



Stockage électrochimie de l'énergie et batteries : implications dans la transition écologique

Lorenzo Stievano

Transition énergétique : Contexte

Utilisation massive et croissante des sources d'énergie fossiles



Forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre



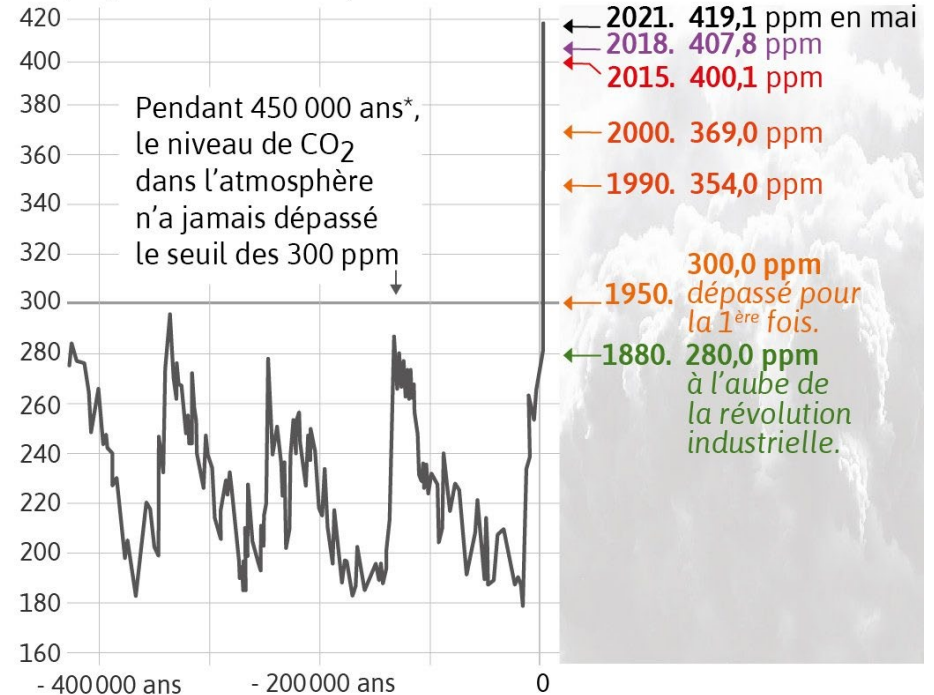
Augmentation de la température sur la planète à une vitesse anormale

CLIMAT

LE DIOXYDE DE CARBONE (CO₂) DANS L'ATMOSPHÈRE

Nouveau record de concentration de CO₂ dans l'atmosphère en mai 2021 avec **419,1 ppm** en moyenne.

CO₂ (en parties par million)



*données recueillies à partir d'analyses de glace issue de forages aux pôles. Sources : OMM, NOAA, NASA et Mauna Loa Observatory (Hawaï).

Transition énergétique : Contexte

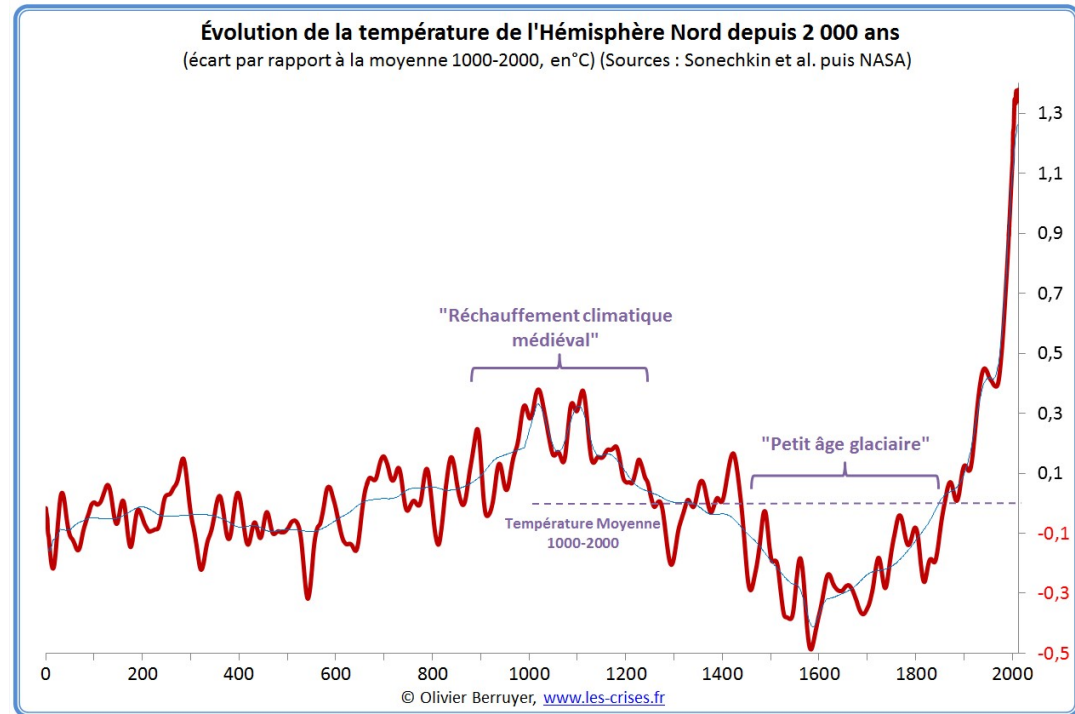
Utilisation massive et croissante des sources d'énergie fossiles



Forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre



Augmentation de la température sur la planète à une vitesse anormale



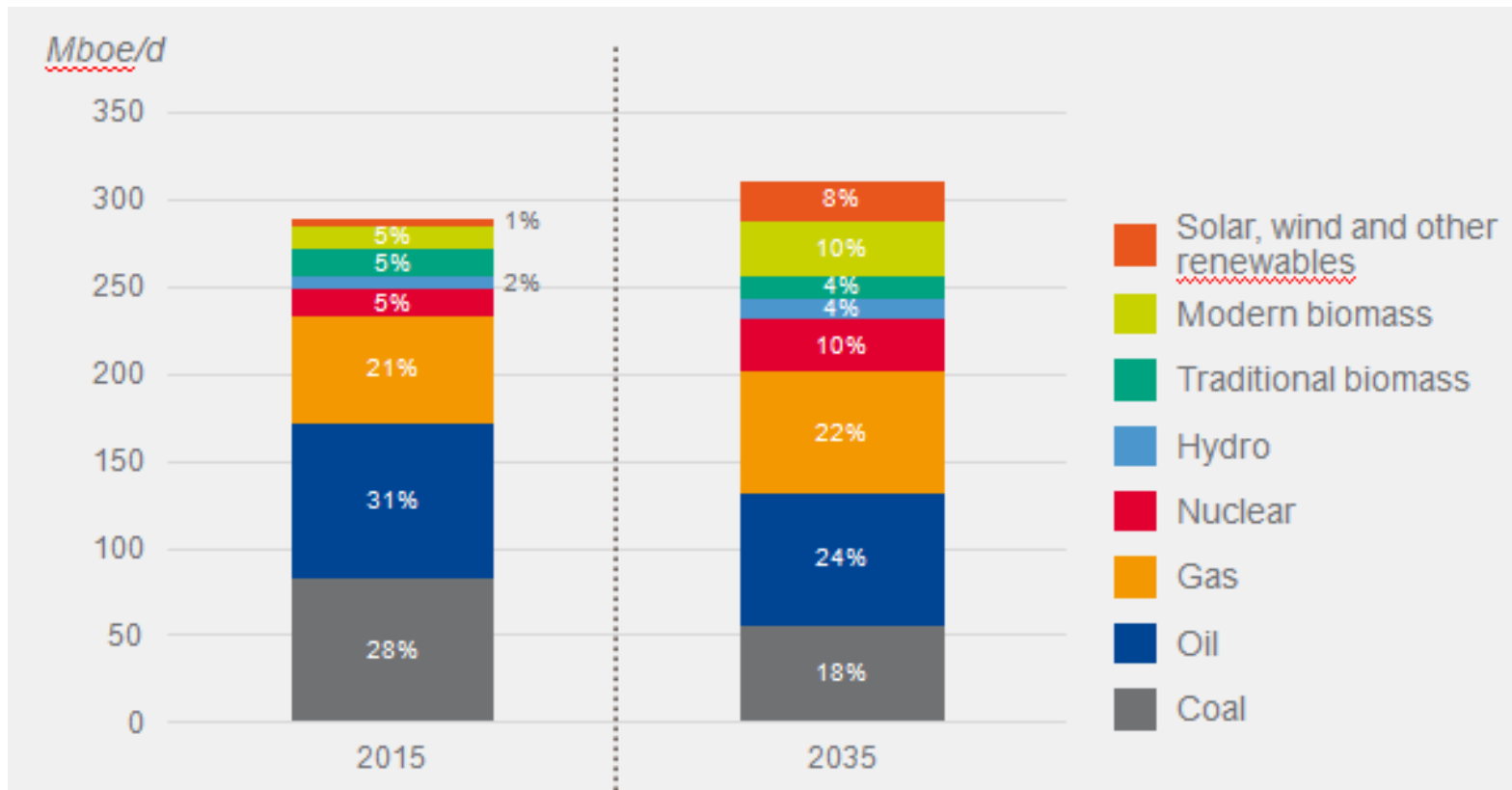
Transition énergétique : Contexte

- Transition écologique : passage graduel mais **nécessaire** vers des énergies plus propres pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.
 - Optimisation de l'utilisation des systèmes existant (fossile et nucléaire)
 - Intégration croissante des énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.)



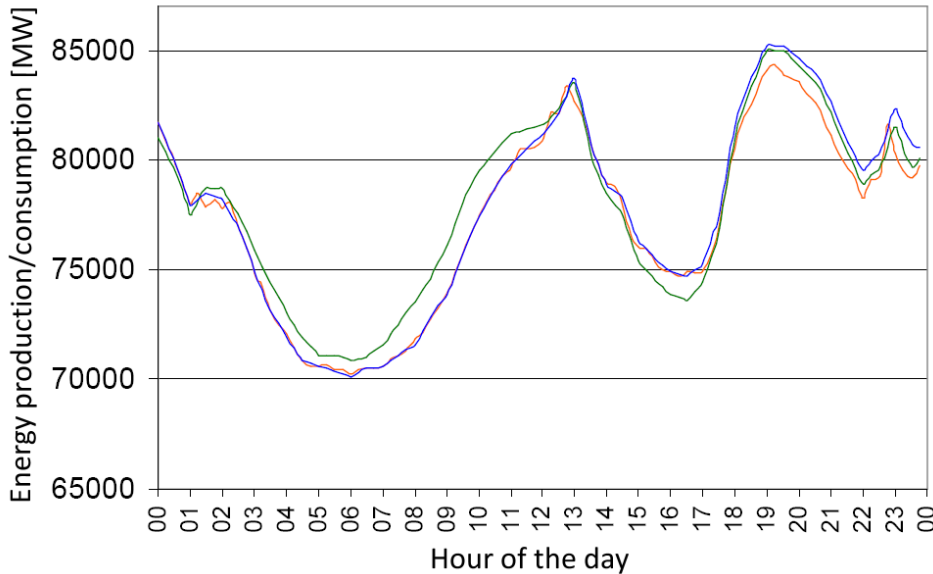
Transition énergétique : Contexte

- Transition écologique : passage graduel mais **nécessaire** vers des énergies plus propres pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.
 - Optimisation de l'utilisation des systèmes existant (fossile et nucléaire)
 - Intégration croissante des énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.)



Pourquoi le stockage de l'énergie est essentiel

- Exemple: solaire photovoltaïque

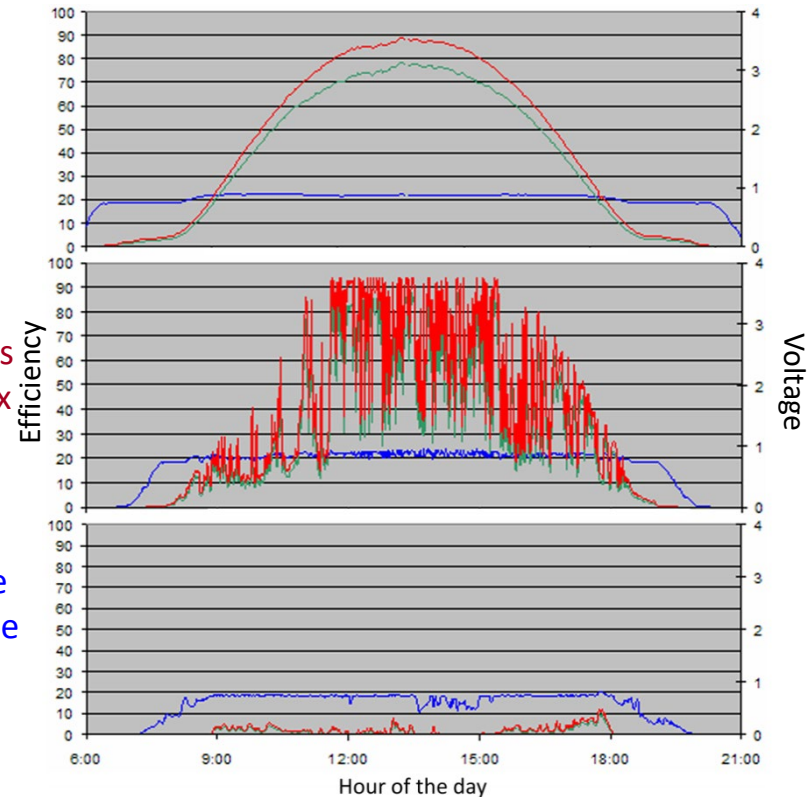


Profile de consommation journalière d'électricité en France (Source : RTE)

Plein soleil

Passages nuageux

Journée pluvieuse

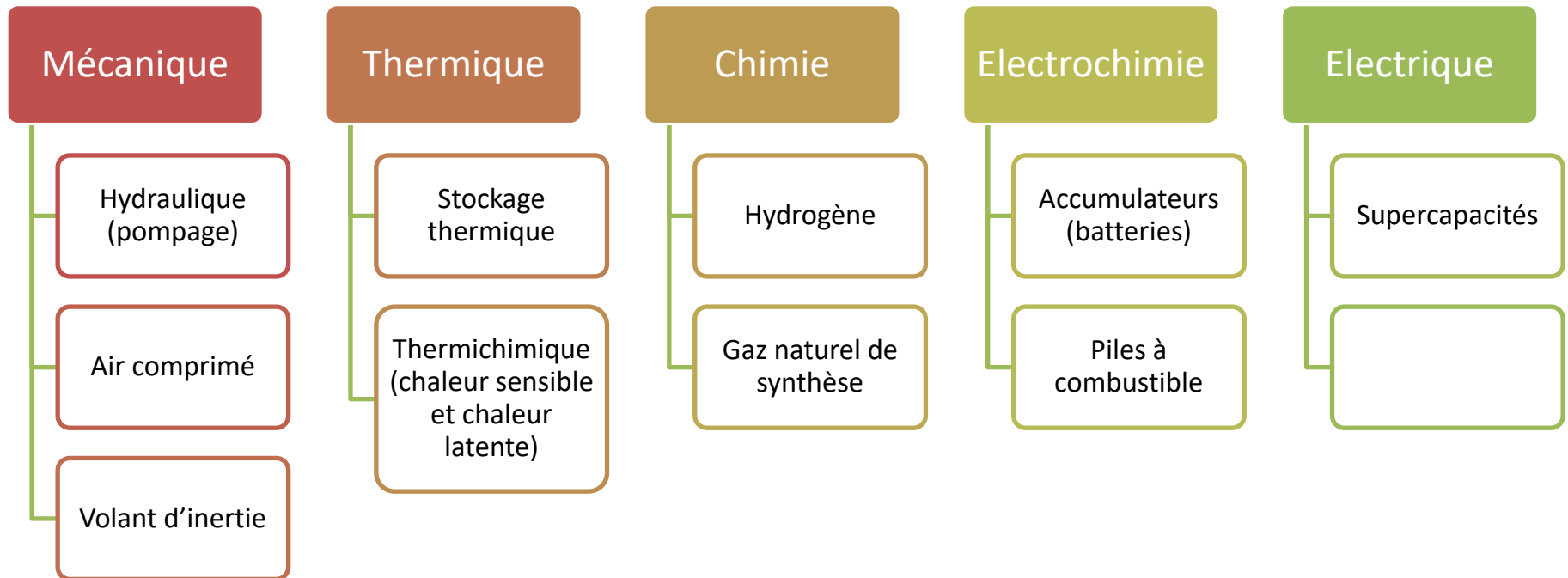


Profils photovoltaïques réels

- Enjeux et problèmes :
 - Sources renouvelables intermittentes
 - Différence entre périodes de production et de consommation.
 - Nécessité du stockage pour stabiliser le réseau électrique

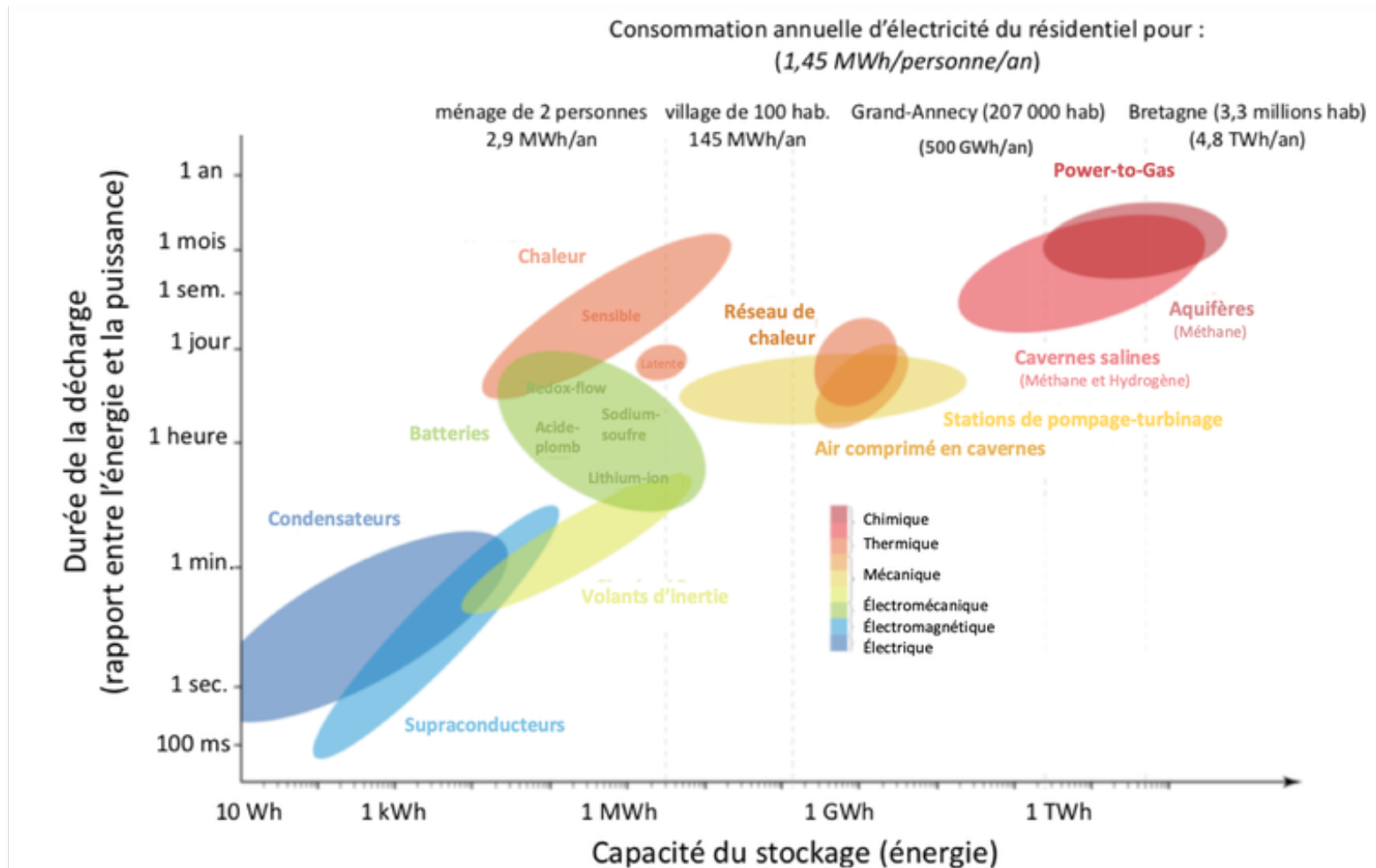
Pourquoi le stockage de l'énergie est essentiel

- Les solutions de stockage de l'énergie



Pourquoi le stockage de l'énergie est essentiel

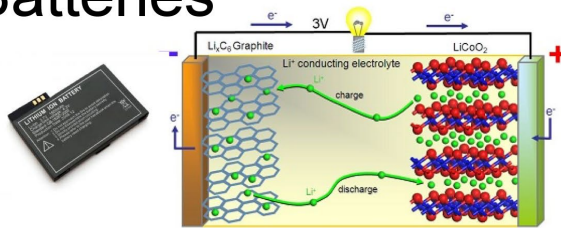
- Les solutions de stockage de l'énergie



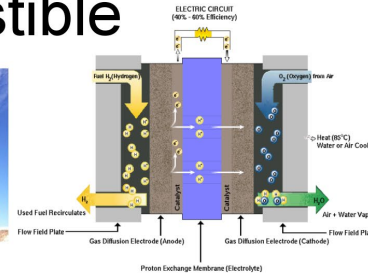
Qu'est-ce que le stockage électrochimique ?

- Définition : conversion réversible d'énergie chimique en énergie électrique.

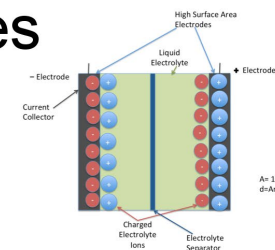
Batteries



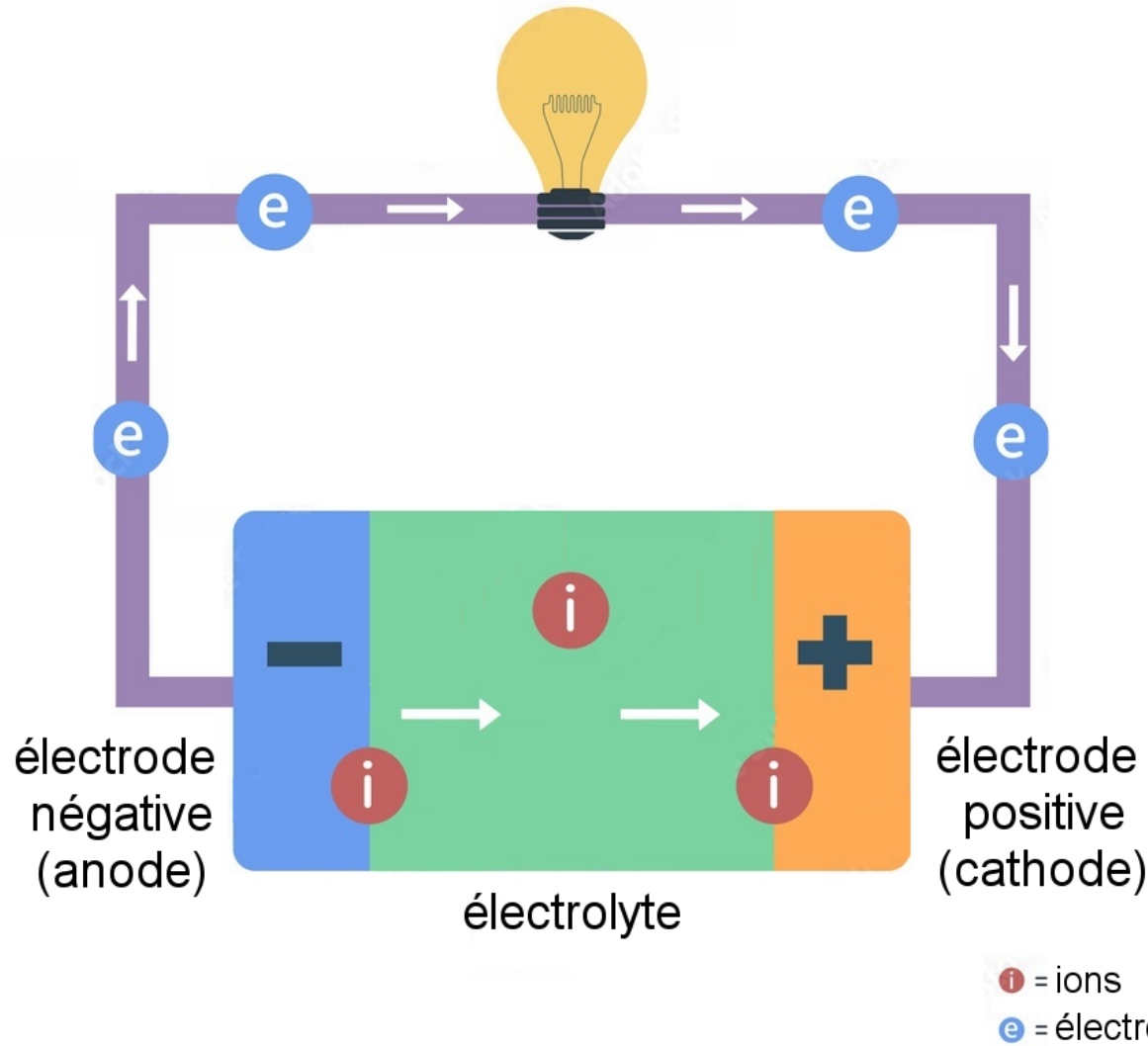
Piles à combustible



Supercapacités

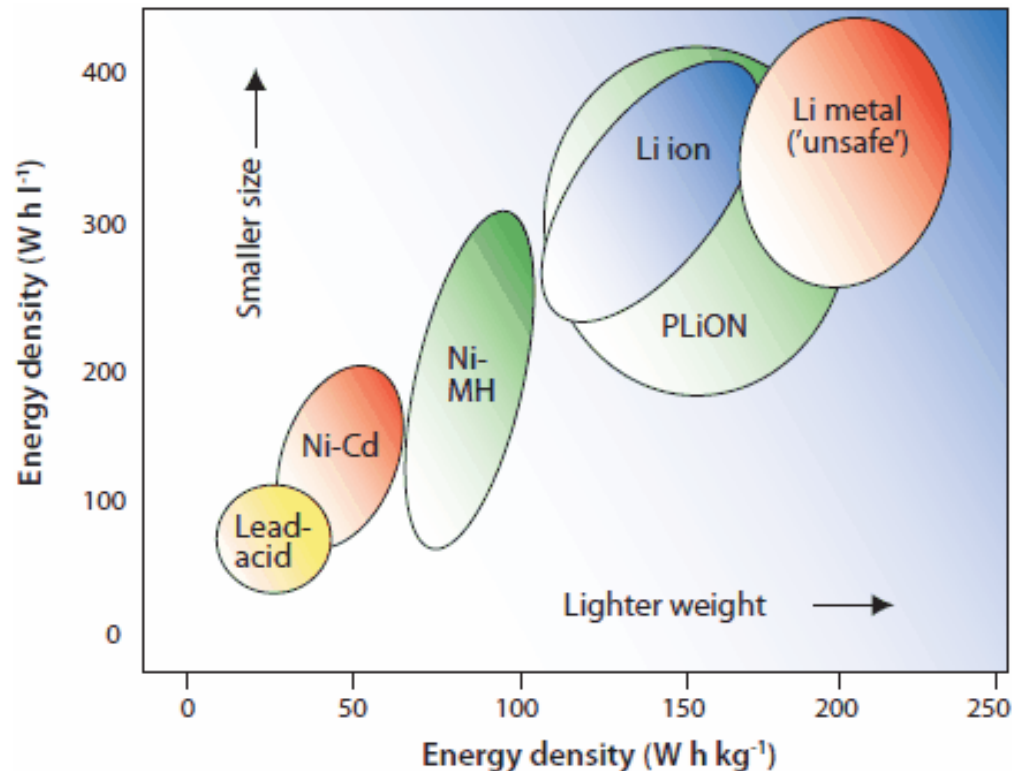


Principe de fonctionnement d'une batterie



Types de batteries actuelles

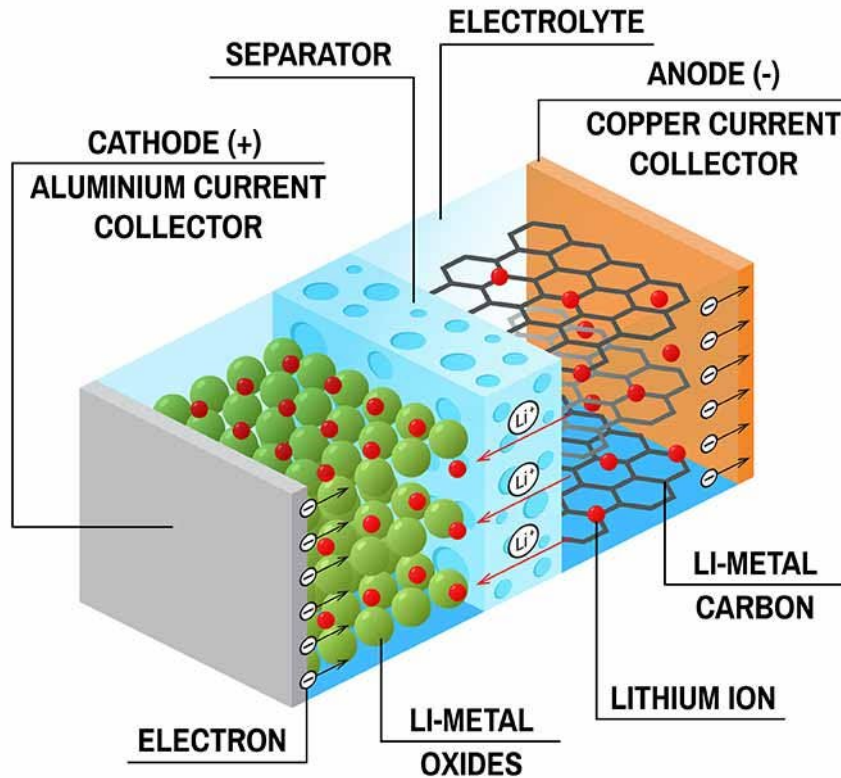
- Batteries lithium-ion (technologie aujourd'hui dominante).



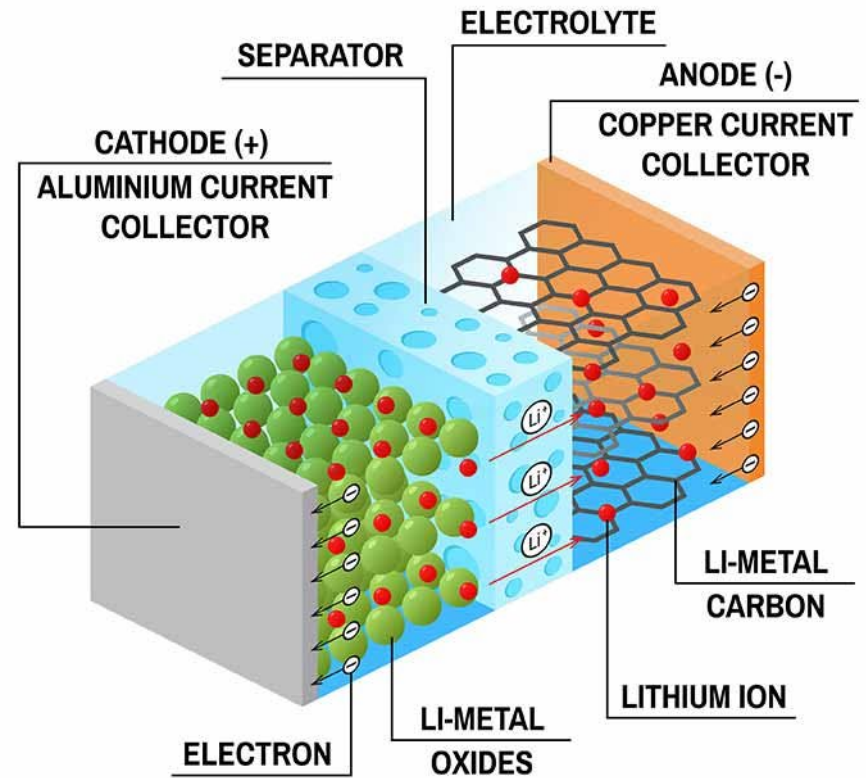
- Autres types de batteries (plomb-acide, batteries à flux, sodium-soufre, etc.)

Représentation « classique » d'une batterie Li-ion

DISCHARGE

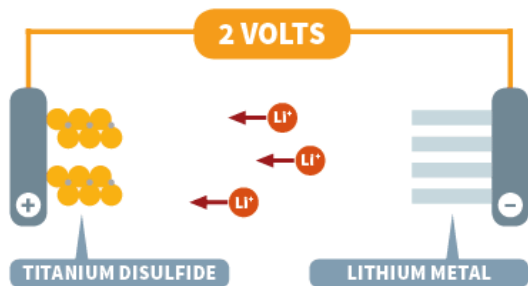
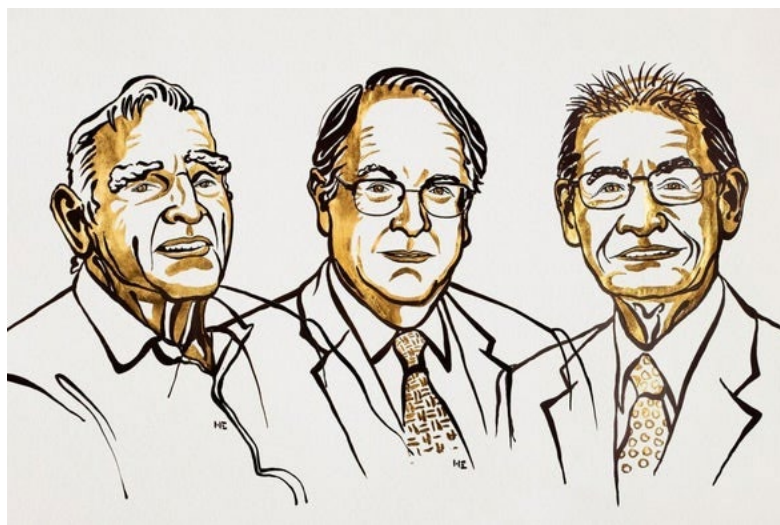


CHARGE

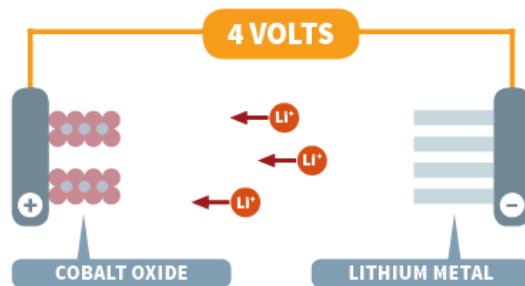


- Mécanisme « chaise à bascule » (rocking chair)

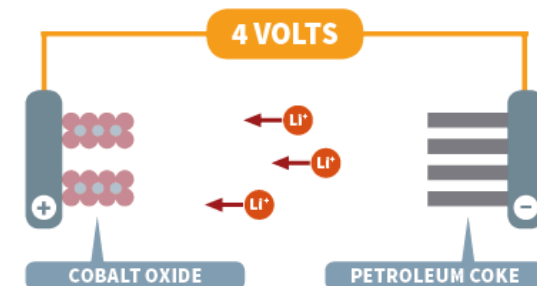
Prix Nobel de Chimie 2019



In the 1970s, **Whittingham** created the first functional lithium battery with a titanium disulfide cathode and lithium metal anode. The lithium metal made it explosive and unsafe.

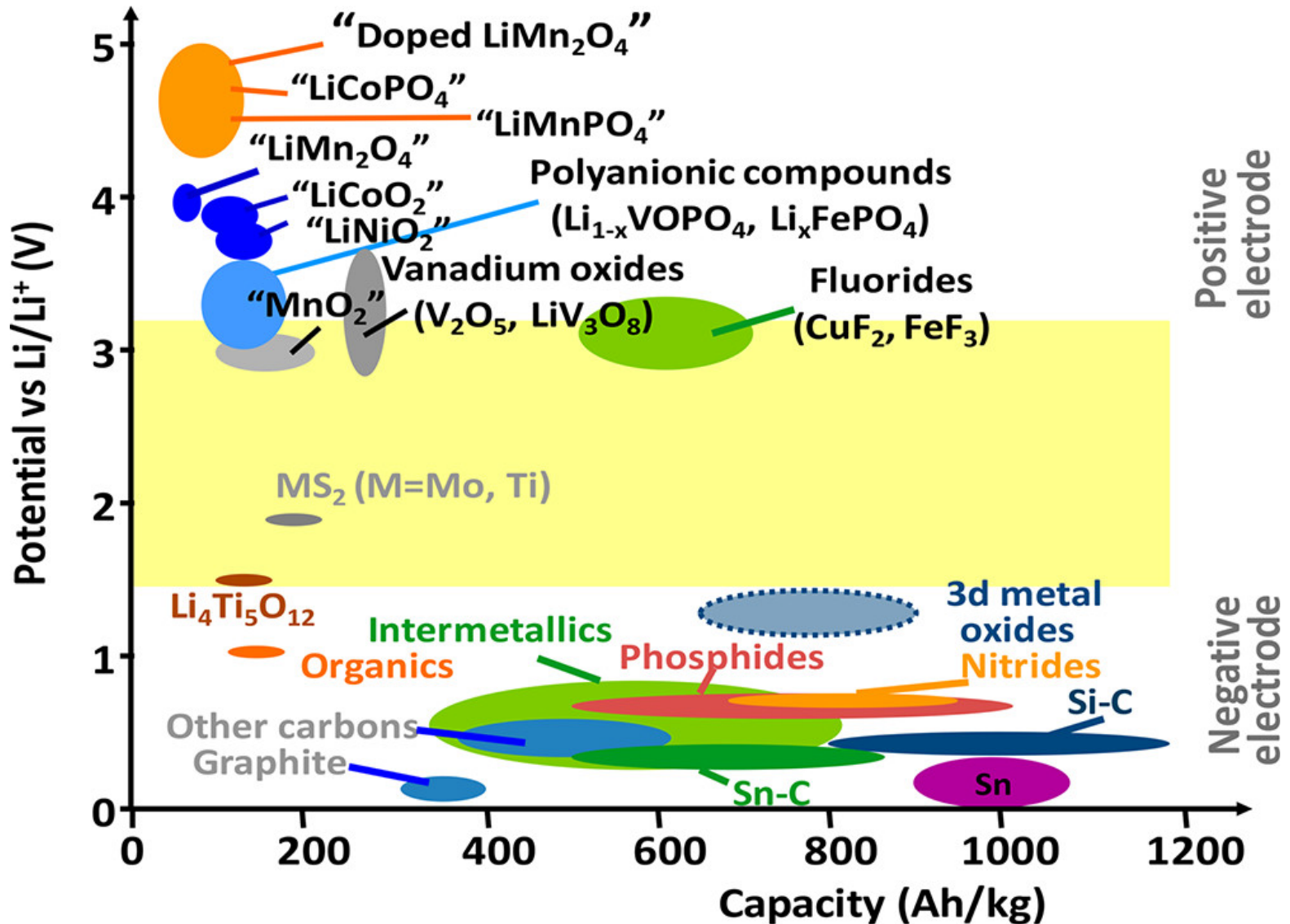


In the 1980s, **Goodenough** used a cobalt oxide cathode instead of a metal sulfide. This doubled the battery's voltage, but it still contained lithium metal in the anode.

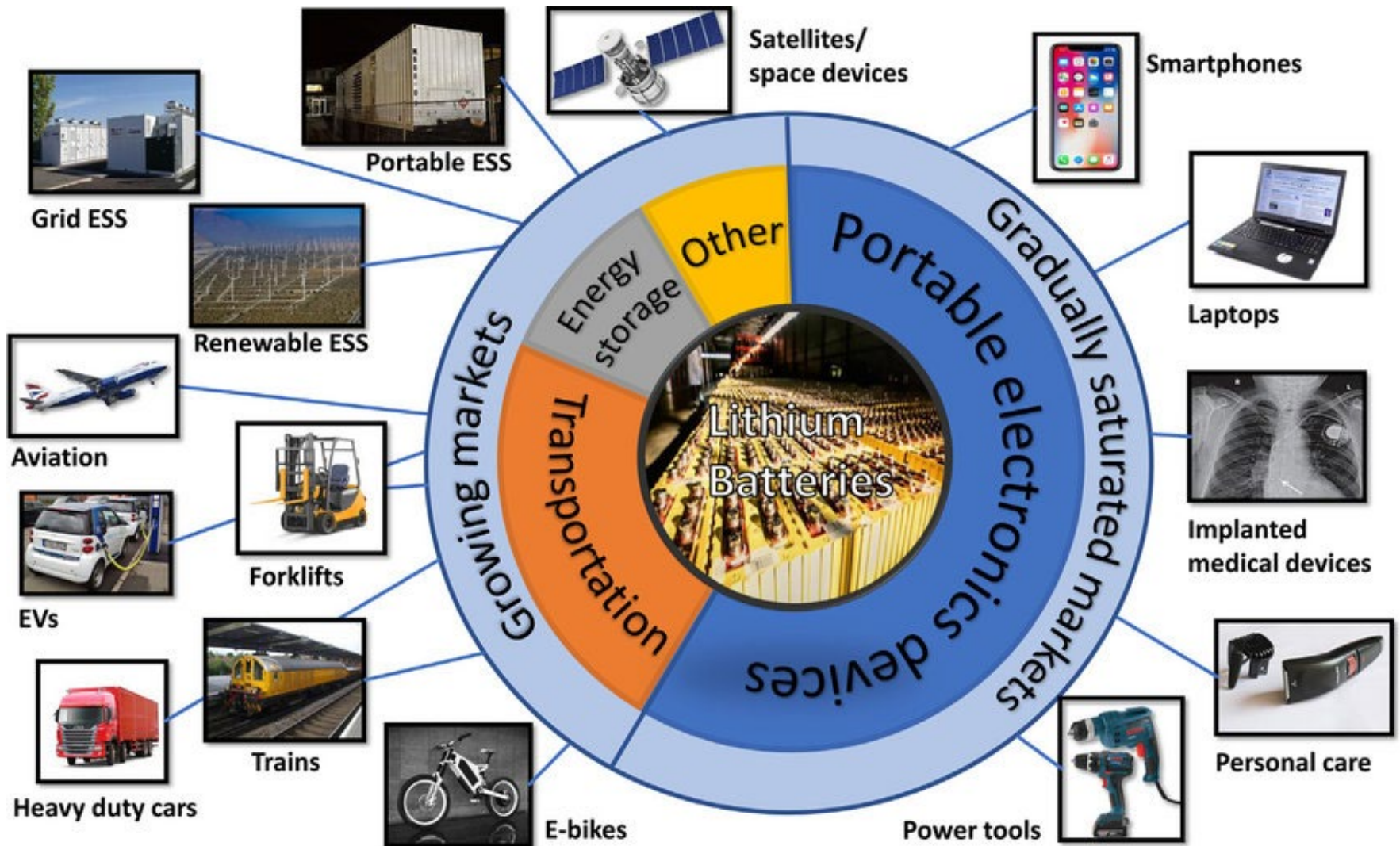


Yoshino replaced the lithium metal anode with petroleum coke, a carbon-based by-product from the oil industry. This led to commercial lithium-ion batteries in 1991.

Li-ion batteries



Le rôle des batteries dans la transition énergétique



Avantages et limites des technologies Li-ion

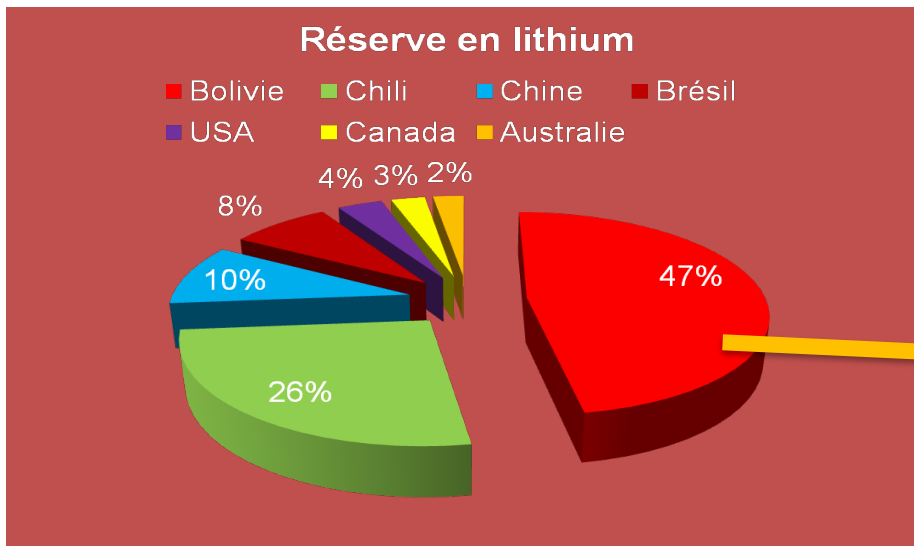
- Avantages du lithium :
 - Très léger → capacité massique élevée ($Q = 3870 \text{ Ah / kg}$)
 - Nature très réductrice (potentiel redox $E = -3.05 \text{ V}$) → idéal pour cellule à haut voltage

$$\text{ENERGIE} = \text{VOLTAGE} \times \text{CAPACITÉ}$$

- Grande richesse de systèmes chimiques disponibles
 - Grande variation possible du potentiel de fonctionnement
 - Adaptabilité de la chimie au besoin
- Longue durée de vie ($> 10 \text{ ans}$)
- Sécurité

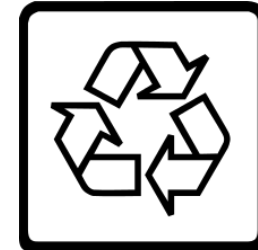
Avantages et limites des technologies Li-ion

- Limites :
 - Ressources
 - Abondance : 25^{ème} élément le plus abondant sur terre (20-70 ppm)
 - Principalement dans l'eau de mer :
 - 230 milliards de tonnes, mais en faible concentration (<1 ppm)
 - Réserves riches en lithium estimées : ~30.000.000 tonnes
 - Production annuelle en lithium métal : ~30.000 tonnes



Avantages et limites des technologies Li-ion

- Limites :
 - Recyclabilité
 - 3500 à 4000 tonnes/an de déchets Li-ion (50% de métal à recycler)
 - 3 voies principales de recyclage :
 - « Second life »: régénération des cellules ou de composantes (électrodes)
 - Destruction avec récupération uniquement des métaux de valeur
 - Valorisation avec récupération de tous les métaux et des électrolytes (sels).
 - Motivations du recyclage
 - Aspect économique
 - Motivation écologique
 - Aspect règlementaire (EU)



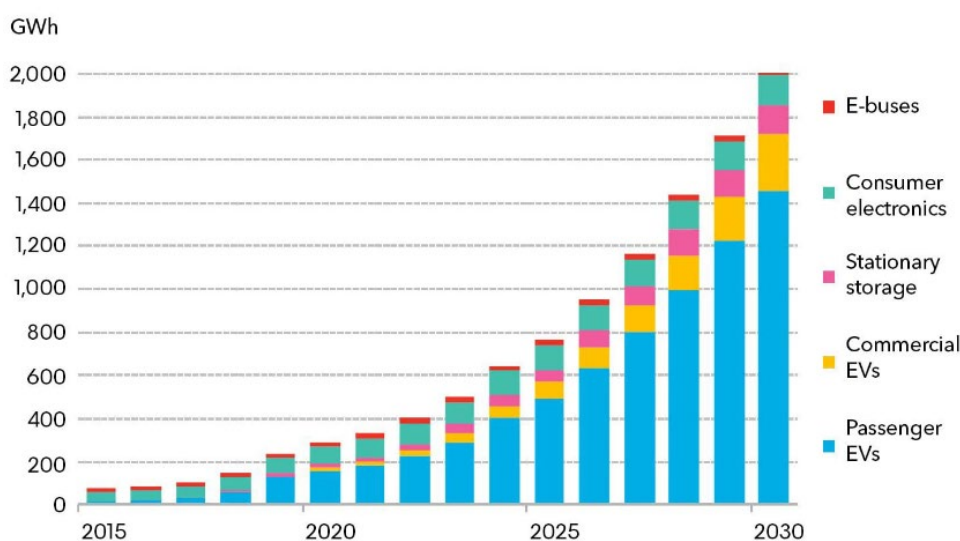
Li-ion



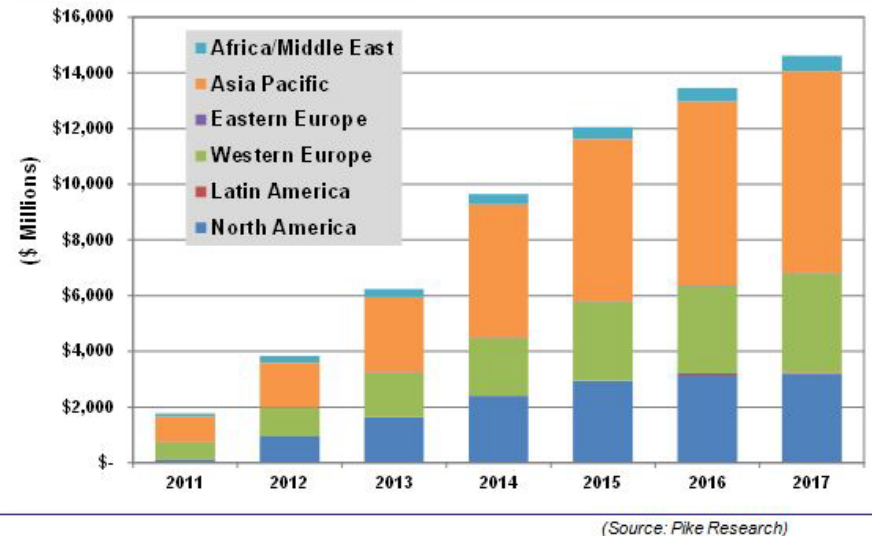
Les ressources en Lithium

- Exemple : le marché automobile
 - Si tout le marché actuel de 60 millions de véhicules basculait en électrique avec 3 kg de lithium, les réserves riches en lithium assureraient 80 ans de production
 - Le recyclage du lithium permettrait d'accroître ces chiffres
 - Alternative : utilisation d'autres technologies (e.g., piles à combustible)

Annual lithium-ion battery demand



Lithium Ion Transportation Battery Revenue, World Markets: 2011-2017



La stratégie batteries en France et en Europe

- Plan européen de réindustrialisation
 - 2017 : l'UE lance l'Alliance européenne pour les batteries
 - 2018 : 1^{er} Plan Batterie national.
 - Implanter à court-terme des gigafactories sur le territoire, en maintenant l'effort de R&D
 - 2018 : déclaration pour créer une filière franco-allemande des batteries.
 - Deux « Projets Importants d'Intérêt Européen Commun » (PIIEC) seront autorisés en 2019 et 2021

3 enjeux stratégiques

Environnemental : réduire les émissions de CO₂ des transports, en lien avec la réglementation européenne

Economique : garder le contrôle de ~40% de la valeur ajoutée des véhicules électriques

Souveraineté : localiser la production des cellules et des segments amont/aval

Les PIIEC batteries : première étape majeure

IPCEI on Batteries

RAW MATERIALS AND ADVANCED MATERIALS	CELLS/MODULES	BATTERY SYSTEMS	REPURPOSING, RECYCLING AND REFINING
BASF	ACC	BMW	BASF
ENERIS	BMW	ENDURANCE	ELEMENTAL STRATEGIC METALS
KELIBER	ENDURANCE	ENEL X S.R.L.	ENDURANCE
NANOCYL	ENERIS	ENERIS	ENERIS
SOLVAY	FAAM	FLASH BATTERY SRL	FAAM
TERRAFAME	SEEL SWEDISH ELECTRIC TRANSPORT LABORATORY	SEEL SWEDISH ELECTRIC TRANSPORT LABORATORY	FORTUM RECYCLING & WASTE
UMICORE AG & CO. KG	VARTA		SEEL SWEDISH ELECTRIC TRANSPORT LABORATORY
			UMICORE AG & CO. KG

EuBatIn

RAW AND ADVANCED MATERIALS	BATTERY CELLS	BATTERY SYSTEMS	RECYCLING AND SUSTAINABILITY
ACI SYSTEMS	ALUMINA SYSTEMS	ACI SYSTEMS	BOREALIS
ARKEMA	BMW	ALUMINA SYSTEMS	ENEL X
BOREALIS	CELLFORCE GROUP	AVL	ENGITEC
FERROGLOBE	ELRINGKLINGER	BMW	FORTUM
FLUORSID	FCA	ENDURANCE	HYDROMETAL
GREEN ENERGY STORAGE	GREEN ENERGY STORAGE	ENEL X	ITALMATCH CHEMICALS
HYDROMETAL	INOBAT ENERGY	ENERGO-AQUA	KELIBER
ITALMATCH CHEMICALS	MANZ	FCA	LIOFIT
KELIBER	MIDAC	FPT INDUSTRIAL	LITTLE ELECTRIC CAR
SGL CARBON	NORTHVOLT	INOBAT ENERGY	MIDAC
SOLVAY	SGL CARBON	MANZ	SGL CARBON
TOKAI COBEX	SKELETON TECHNOLOGIES	MIBA	VALMET AUTOMOTIVE
VARTA MICRO INNOVATION	SYSTEMS SUNLIGHT	MIDAC	ZTS
	VARTA MICRO INNOVATION	RIMAC AUTOMOBILI	
		ROSENDAHL NEXTROM	
		SKELETON TECHNOLOGIES	
		SYSTEMS SUNLIGHT	
		VALMET AUTOMOTIVE	
		VOLTLABOR	

- 63 projets sur l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries, représentant ~20 M€ de financement public et privé
- Projets français, dont Automotive Cells Company (ACC) et 4 autres projets de développement de matériaux de spécialité pour les batteries (dont 2 pour Solvay)

Le projet de production de batteries ACC

- **Projet pionnier en Europe**
 - Co-entreprise Stellantis, Saft (Total) et Mercedes
 - Site de 34 ha à Billy-Berclau Douvrin, historiquement dédié à la production de moteurs thermiques. Gigafactory française inaugurée en mai 2023
 - Production de >40 GWh/an d'ici 2030, destinés à Stellantis et Mercedes, soit ~500 000 véhicules électriques. 2000 emplois d'ici 2030.
 - La France (Etat et collectivités) a accordé 846 M€ d'aide à ce projet dans le cadre du 1^{er} PIIEC sur les batteries



La vision des batteries en France à l'horizon 2030

4 gigafactories

dont la première – ACC – débutera sa production dès 2024

100 à 120 GWh

de capacités de production de batteries installées d'ici 2030

10 000 emplois

directs créés par ces gigafactories d'ici 2030

>900 M€

d'aides de la France dans le cadre des deux PIIEC sur les batteries

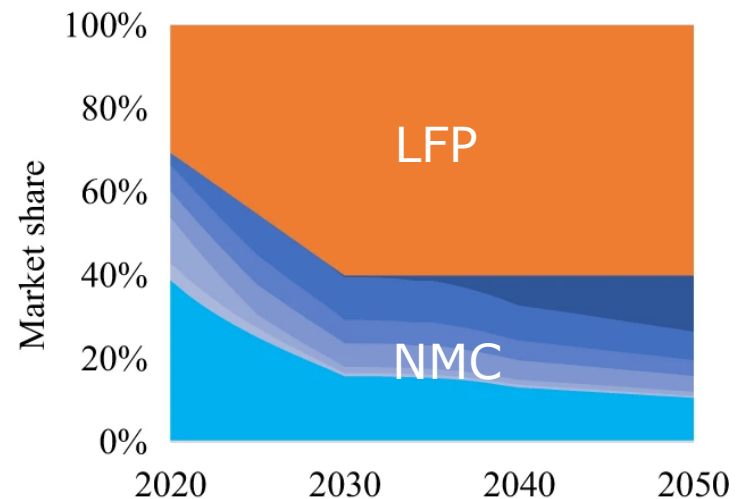
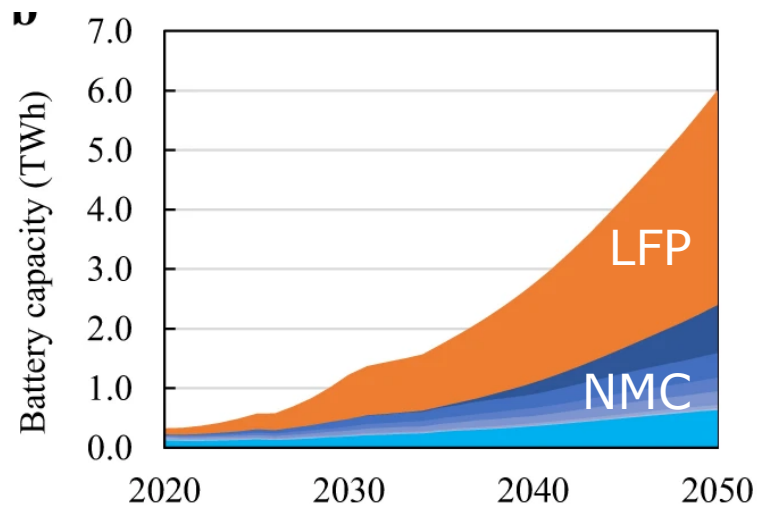
40 projets

soutenus via les dispositifs France 2030, représentant **2,3 Mds€ d'aides** pour **8,2 Mds€ d'investissements** (hors PIIEC)

- Enjeux connexes :
 - Support à la R&D et à l'accélération du transfert des projets d'innovation(PEPR)
 - Formation des travailleurs spécialisés

Alternatives durables aux batteries actuelles

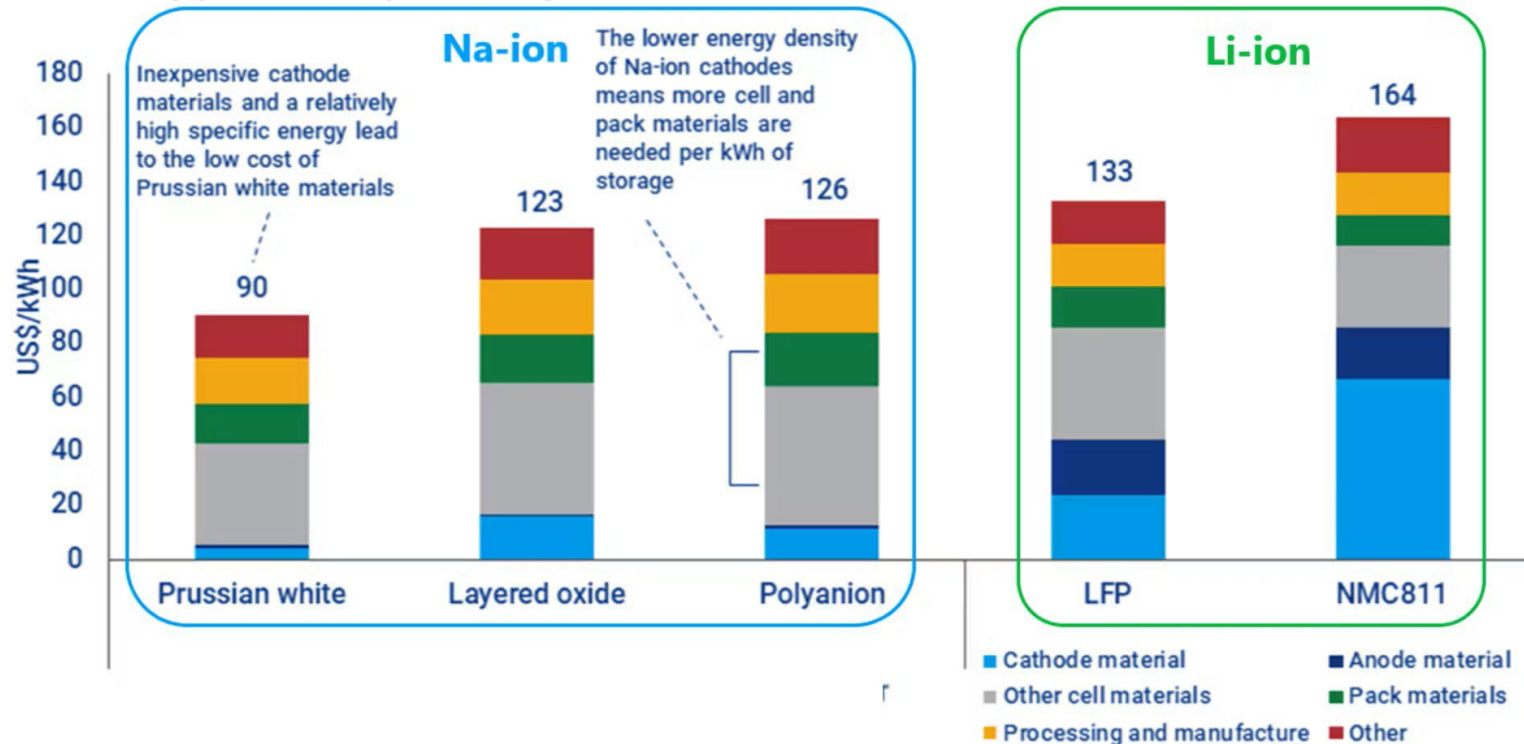
- Elimination de métaux « rares »
 - Cobalt : scandale des mines de coltan au Congo
 - Passage aux chimies mixtes : NMC (cobalt remplacé jusqu'à 90 % par nickel et manganèse)
 - Chimies cobalt-free : LiFePO_4 (LFP)
 - Cout plus faible
 - Meilleure durée de vie
 - Sécurité améliorée
 - Performances énergétiques légèrement inférieures



Alternatives durables aux batteries actuelles

- Chimies alternatives au lithium
 - Batteries au sodium
 - Fonctionnement globalement identique, avec Na^+ qui remplace Li^+
 - Performances inférieures
 - Plus économiques

2022 battery pack costs by chemistry



Batteries au sodium

- Plusieurs projets industriels en cours

Tiamat Energy, France



Présentation

Tiamat Energy, basée à Amiens, conçoit, développe et fabrique des batteries sodium-ion de haute puissance pour la mobilité, l'électroportatif et le stockage stationnaire d'énergie. Une chimie disruptive pour répondre à des besoins partiellement couverts par les technologies de référence.

Tiamat Energy, de la recherche à l'industrialisation

HiNa Battery Technology Co, China

HiNa Battery was founded in 2017.



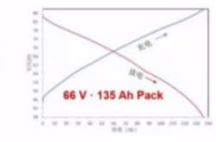
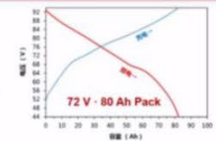
Materials and cell pilot production lines



> 200,000 Ah-level cells



The first mini-car powered by Na-ion battery pack in 2018



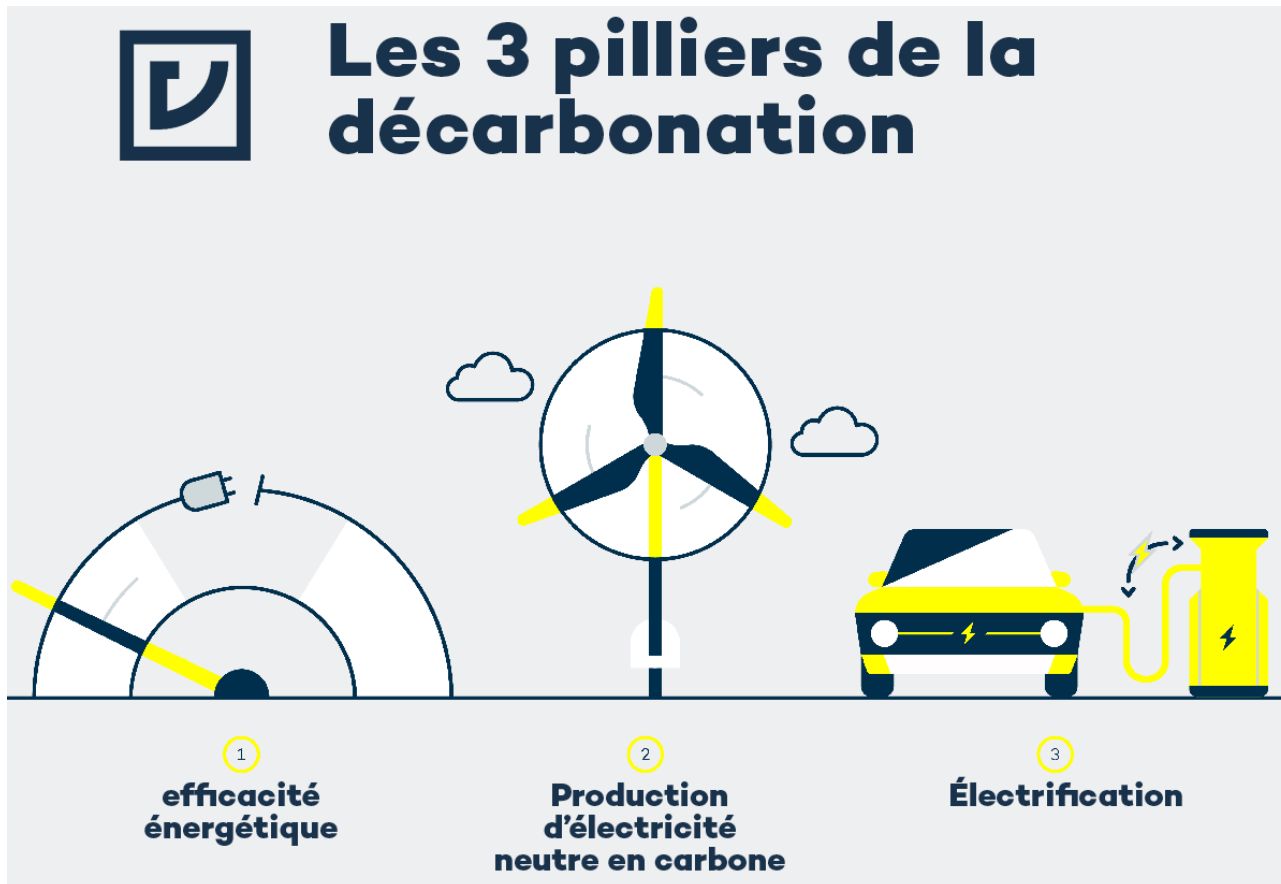
Obstacles à l'adoption massive des batteries

- Pour les voitures électriques (malgré le déploiement inéluctable)
 - Scepticisme face à la technologie (!!!)
 - Faible disponibilité (filière en développement)
 - Autonomie de la batterie (en amélioration)
 - Infrastructures et temps de recharge (en amélioration)
 - Coût des batteries (en diminution)



Mais malgré quelques scepticismes...

- Les batteries sont nécessaires si on veut atteindre la neutralité carbone



Conclusion

- Rôle essentiel des batteries dans la transition énergétique.
- Défis environnementaux et sociaux associés à leur production et utilisation.
- Innovations en cours et nécessité d'un cadre durable.
 - Rôle des gouvernements dans la promotion des batteries : subventions, normes, réglementation environnementale.
 - Politiques incitatives pour le recyclage et la production durable.

Perspectives

- Où allons-nous ?
 - La R&D avance rapidement au niveau de toute la chaîne de valeurs des batteries (du matériau au recyclage)
 - Mise en œuvre de nouvelles technologies.
- Tous les acteurs (chercheurs, décideurs, industriels) ont un rôle clé dans l'accélération de la transition écologique via le stockage électrochimique.

R&D

Matières
premières

Production

Intégration

Réparation

Recyclage

CHEMISTRY: MOLECULES TO MATERIALS