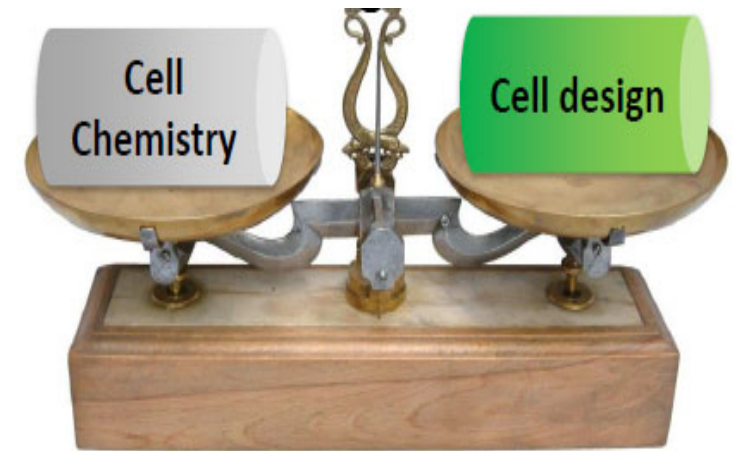


Challenges restant associés à la technologie Li-ion...

# La technologie Li-ion : Que pouvons-nous espérer ?



Comment obtenir 800Wh/l  
et aller au-delà  
?



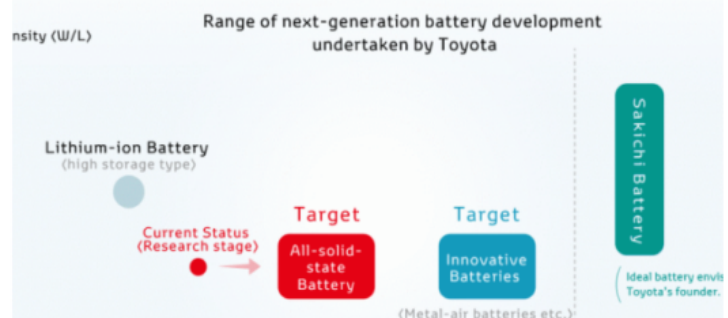
**Les batteries  
tout solide**

# Les batteries tout solide : Le plus grand engouement d'aujourd'hui dans le domaine des batteries

## Recherche tirée par l'industrie

Toyota plans to leapfrog Tesla electric cars by 2022 with fast charging solid state batteries

brian wang August 23, 2017 38 comments



## BMW's New Partner Tells Us Why Solid State Batteries Will Beat Tesla's Tech

By Mike Brown on December 18, 2017

Filed Under Innovation, Batteries, Cars, Design, Elon Musk & Gigafactory

BMW's electric car efforts got a big spark on Monday, when solid state battery developer Solid Power announced a new partnership that will see the pair working to create the next generation of rechargeable vehicles. If their efforts are successful, it could beat out the likes of the Tesla Model 3 that uses regular lithium-ion batteries.

FINANCIAL TIMES

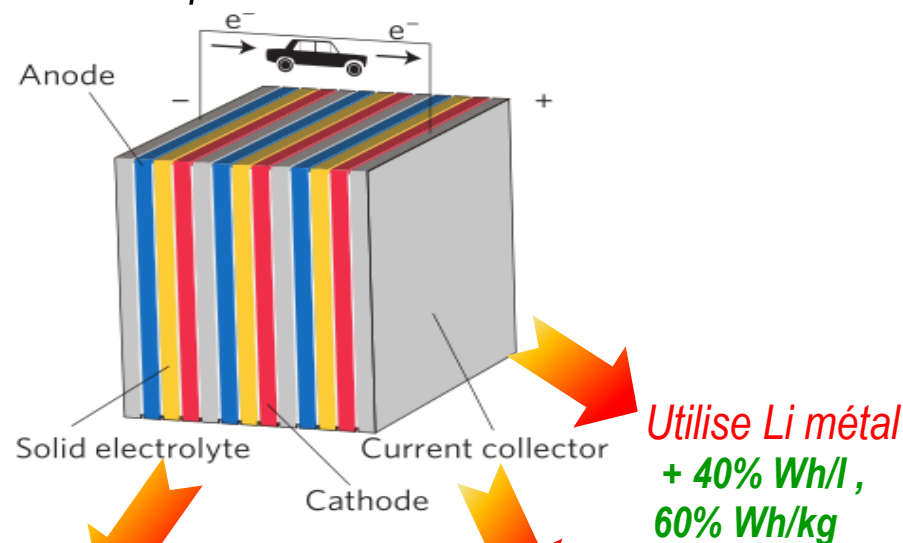
fastFT Batteries + Add to myFT

## UK govt backs research into solid-state batteries for electric cars

Faraday Institution aims to put UK 'at the forefront of battery technology worldwide'

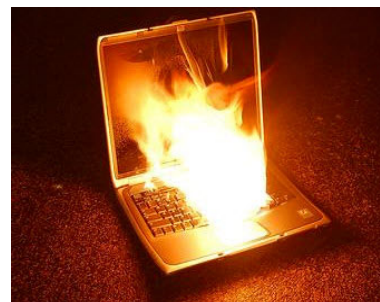
## Avantages des batteries tout solide

Tous les composants sont solides

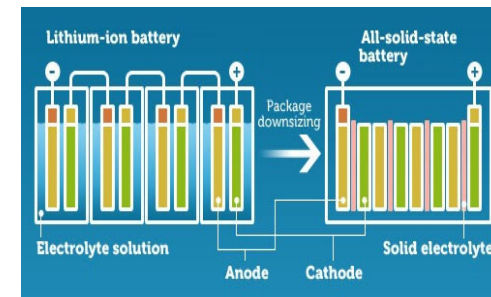


Electrolyte solide par rapport à liquide

Configuration bipolaire



Plus de sécurité

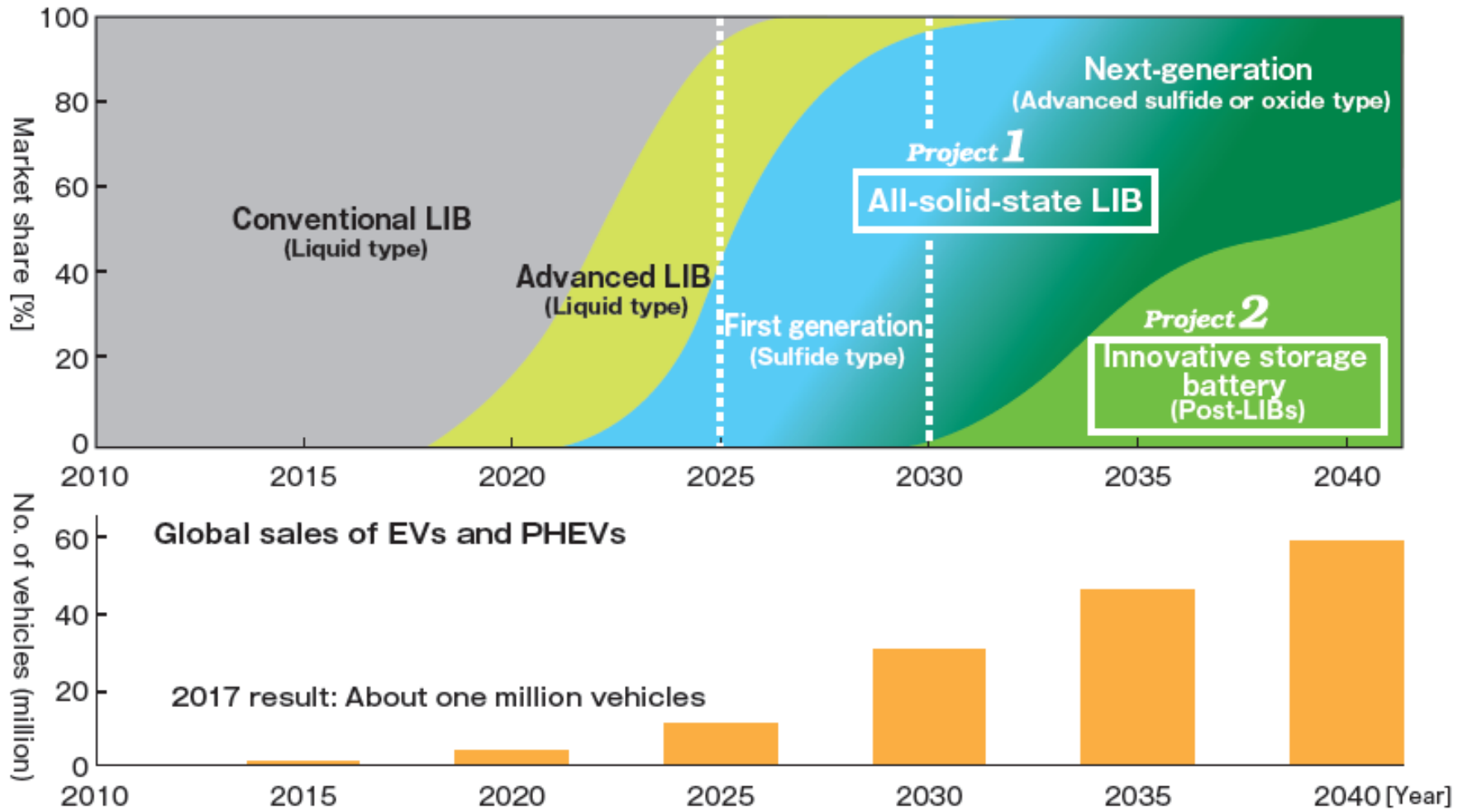


Plus compacte → plus de Wh/l

# Les batteries tout solide sont sur la feuille de route de toutes les institutions

## ► La vision du Japon

### Long-term forecast of technology and market for automotive batteries



\* Source: Created by NEDO based on various other materials.



# Progrès substantiels au niveau des conducteurs ioniques

Kanno  
Nature Materials  
Vol. 10 - (2011)

$\sigma_{RT}$  comparable to Liquid electrolyte ( $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  S·cm<sup>-1</sup>)

Garnets  
 $Li_{10}GeP_2S_{12}$

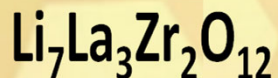
Les batteries tout solide sont prometteuses, mais la route sera longue que ce soit au niveau fondamental ou appliqué avant la commercialisation



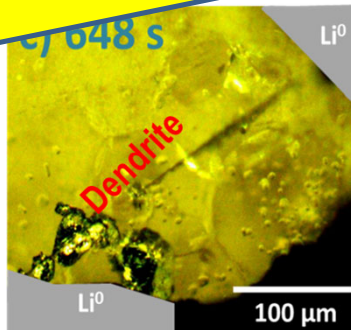
**La cible de 2022 est totalement irréaliste ..**

Greffage

Aspérités



Ingénierie de surface



Crack filling with Li

aux joints de grains  
Dendrites de lithium

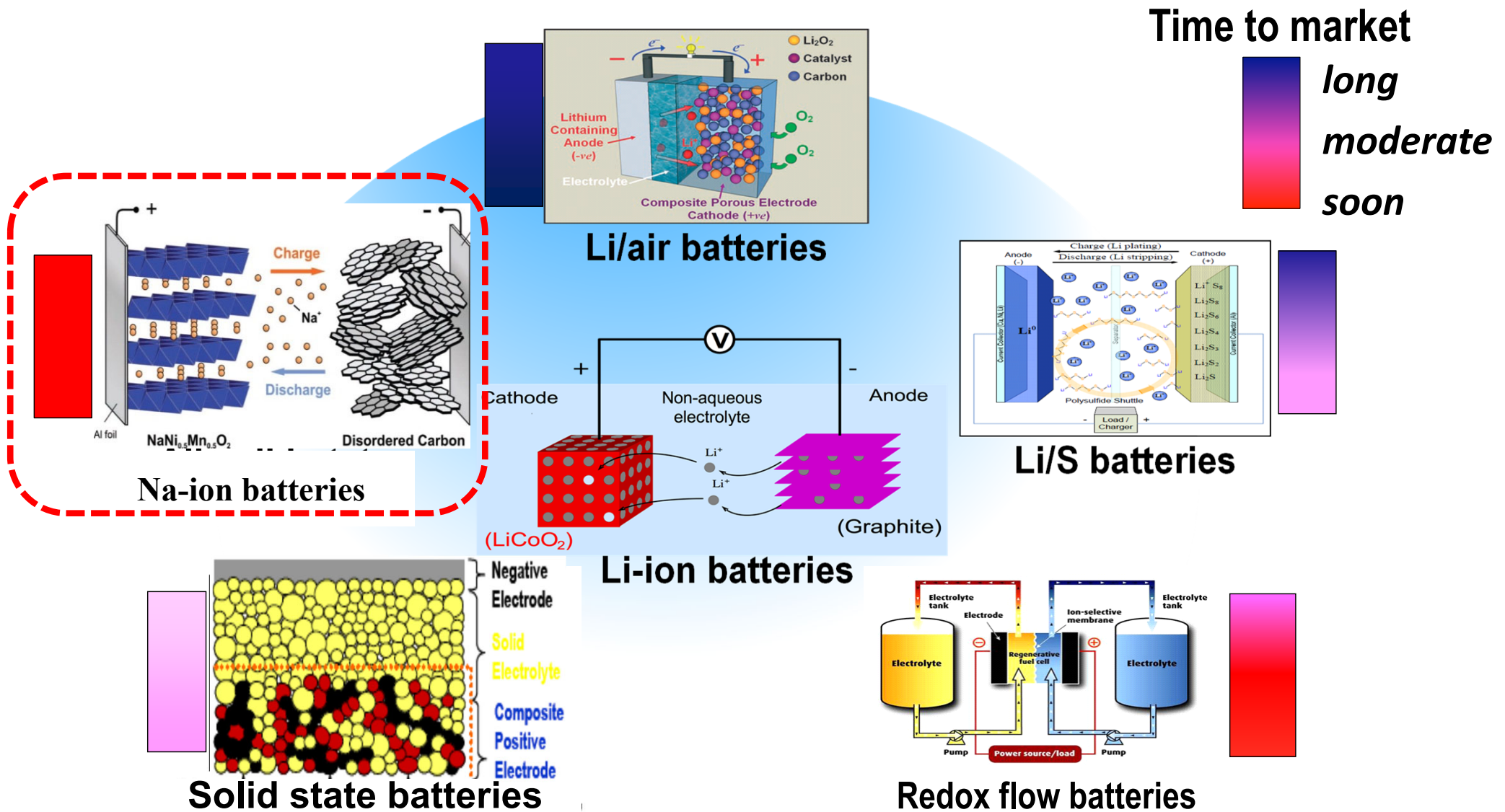




**➤ Comment augmenter l'éco-compatibilité des batteries?**




# Diversification des batteries pour un développement durable



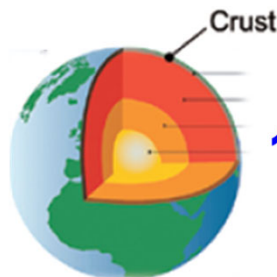
Aucune d'entre elles n'a atteint un état de maturation suffisant...

# Du Li-ion au Na-ion



**3** **6.941**  
0.98  
 180.5 **Li**   
 0.534  $1s^2 2s^1$   
**Lithium**

17 ppm




19000 ppm



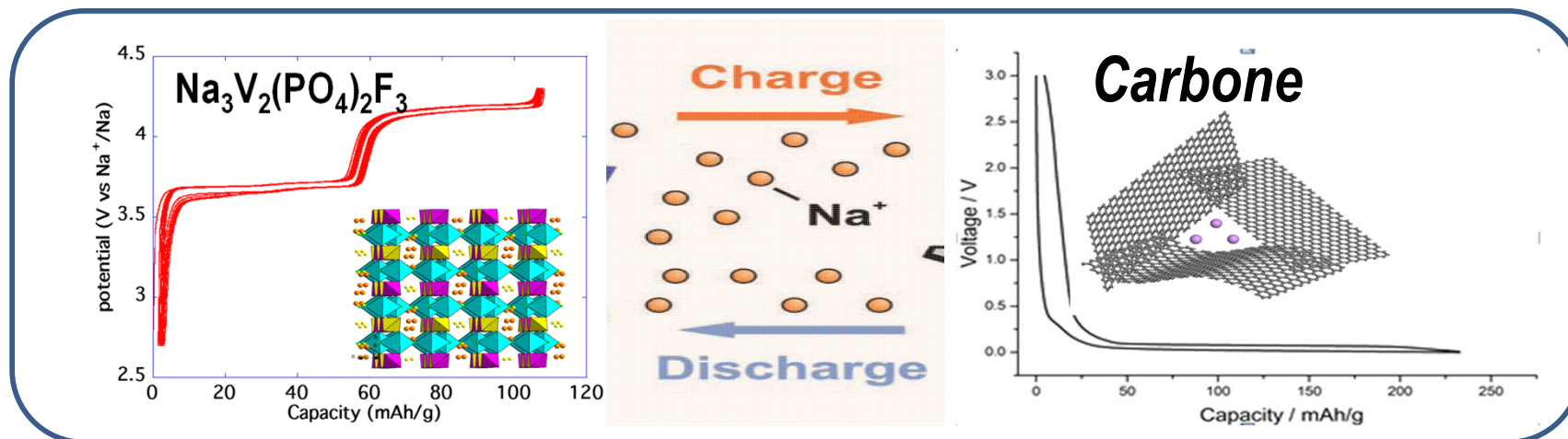
0.18 ppm

10800 ppm



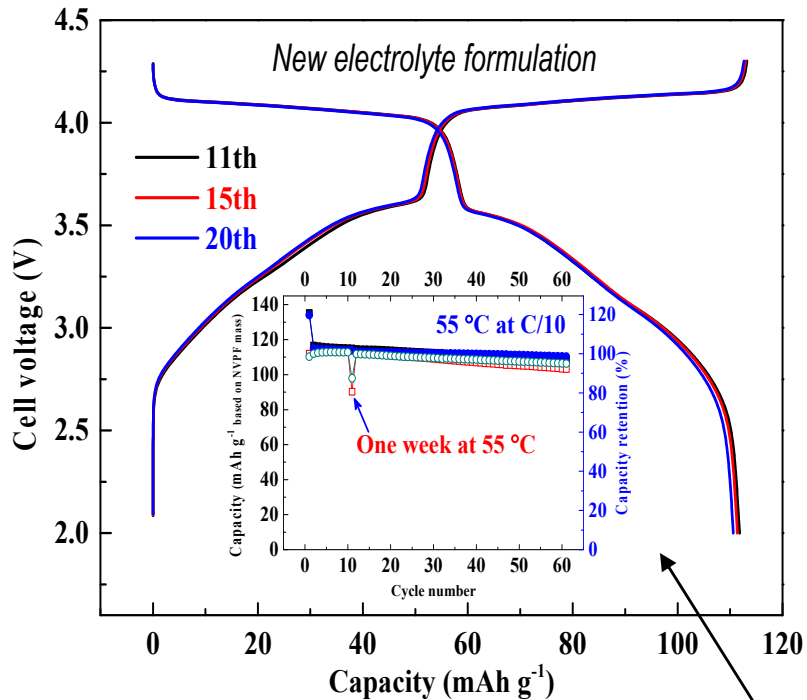
**11** **22.941**  
0.9  
 98 **Na**   
 0.97  $2s^2 2p^6 3s^1$   
**Sodium**

Développer des batteries Na-ion ... Mise au point d'une nouvelle technologie

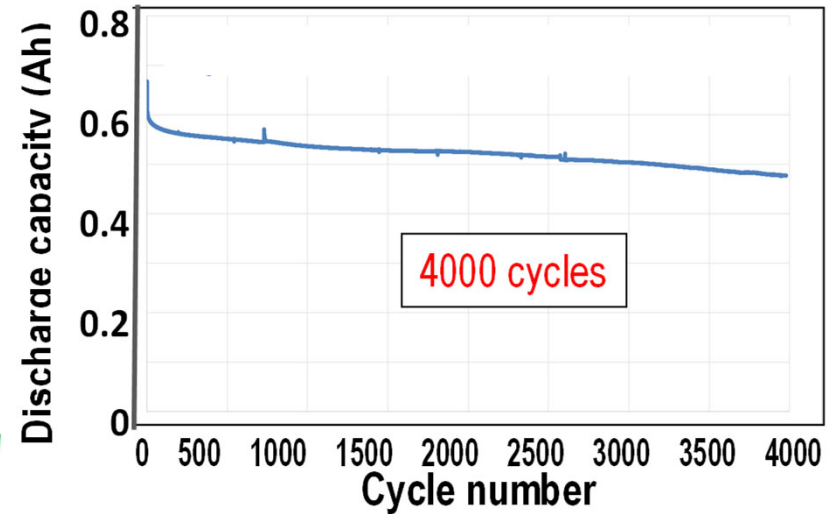


# Performances des cellules Na-ion (NVPF/C)

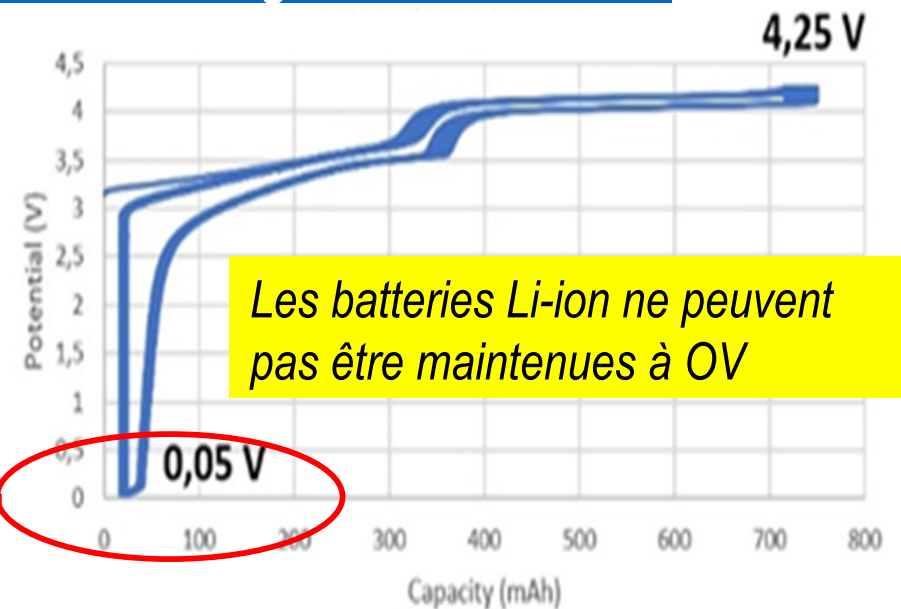
## Cyclage à 55 °C



## Performance en cyclage



## Stockage à 0 volt

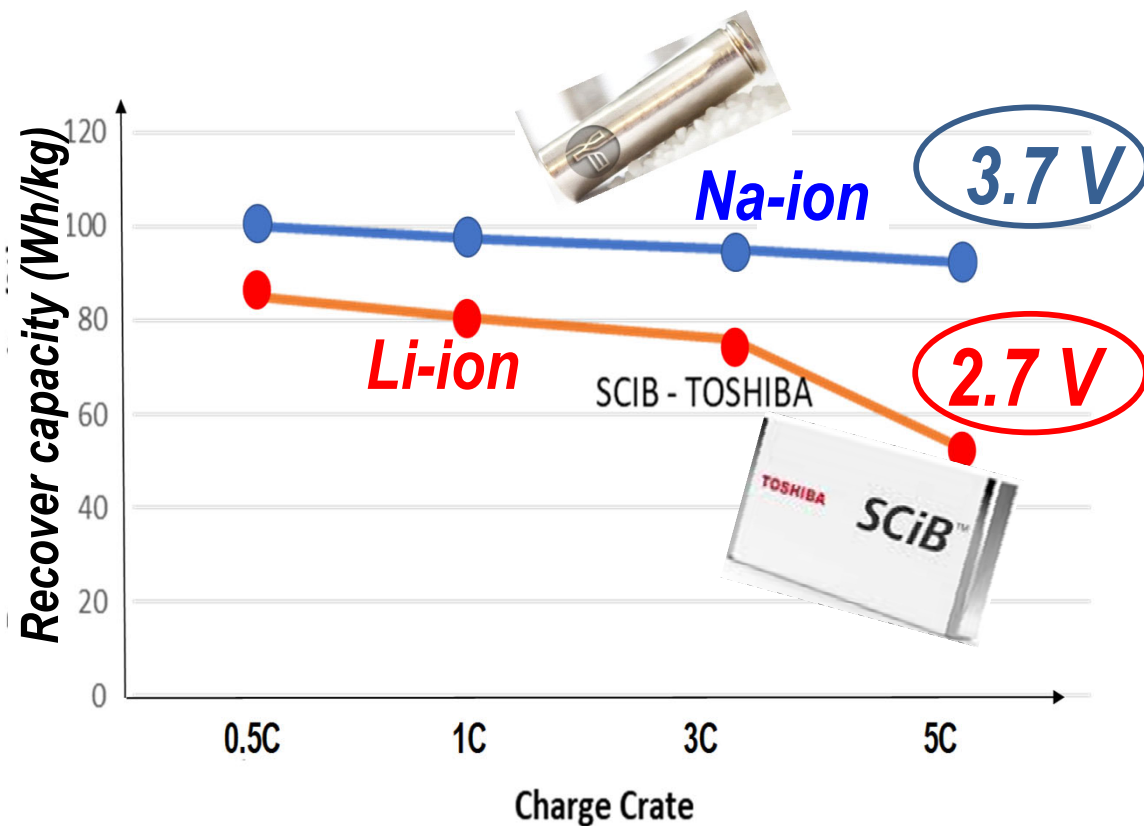


1. Bonnes performances en T
2. Très bonne durée de vie
3. Facile à transporter et à stocker

Les batteries Li-ion ne peuvent pas être maintenues à 0V

# La puissance : Un autre avantage du Na-ion

## ► PUISSANCE – COMPARAISON AVEC LA CELLULE SCiB (Li-ion) de TOSHIBA



Les cellules Na-ion affichent des performances qui se comparent favorablement à celles des cellules Li-ion SCiB tout en ayant une tension de sortie plus élevée

Création d'une filière française Na-ion en Picardie



## **Comment allonger la durée de vie des batteries?**

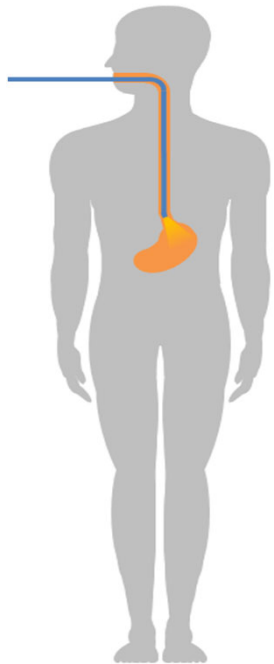
 Leur donner une seconde vie en y injectant de l'intelligence

# La seconde vie des batteries

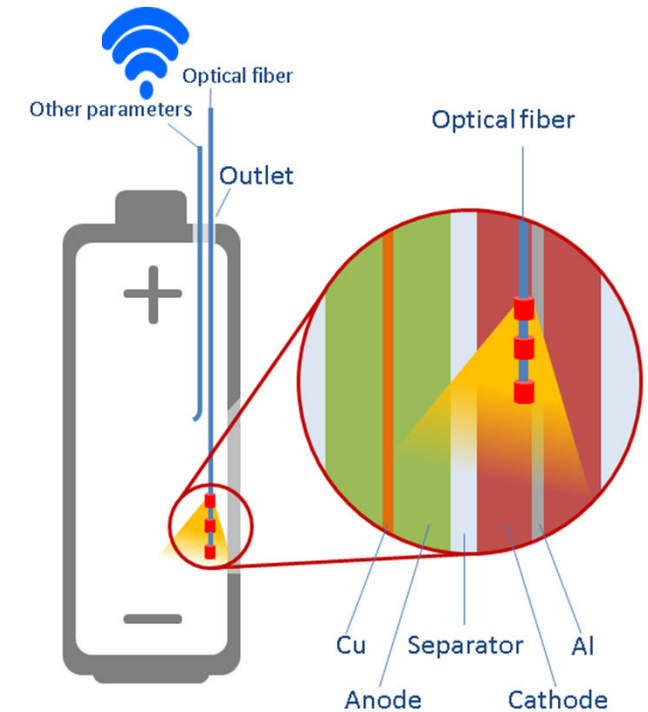
□ Donner aux batteries une double fonctionnalité



Meilleure traçabilité pour établir leur bilan de santé en direct comme pour les êtres humains



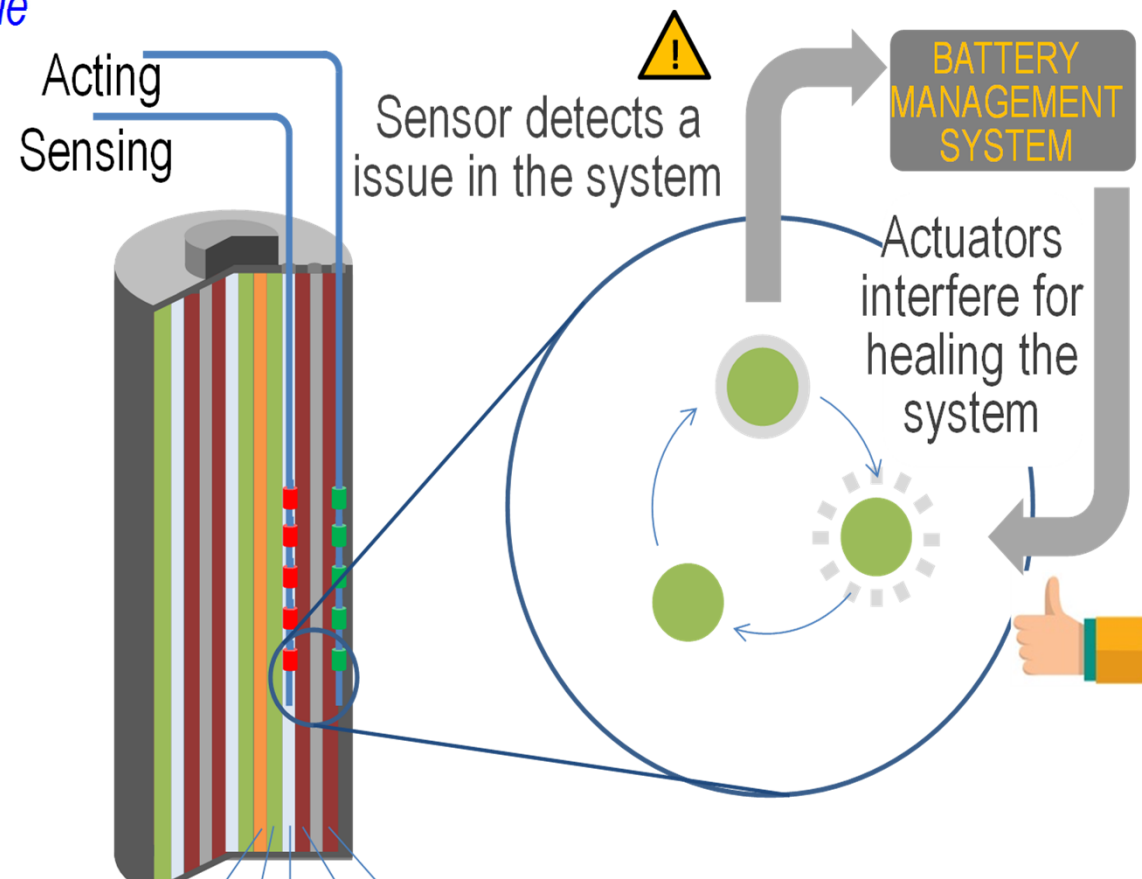
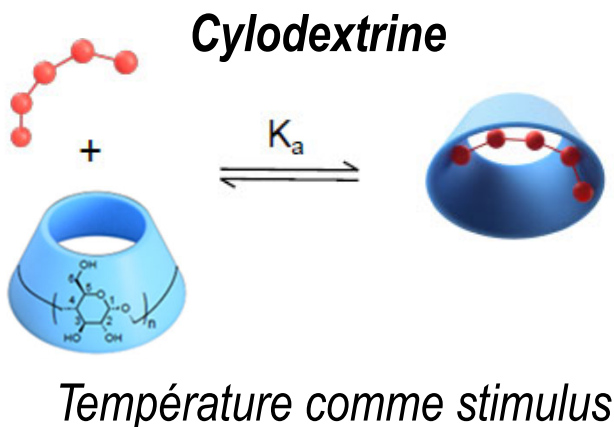
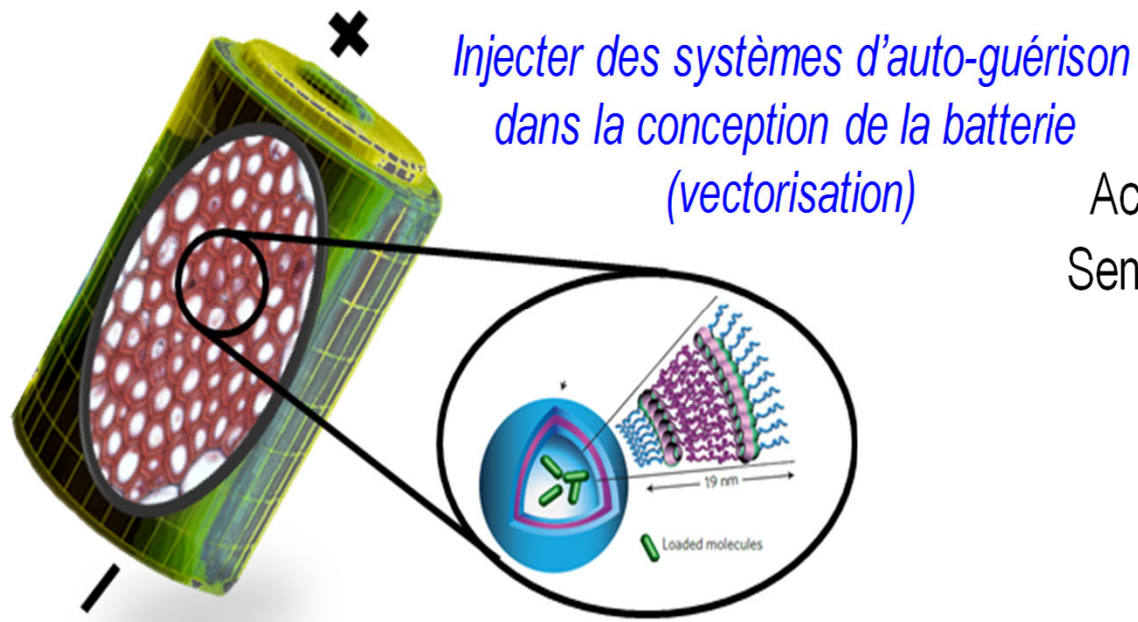
**Injecter de l'intelligence dans les batteries via des capteurs (optiques, acoustiques, électriques.) pour une surveillance en temps réel**





□ Développement de systèmes auto-réparants

□ Batterie du futur intégrant des fonctions de diagnostic et d'auto-réparation



Repousser l'âge de recyclage des batteries ...

# Les batteries et leur devenir : Anticiper le futur sans refaire les erreurs du passé

## □ L'histoire du plastique

**1900s'**- L'ère du polymère

Bakelite, the world's **first fully synthetic plastic**, was invented on Feb 5, 1907

### 'A MATERIAL OF THOUSAND USES'

Was **invented by** Belgian-born American chemist **Leo Hendrik Baekeland**



It kick-started the **modern plastics industry**

Because it was **durable, lightweight & easily** mouldable it revolutionised the consumer durables industry



It was useful in automotives & electrical industries also



**Bakelite's biggest influence** was on perhaps the fashion industry—making jewellery attractive & cheap

**NF newsficks** visual news on your mobile **SMS NF to 52424** FOR FREE APP DOWNLOAD



**2000s'**- La pollution par le plastique, un problème majeur



L'Inde : le dépotoir des plastiques du monde



## □ Les batteries à ions Li , 100 ans plus tard ?

**2000s'**- L'âge du véhicule électrique



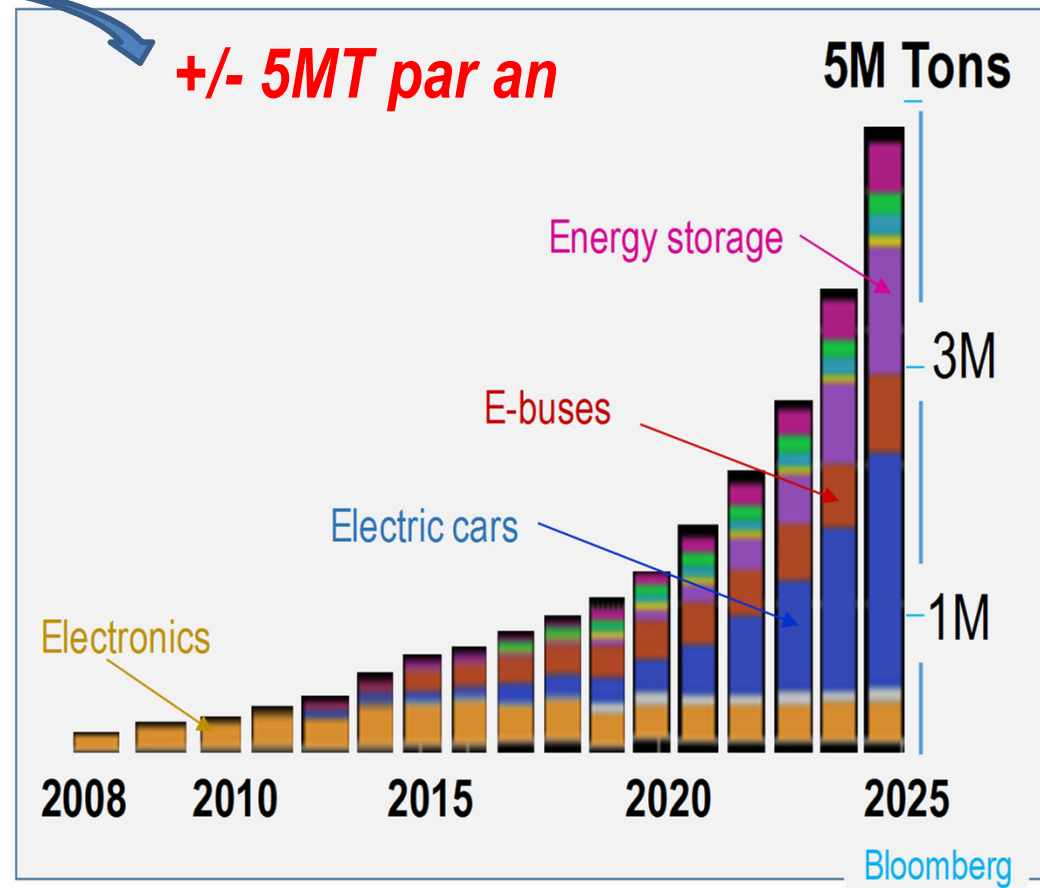
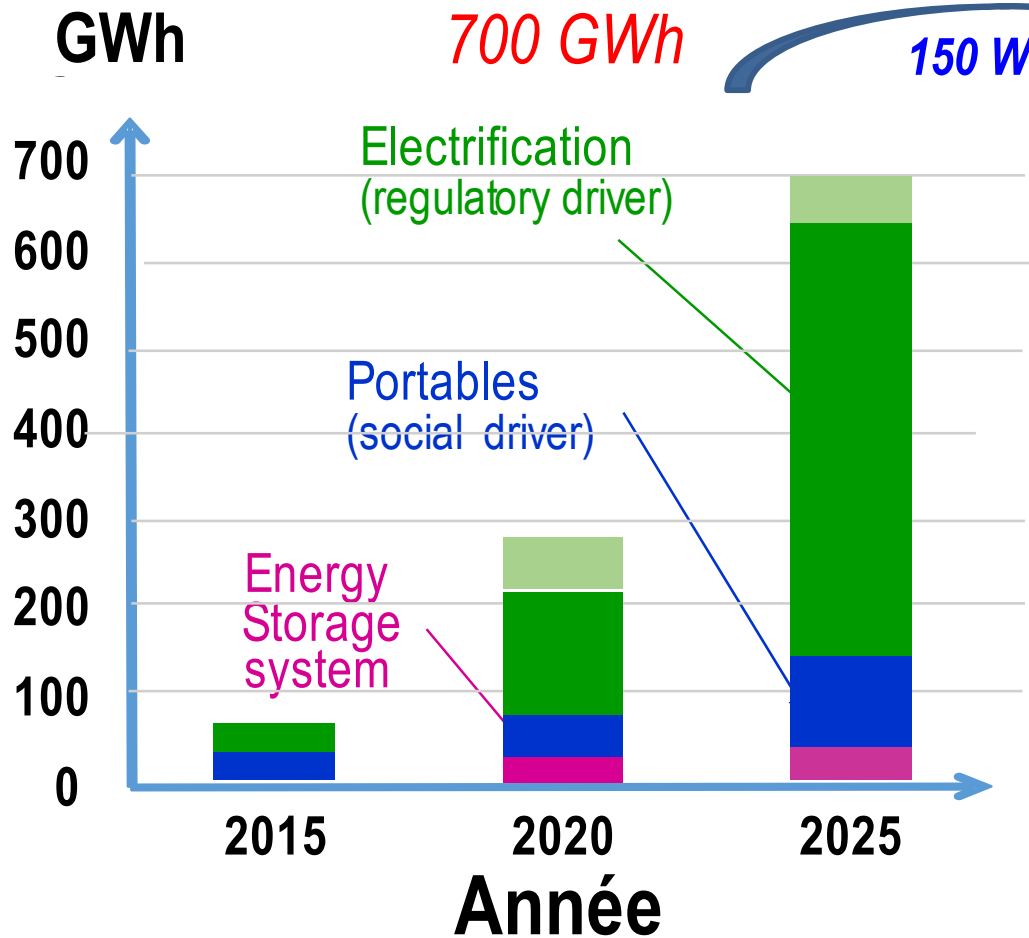
Crucial d'agir pour anticiper le recyclage de grands volumes de batteries

# Les batteries à ions Li : Quelques chiffres du marché

Li-ion en termes d'énergie stockée

Li-ion en termes de masse à recycler

Volumes gigantesques  
à recycler



Agir maintenant pour anticiper le recyclage de 5 MT de batteries par an en 2025

## Repenser les procédés de recyclage

2 méthodes

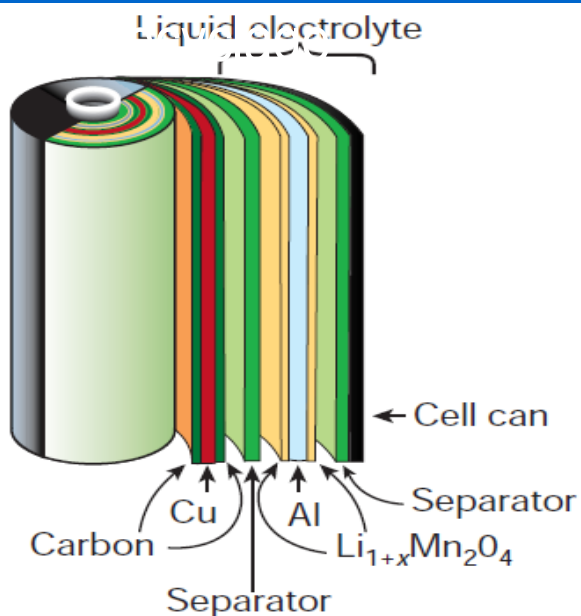
*Pyrométallurgie*

*Hydrométallurgie*

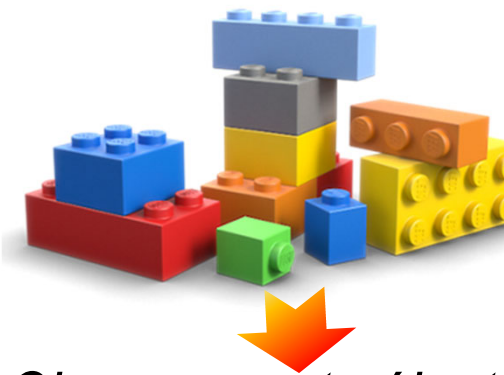


➔ Favoriser les circuits courts de recyclage :  
**Méthode direct**  
(séparation physique et retraitement)

## Repenser la configuration des batteries



Batterie de type « LEGO »

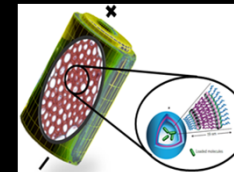
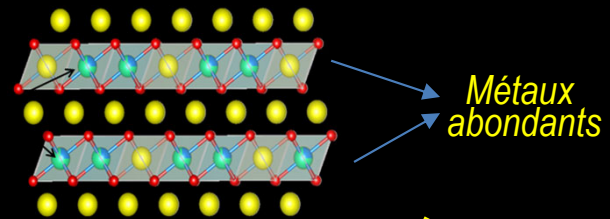


➔ Changement sélectif des composants de la batterie

# Conclusions: Les batteries sont elles une bonne option pour un développement durable ?

## Oui mais à quelques conditions

- Utiliser de l'énergie primaire en provenance d'énergies renouvelables pour recharger les batteries
- Développer des matériaux d'électrodes à plus haute capacité et à base de métaux abondants
- Développer des technologies de batteries plus éco-compatibles
- Injecter de l'intelligence dans les batteries pour repousser l'âge pivot de recyclage et autoriser une seconde vie
- Lancer une politique de recyclage agressive incluant procédés et circuits courts de récupération et mise en place de normes strictes





COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

**Merci pour votre attention**

