



Les batteries, composants clés de la mobilité électrique

C. Midler

Directeur de Recherche CNRS émérite

Centre de recherche en Gestion I³ CNRS Ecole Polytechnique IPParis

Membre de l'Académie des Technologies

Sommaire

- 1. Rappel : Pourquoi le véhicule électrique à batterie ?**
- 2. C'est quoi une batterie ?**
- 3. C'est quoi une usine de batteries ? Une visite virtuelle**
- 4. C'est quoi les enjeux et la dynamique future des technologies de batteries ?**
- 5. En conclusion, que faire ?**

L'urgence

Émissions mondiales nettes actuelles:

42 GtCO₂/ an

« Crédit » pour rester sous +1,5°C :

500 GtCO₂eq

Source: 6^{ème} rapport du GIEC

Être à zéro émissions nettes en 2050

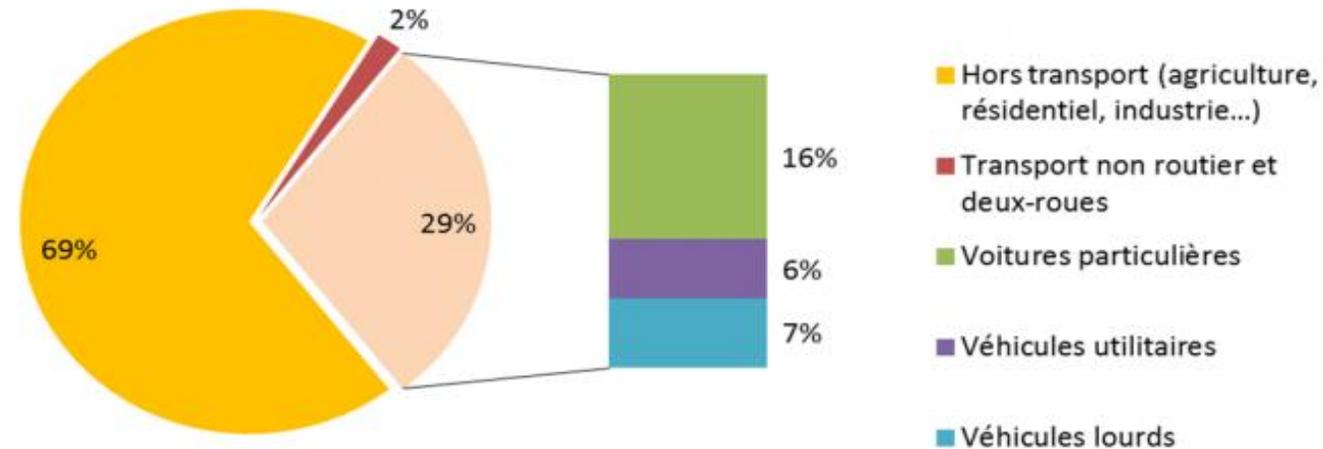
et émettre moins de 500 GtCO₂eq

d'ici là



Le véhicule thermique, source majeure d'émissions CO2 (et autres)

Répartition des émissions nationales de gaz à effet de serre



- **2019 parc auto mondial** : 2 milliards vh, 35 million in France, km annuel moyen 13000km, émissions CO2 parc thermique : 70 MtCO2
- **Inertie de la durée de vie du parc en France : 12 ans => arrêt des ventes de vh thermiques en 2038) => de 2% à 100% de véhicules non polluants en 18 ans...**

Quelles réponses à la décarbonation des mobilités?

1. Télétravail
2. Report modal TC
3. Report modal vélo
4. Mobility as a Service

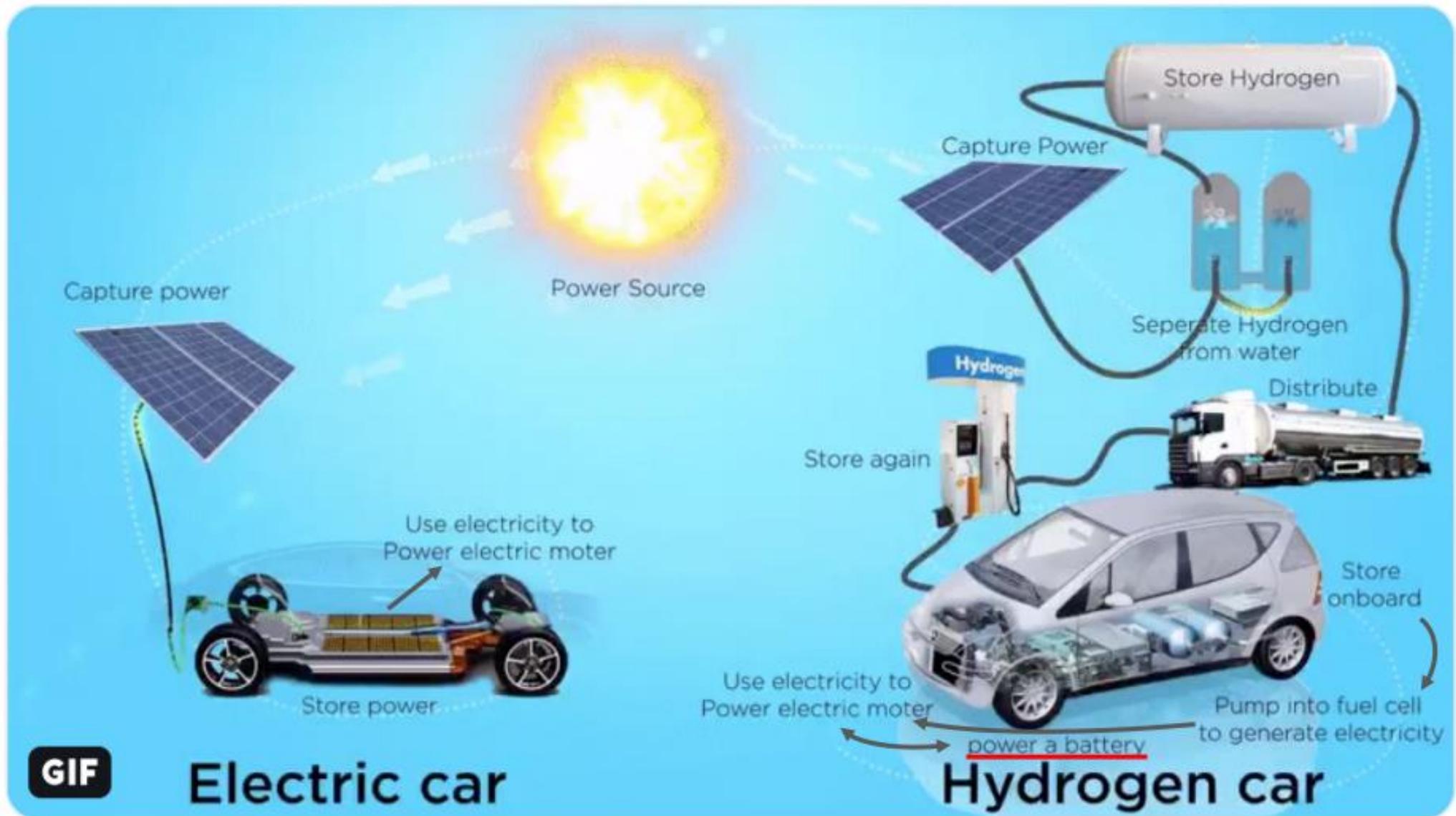
Un ensemble de réponses complémentaires pour une mobilité décarbonée, où la voiture tiendra toujours une place importante.

=> Comment décarboner la mobilité automobile ?

Quelles réponses à la décarbonation des mobilités automobiles?

1. **Electrique stockage H2**
2. **Biocarburants**
3. **Electrique hybride**
4. **Electrique batteries**

Le véhicule à hydrogène : Stockage H2+pile à combustible



LE VEHICULE A HYDROGÈNE : STOCKAGE H2+PILE A COMBUSTIBLE

- Rendement faible (23%)
de l'H2 vert (énergie pour 100km)

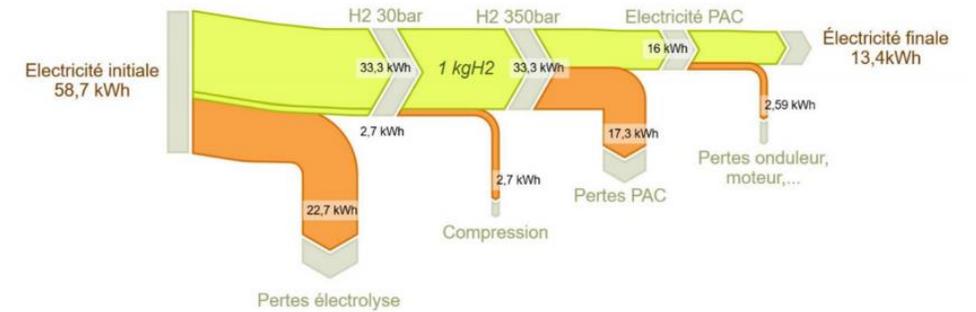


FIGURE 1.3 – Rendement de la chaîne utilisant le dihydrogène comme vecteur énergétique (valeurs pour 1kg d'H₂) - Source : ADEME, 2020

- Distribution, sécurité
- Cout 10 a 15€/km vs 5/8€ pour batterie
- Intrusivité sur l'architecture automobile

TOYOTA Mirai

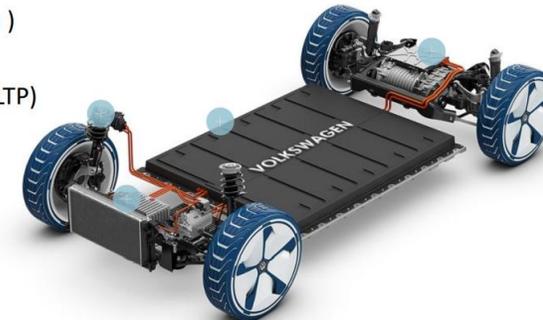
- Autonomie 560km (WLTP) pour 5kg H₂
- 0.94kg par 100km (WLTP)



... seulement acceptable pour des (très) grosses voitures

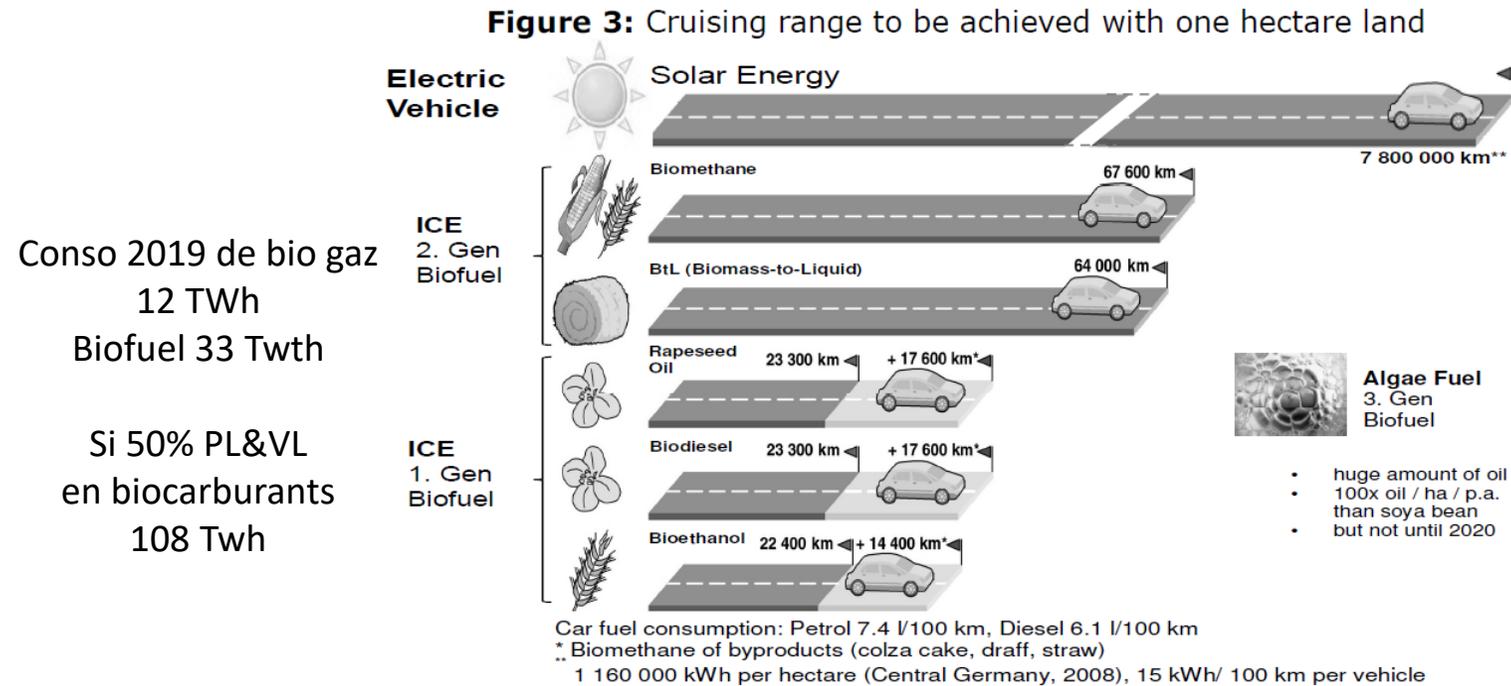
VW ID3 (MEB platform)

- Capacité 48 à 82kW.h
- Autonomie: 550km (WLTP)



...au contraire des plateformes de véh.électriques

LES RÉPONSES : BIOCARBURANTS : UNE SOLUTION LIMITÉE PAR LE RENDEMENT, LES RISQUES DE FUITE DE METHANE ET L'OCCUPATION DES SOLS



Guy Fournier, Henning Hinderer, Daniel Schmid, René Seign, Manuel Baumann (2012): The new mobility paradigm: Transformation of value chain and business models, Enterprise and Work Innovation Studies, 8, IET, pp. 9 - 40.

Solutions potentielles en résumé

Biodiesel :

Biométhane :

**Hybride rechargeable & biocarburant
Électrique-hydrogène avec..**

Vaporéformage du méthane (SMR) :

SMR + Carbon Capture & Sequestration

Électrolyse avec électricité décarbonée

Thermolyse + vapocraquage de la biomasse

Torche à plasma (R&D)

E-fuel

avec H₂ issu d'électrolyse

avec H₂ issu de SMR + CCS

avec H₂ issu de biomasse / torche à plasma

2023-2035

Transition  ?

Transition  ?

Transition 

Transition 

Transition 

Transition 

Transition ?

Transition 

Transition 

Transition 

Transition 

2035-2050

Long terme 

Long terme 

Long terme  ?

Long terme 

Long terme 

Long terme 

Long terme 

Long terme ?

Long terme ?

Long terme ?

Long terme ?

Véhicules électriques : hybrides ou batteries ?

Émissions sur le cycle de vie

Toyota Yaris hybrid

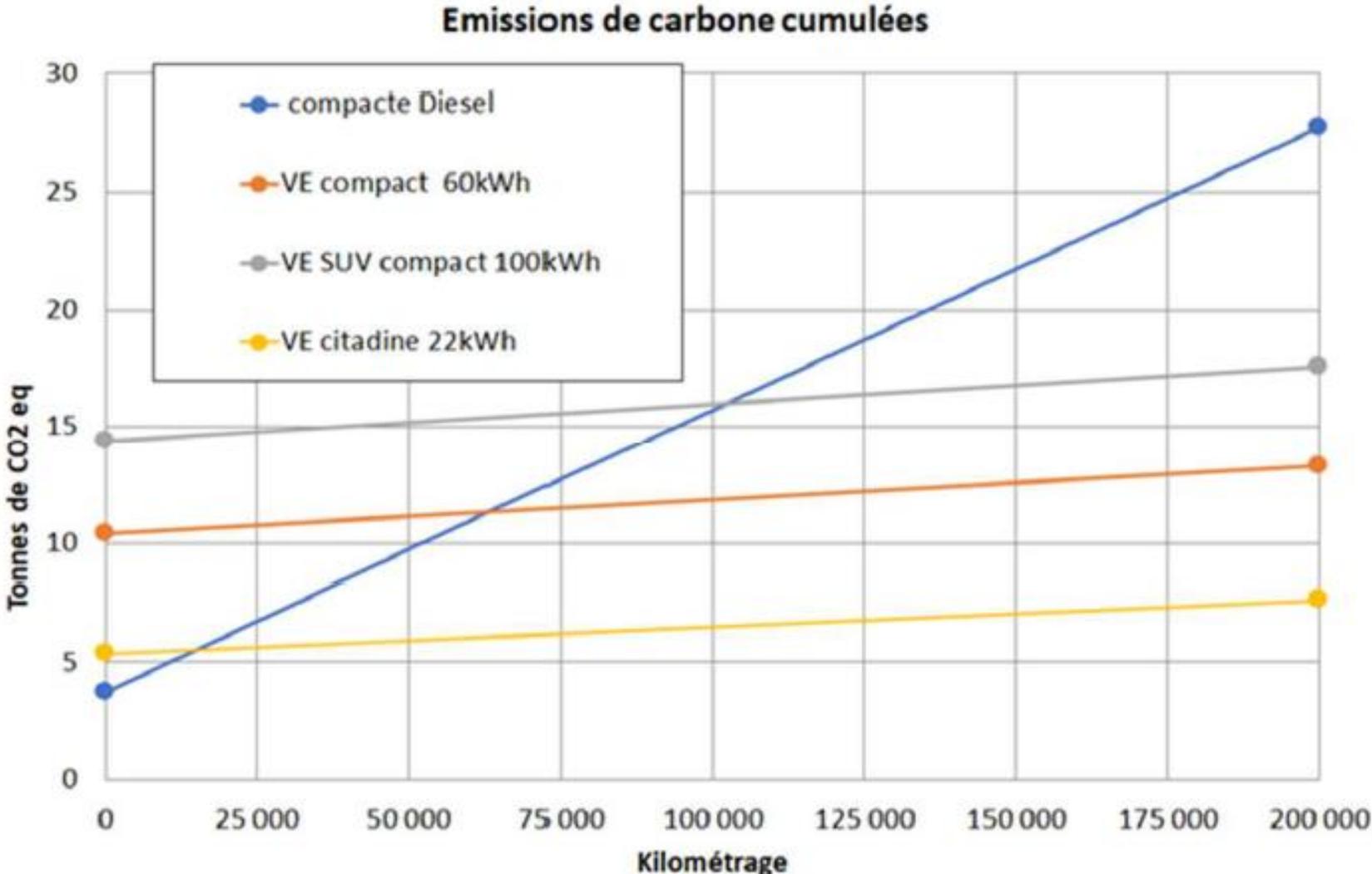
Emissions CO₂ : 87 g / km (WLTP)
 Production-transport of gasoline +
 19% (ADEME)
 Batterie | 1,5 kWh

Renault Zoe

Consumption: 17,2 kWh/100km (WLTP)
 Yield of electricity transport and battery
 charging : 85%
 Batterie : 54 kWh
 Production de la batterie: Europe

	Zoe			Yaris hybride
Battery production:	22 	22 	11 target	≈ 0
Electricity production :	11 	51  2019	20  2030	
Gasoline production and combustion :				17 87
Total en g CO2/km	33	73	31	104

Importance de la puissance des vh et capacités des batteries



Source ADEME 2022

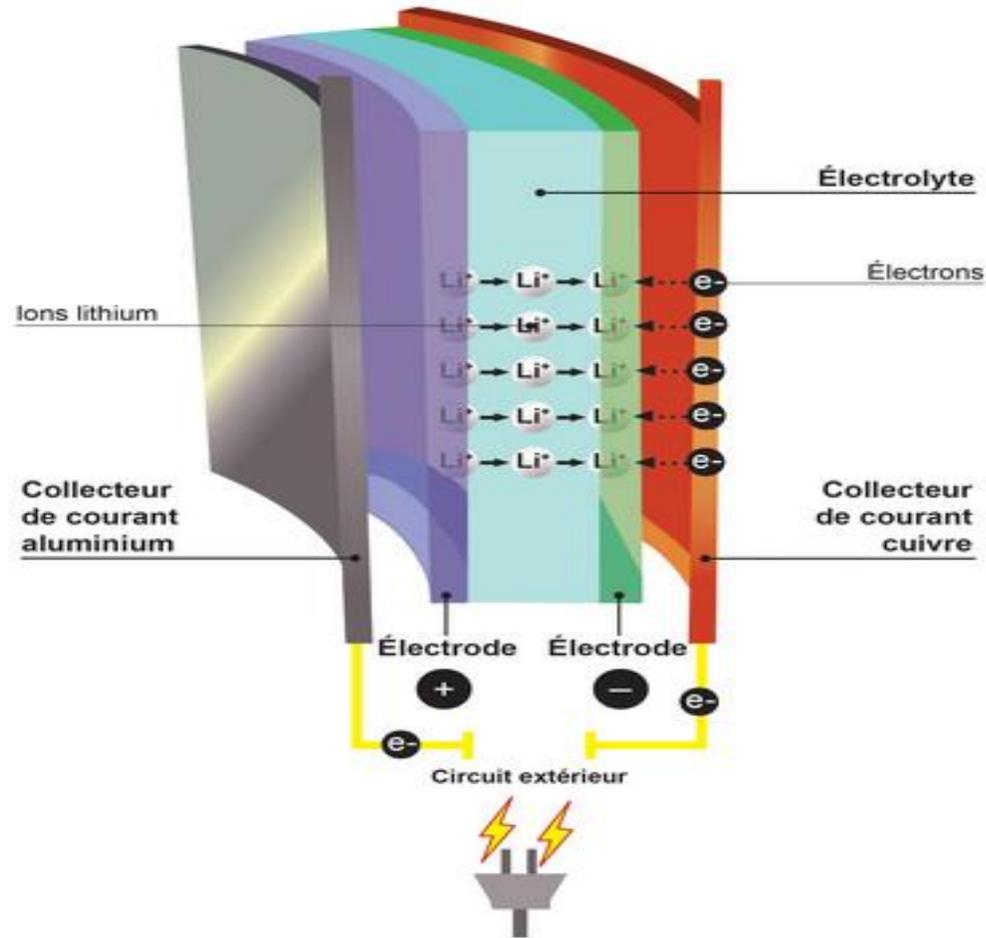


Sommaire

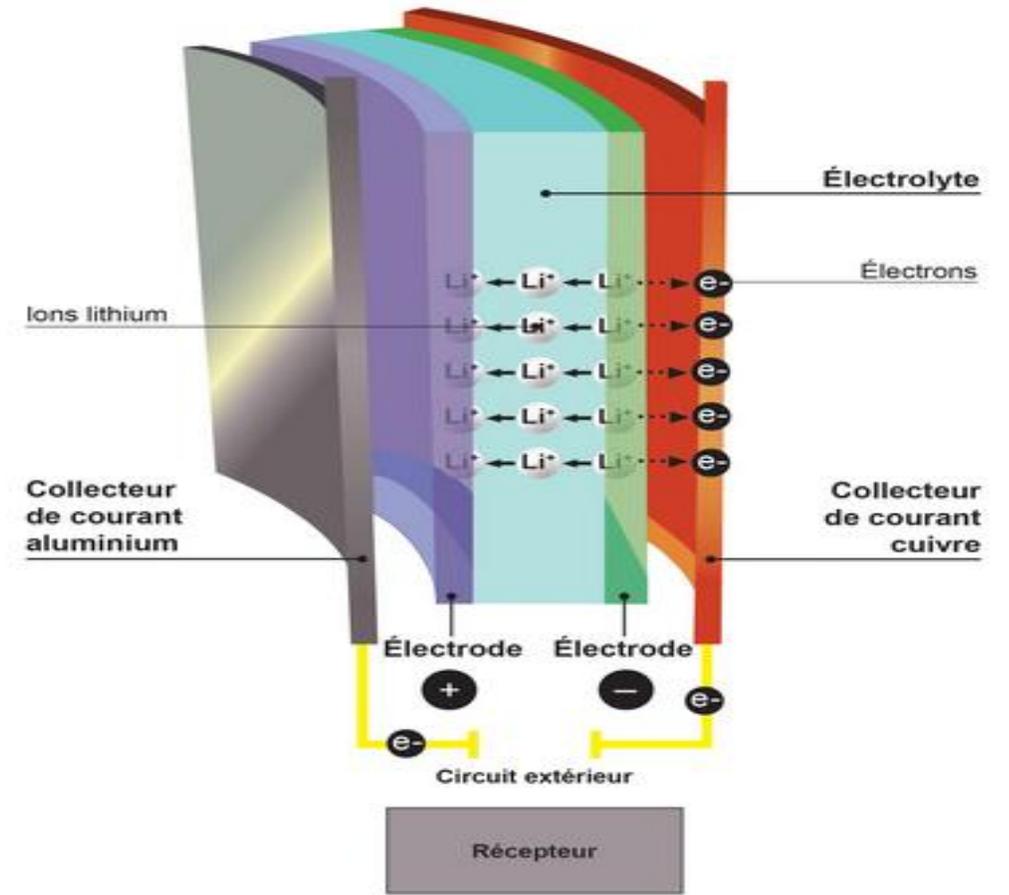
1. Rappel : Pourquoi le véhicule électrique à batterie ?
- 2. C'est quoi une batterie ?**

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE LITHIUM-ION

État de charge



État de décharge

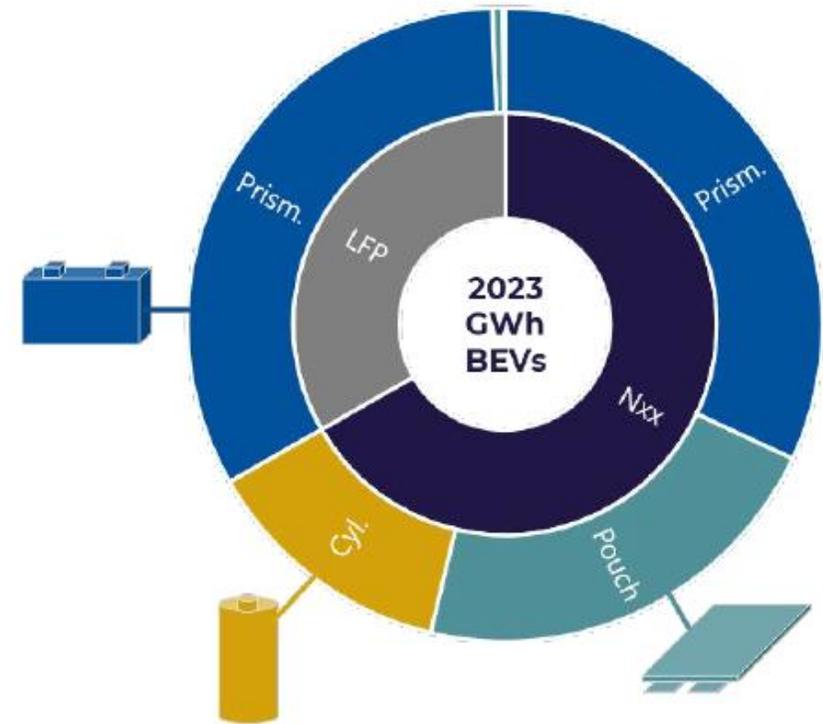


Différents types de batteries Li Ion, chimie et forme :

- NMC (Nickel Manganèse Cobalt),
- LFP (Lithium Fer Phosphate)

	Current/legacy		Long term		
	LFP		LMFP		
	LFP	NMC 8 NCA 9	LMFP	LNMO/NMX	NMC 8
	LFP	NMC 5	LMFP	NMC 8	
	LFP	NMC 5	LMFP	NMC 8	
	LFP	NMC 5/8	LMFP	NMC 8	
	NMC 5/6		LxFP	LMR	NMC 8
	NMC 5/6/8		LxFP	NMX	NMC 8
	NMC 5/6/7		LxFP	LNMO/LMR	NMC 7/8
	NMC 5/6		LxFP	NMX	NMC 6/8
	NMC 5/6/8		LxFP	NMC 8 NCA 9	NMCA 9
	NMC 8 NMCA 9		LxFP	NMC 8 NMCA 9	
	NMC 8/9		LFP	NMC 8/9	
	NMC 6/8		LxFP	NMC 8	
	NMC 8		NMC 9		
	NMC 5/6		NMC 8 NMCA 9		

M n-rich under research
LFP, NMX, LMR under research

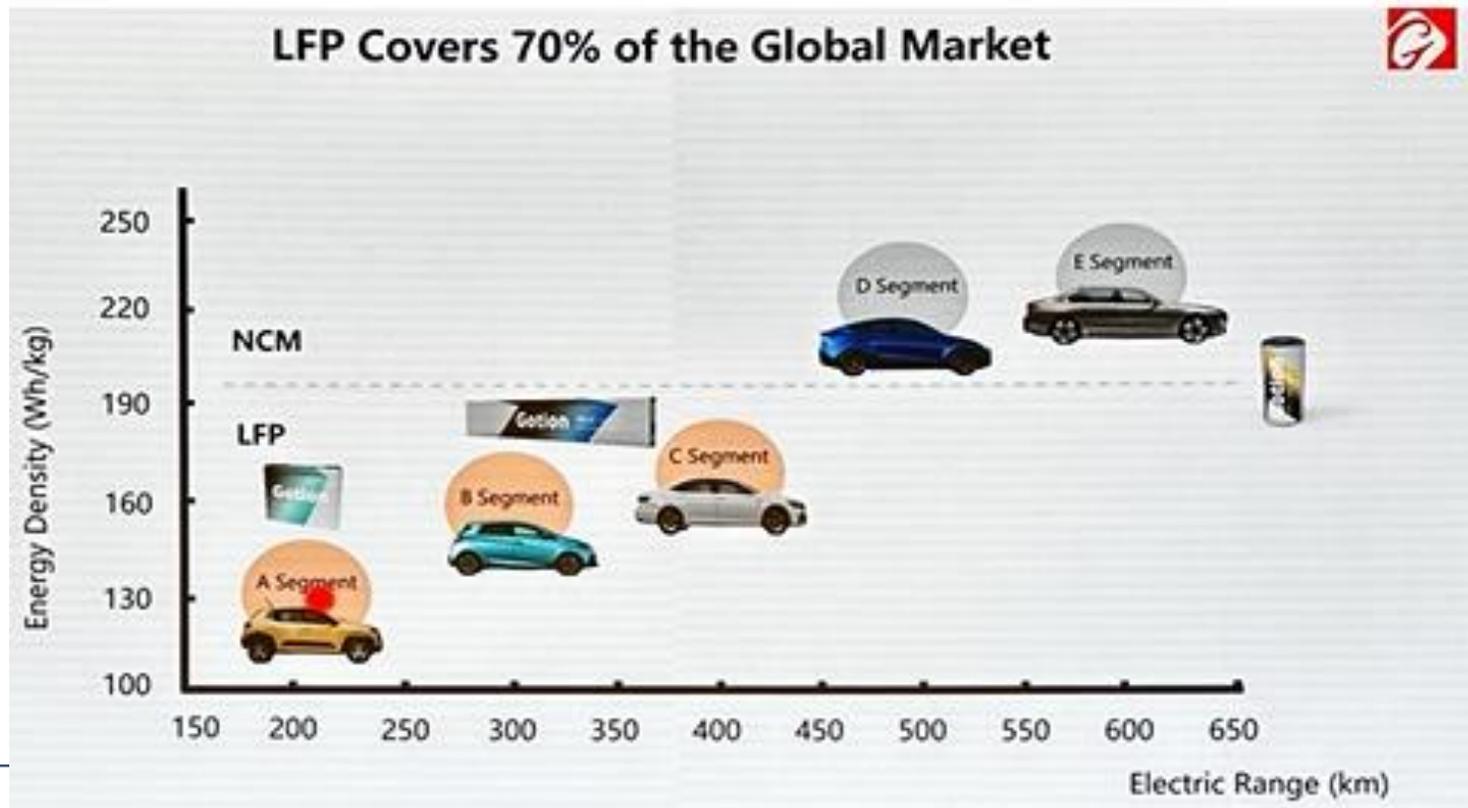
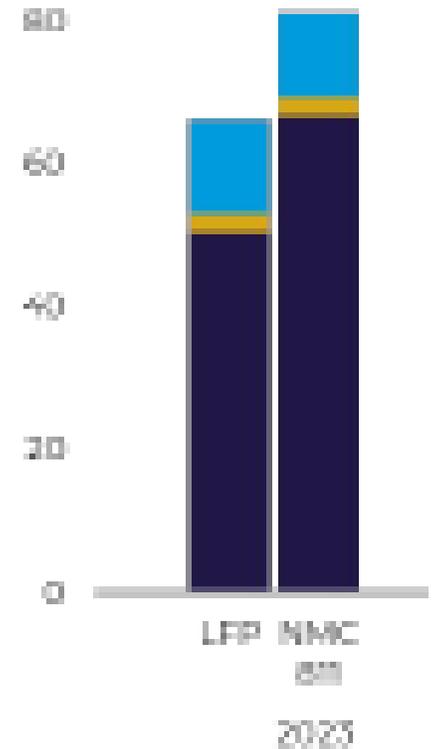


Comparaison des performances

Technologie	Puissance	Prix	Nombre de cycles	Densité d'énergie	Sécurité	Durabilité	Poids
NMC	+++	++	300-800	+++	+	++	+++
LFP	++	++	1500-3000	+	++	+++	++

Cout à la cellule

\$/Kwh



Sommaire

1. Pourquoi le véhicule a batterie ?
2. C'est quoi les batteries actuelles ?
- 3. C'est quoi une usine de batterie ?**

Une visite virtuelle d'une gigafactory

La Gigafactory de Billy-Berclau

Construction et mise en service de trois blocs
entre 2022 et 2030

Capacité de production de 15 GWh par bloc

Capacité en 2030 : 45 GWh

2.000 employés à horizon 2030

Une Gigafactory ancrée dans son territoire

Un investissement majeur : Capex 1GWh/a 100 M€



Une visite virtuelle d'une gigafactory

Des dimensions exceptionnelles

Le bloc 1, c'est

- 644 mètres de longueur
- 100 mètres de largeur
- Jusqu'à 35 mètres de hauteur, un immeuble de dix étages

- Soit huit terrains de football
- Soit deux Tour Eiffel couchées sans se toucher
- Soit 160 Peugeot e-208 garées les unes derrière les autres dans le couloir logistique.

ncc | Gigafactory
Bilby-Berclau Douvrin



- Un investissement majeur 1 Gwh/a coûte de 50 à 100 M€ de CAPEX

Une visite virtuelle d'une gigafactory



ACC
AUTOMOTIVE CELLS C

MÉLANGE DES ENCRE

Les produits nécessaires à la préparation des encres (poudre de métaux actifs, additifs et solvants) sont introduits dans les mélangeurs dédiés, destinés soit à la fabrication d'encre pour les électrodes positives (cathodes) soit à la fabrication d'encre pour les électrodes négatives (anodes).



MÉLANGE DES ENCRE

ENDUCTION

CALANDRAGE

ENCOCHAGE

Une image contenant texte, capture d'écran, conception
Description générée automatiquement

ASSEMBLAGE DES CELLULES

1^{ER} ETUVAGE / REMPLISSAGE

TRAITEMENT ÉLECTRIQUE

2^{ME} ETUVAGE / REMPLISSAGE

TRAITEMENT ÉLECTRIQUE

ASSEMBLAGE DU MODULE

(Part 1)

(Part 2)

MÉLANGE DES ENCRE

ENDUCTION

CALANDRAGE

ENCOCHAGE

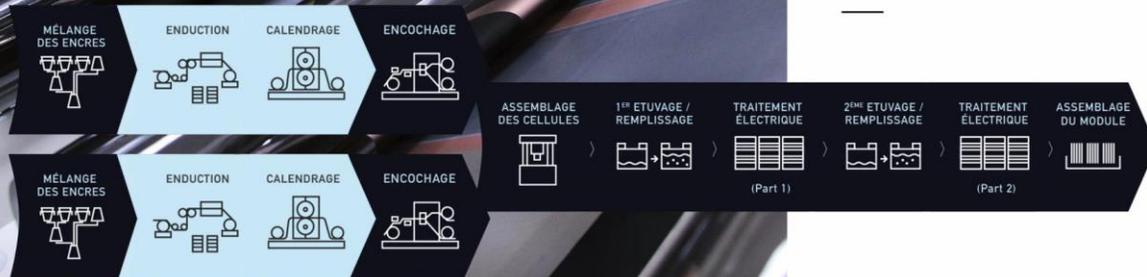
Une visite virtuelle d'une gigafactory



ENDUCTION CALANDRAGE

L'encre est appliquée sur un feuilard d'aluminium pour la cathode, et sur un feuilard de cuivre pour l'anode. Les feuilards enduits sont introduits dans un four de séchage afin d'évaporer les solvants et / ou l'eau.

Les deux faces du feuilard sont enduites en continu. Lors du calandrage, la feuille de cuivre ou d'aluminium revêtu sur les deux faces est comprimée par des rouleaux en rotation. Les rouleaux génèrent une pression linéaire définie avec précision ce qui permet de donner l'épaisseur et la porosité choisie aux bandes.



Une visite virtuelle d'une gigafactory

Coating enduction



Une visite virtuelle d'une gigafactory



ENCOCHAGE

Les bobines sont encochées sur leur bordure afin de détourner les oreilles de chaque électrode. La bande est refendue sur son axe afin de lui donner la largeur souhaitée.



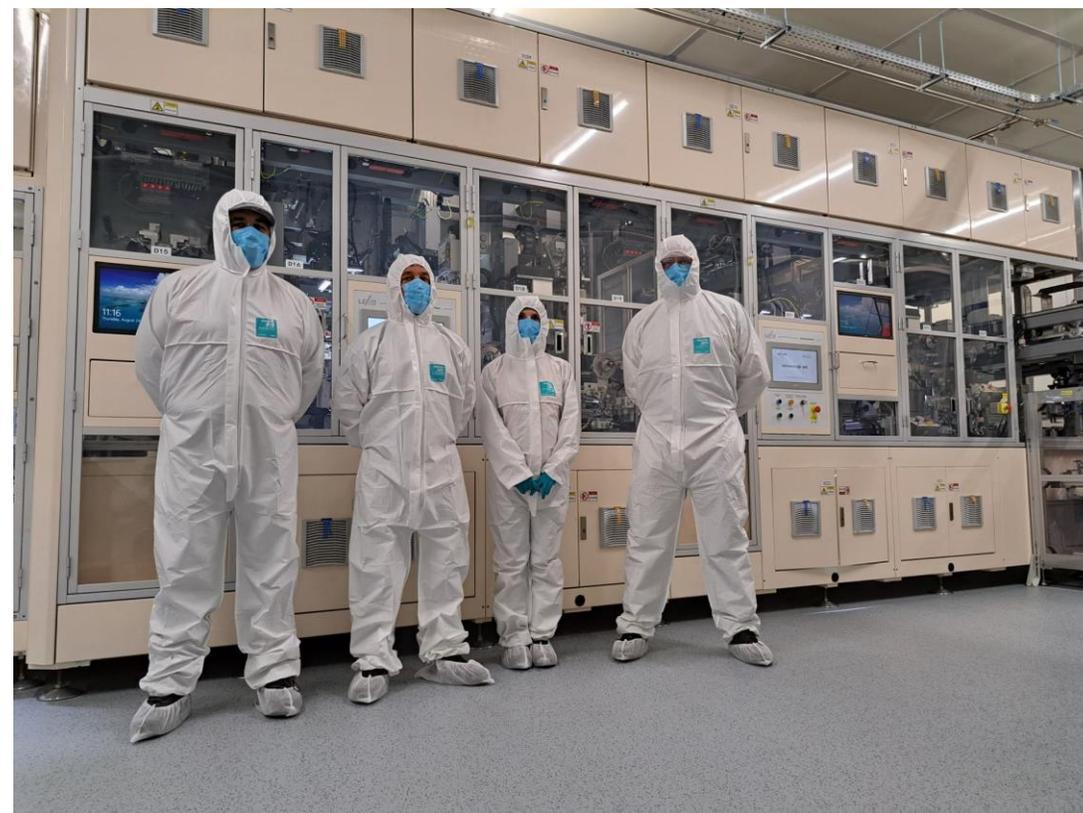
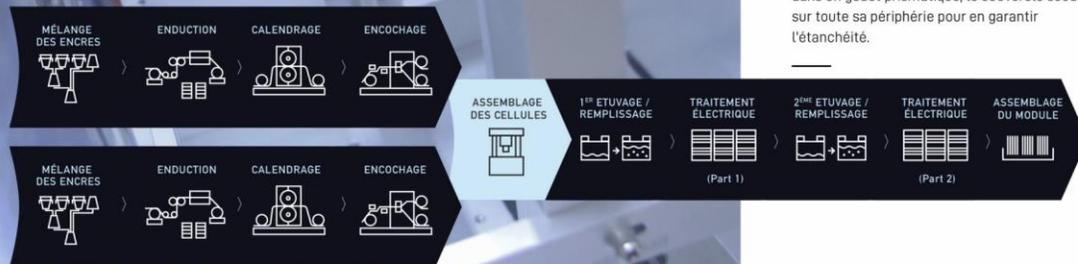
Une visite virtuelle d'une gigafactory



EMPILAGE / ASSEMBLAGE DES CELLULES

Au cours du processus d'empilage, les électrodes sont empilées et séparées par un séparateur isolant. La technologie utilisée par ACC est le pliage dit en Z.

Les « stacks » entrent ensuite dans une ligne complètement automatique dans laquelle ils sont assemblés et soudés à des connecteurs en cuivre ou en aluminium, puis au couvercle de la cellule. L'empilage ainsi formé est alors inséré dans un godet prismatique, le couvercle soudé sur toute sa périphérie pour en garantir l'étanchéité.



Une visite virtuelle d'une gigafactory

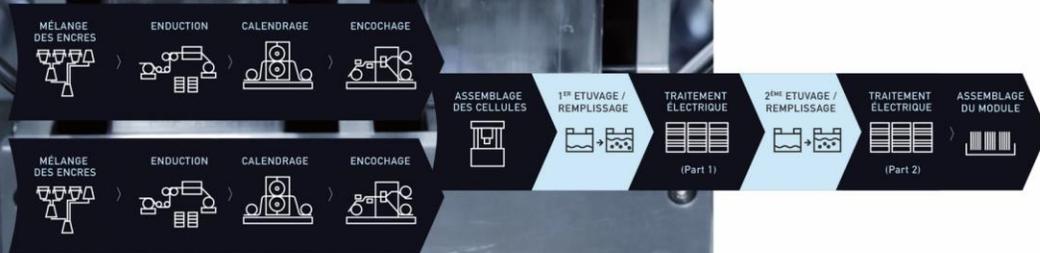


ACC
AUTOMOTIVE CELLS CO

ETUVAGE / REPLISSAGE

La cellule subit un cycle d'étuvage pour supprimer les dernières traces d'humidité, puis l'électrolyte est inséré dans la cellule.

A la fin de la formation, un remplissage complémentaire est effectué, et la cellule est hermétiquement fermée.



Une visite virtuelle d'une gigafactory

Remplissage



Une visite virtuelle d'une gigafactory



TRAITEMENT ÉLECTRIQUE

Après l'assemblage, les cellules suivent alors des cycles de formation. Les cellules sont placées dans des plateaux de compression et mises en contact par des broches de contact. Les cellules sont ensuite soumises à différents cycles de charge et de décharge à différents niveaux de température.

Un cycle final est effectué pour garantir la sécurité, la qualité, et les performances de chaque cellule avant d'être livrée à l'assemblage des modules.



Une visite virtuelle d'une gigafactory



ASSEMBLAGE DU MODULE

Les cellules graduées sont assemblées selon les spécifications du client. Le produit fini subit de nombreux tests de qualité et est préparé pour le transport. L'assemblage final de la batterie est effectué par le constructeur automobile.



La batterie prête à être montée sur le véhicule

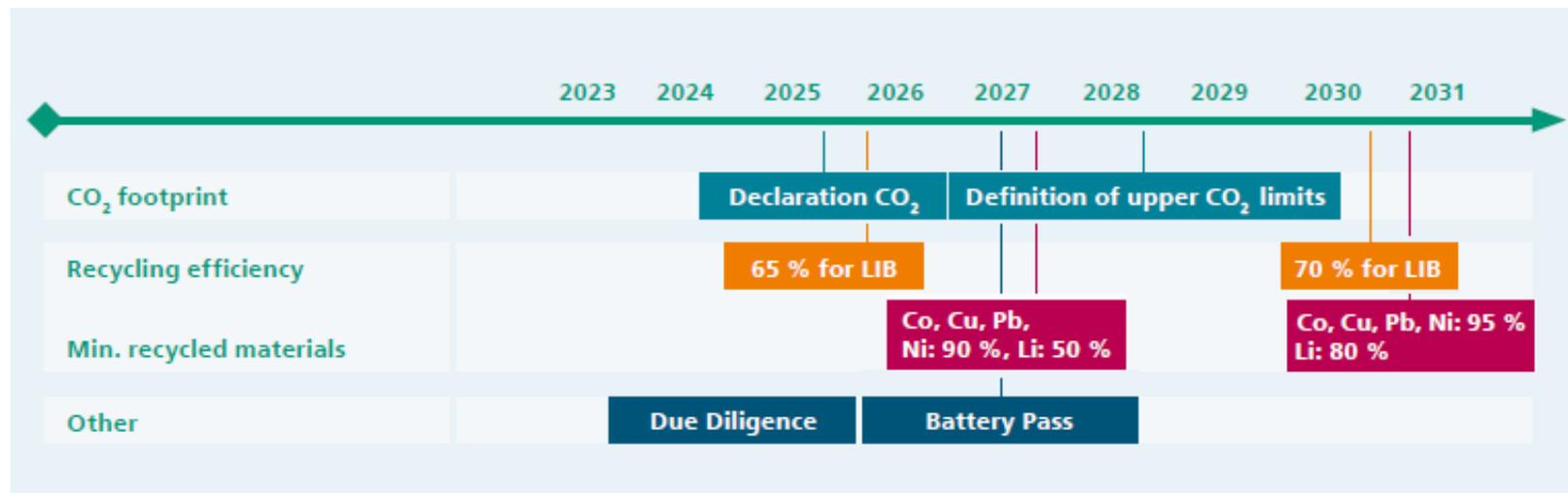


Sommaire

1. C'est quoi les batteries ?
2. C'est quoi une usine de batterie ?
3. **C'est quoi les enjeux et la dynamique future des batteries ?**

La performance des batteries, une ardente obligation pour le secteur automobile

- L'absolue nécessité de tenir les objectifs CAFE pour les constructeurs:
 - Les VEBs doivent passer de 12,5% des ventes à fin juillet 2024(*) pour atteindre 20% en 2025 (93,6 gr CO₂ / km WLTP) et au moins 50% en 2030 (49,5 gr CO₂ / km WLTP)
- Impose d'avoir des BEVs accessibles au plus grand nombre alors que le coût des batteries (environ 40% du coût du véhicule) demeure trop élevé
- Performance produit : centralité des batteries pour la performance des VEBs (charge, densité énergie et puissance, sécurité de fonctionnement)
- Exigences soutenabilité et recyclabilité nouvelles réglementations Européennes (Battery Directive)



(*) <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-0-2-in-july-2024-battery-electric-12-1-market-share/>

Performances des différentes chimies

Chemistry & Cell Components

| Cell Chemistry | Comparison

Performance Metrics for Key Battery Chemistries

Performance Metrics for Key Battery Chemistries	Li-Ion (NMC811-Gr)	Li-Ion (NCA-Gr)	Li-Ion (LFP-Gr)	Li-Ion (LCO-Gr)	Li-Ion High Voltage (LNMO)	Lithium Metal (High Ni-Li)	Silicon (High Ni- Majority Silicon) **Prototype Phase	Sodium ion (NaMOx) **Market Soon (CATL)	Lithium Sulfur Battery (LSB) **Not Commercial	Solid State Sulfidic Lithium Metal Anode **Not Commercial	Solid State Oxidic Lithium Metal Anode **Not Commercial
Gravimetric Energy Density Wh/kg (cell level)	265-290	250-280	160-200	180-200	150-165	400-450	325-350	130-160	300-500	300-450	300-450
Volumetric Energy Density Wh/L (cell level)	650-800	400-600	250-400	300-450	280-300	700-1000	750-900	150-250	450-650	800-1100	800-1100
Nominal Voltage (V)	3.7 (2.5 - 4.2)	3.6 (3.0-4.2)	3.2 (2.5 - 3.65)	3.6 (3.0 - 4.5)	4.0 (3.0 - 5.0)	3.7 (2.5 - 4.2)	3.7 (2.5 - 4.2)	3 (1.0 - 4.2)	2.1 (1.8 - 2.4)	3.7 (2.5 - 4.2)	3.7 (2.5 - 4.2)
Cell Cost \$/kWh 2023	\$112.70	\$120.30	98.5	123.6	No Data	No Data	No Data	*40-80 (CATL)	No Data	No Data	No Data
Cycle Life (C/2+ rate)	1500	1000	2000	750	250-500	200-400	**500	**3000-6000	**150-200	**250-500	**250-500
Self Discharge (Qual)	Avg	Avg	Avg	Avg	Bad	Bad	Avg	**Avg	**Bad	**Good	**Good
Calendar aging (Qual)	Avg	Avg	Avg	Avg	Bad	Avg	Avg	**Avg	**Avg	**Bad	**Bad
Rate Capability (Qual)	Avg	Avg	Avg	Good	Avg	Good	Good	**Avg	**Poor	Good	**Poor
Safety (Qualitative)	Poor	Poor	Avg	Poor	Good	Bad	Poor	**Good	**Avg	**Poor	**Good
High Temperature Operation (60C+)(Qual)	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad	**Good	**Good	**Good	**Good
Low Temperature Operation (10C-)(Qual)	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	**Bad	**Bad	**Bad	**Bad
Recycle Value (Li, Co, Ni, Cu) for Cost/Effort	Avg	Avg	Poor	Good	Poor	Avg	Avg	**Bad	**Poor	Poor to Bad	**Poor to Bad
Possible Form Factors and Challenges	No Restriction	No Restriction	No Restriction	No Restriction	No Restriction	No Restriction	*High Swelling*	No Restriction	No Restriction	*manufacturing limitations*	*manufacturing limitations*

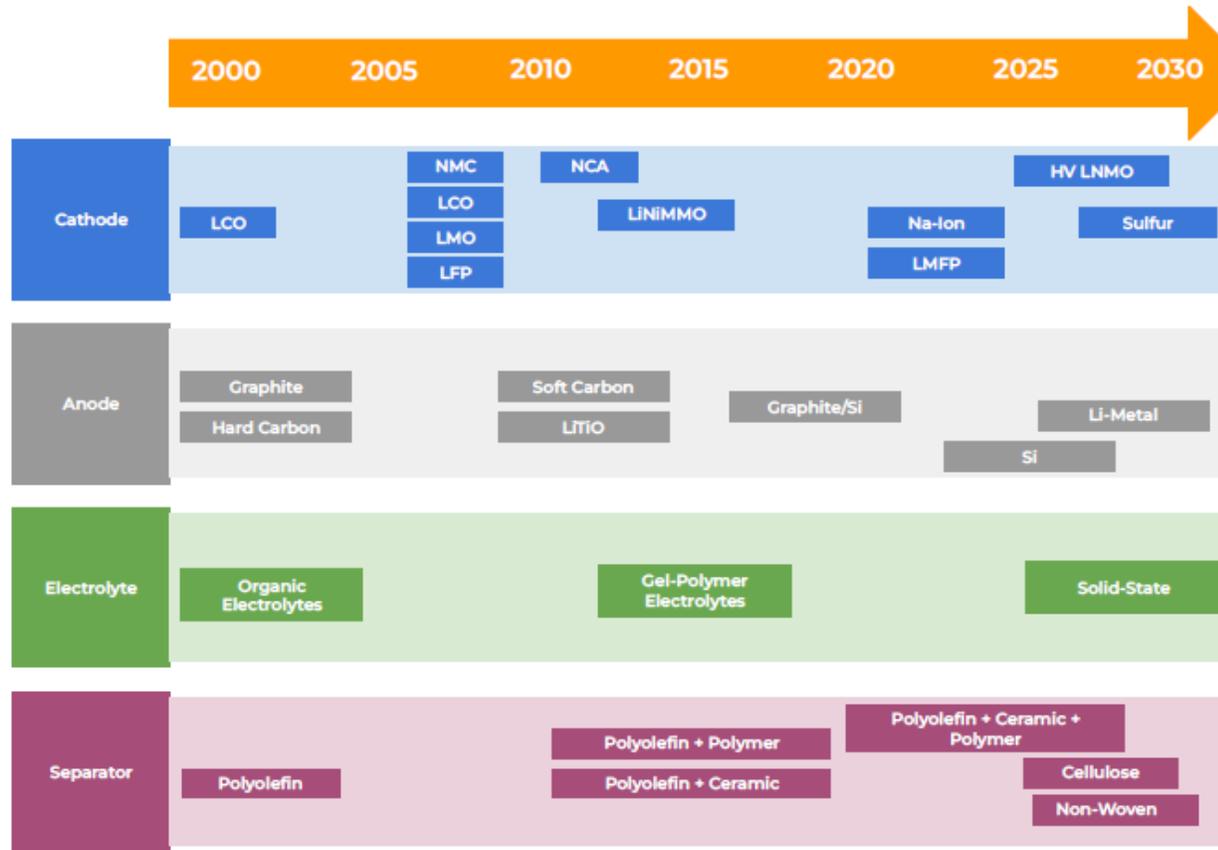
* Cell design and components other than the cathode can make a very large difference in cell performance metrics.

For more details, please visit: [Battery Talk: Battery Application Break Down 1/01/2024 \(Version 2.0\)](#)

Legend	Great	Good	Avg	Poor	Bad
--------	-------	------	-----	------	-----

Road map des technologies

Timeline of Battery Cell Chemistry Development

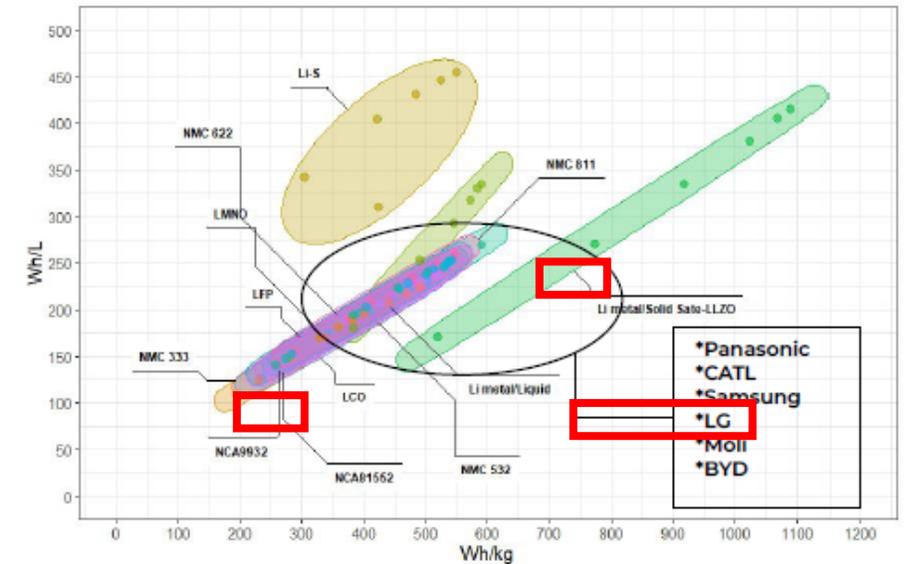


** 500 Wh/kg are the cells are the goal of government agencies in the US, EU, and Japan

***USA Battery 500**

***Japan Rising II (now Rising III)**

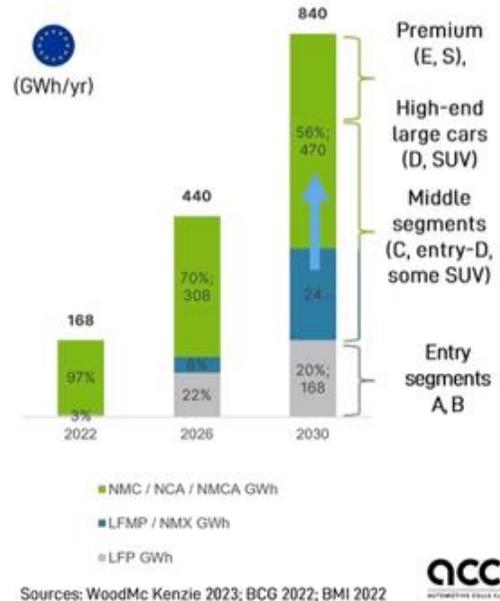
***Battery 2030 EU**



Technologies Produit – Lithium ION : LFP (Lithium Fer Phosphate) vs NMC (Nickel Manganèse Cobalt)

- La compétition aujourd’hui est entre des chimies à électrolyte liquide NMC à haute densité énergétique / prix élevé et LFP prix bas / plus faible densité énergétique compensée par de nouveaux design cellule (long blade) et des nouvelles architectures packs (Cell To Pack, Cell To Car) avec risque réparabilité et recyclabilité.

EU market strong growth of low cost LFP and competitive cost LMFP, NMX



TREND TO LONG CELLS, IN PARTICULAR FOR LF(M)P – HOW MUCH IS LONG?

Architecture	Set of Cells	Cell to Pack	Cell to Underbody
Targets	Energy Density : + 5 to 10% Wh/L* Cost saving : +	Energy density : + 20% Wh/L* Cost saving : ++	Energy density : >+ 20% Wh/L* Cost saving : +++
Scope	Cells : Prismatic « classical type » Cooling : Cooling Plate	Cells : Prismatic Cooling : Cooling Plate (or Immersive)	Cells : Long Cells Cooling : Immersive Cooling

Reparability and recycling must be considered

QCC AUTOMOTIVE ENERGY CO.

- Les évolutions design cellule et architecture pack peuvent être appliquées sur chimie LFP pour en améliorer le rapport prix / performance tout en visant meilleure recyclabilité et réparabilité.

Costs

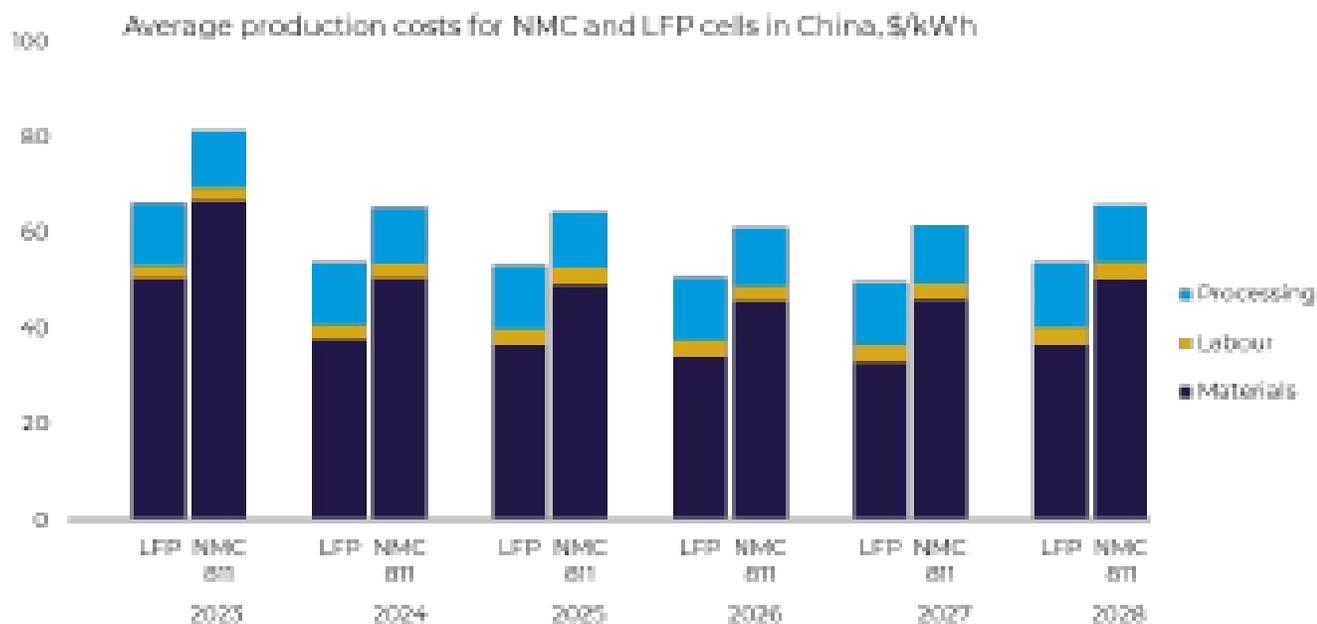
Cell costs

Cell Costs

Future Of Cell Costs

Cell costs expected to continue to decline through the decade

Falling raw material prices result in average cell production costs in China dropping below \$55/kWh for LFP and \$65/kWh for NMC by 2028



- \$65/kWh would enable <\$100/kWh on pack level; cells typically account for 70% of combined pack + cell cost, with remaining 30% due to cost of pack mechanics
- The cost outlook is primarily influenced by lithium supply-demand-price dynamics
- Yield rates are already approaching practical limits in China (~99%)
- Processing (also including electricity), labour, and material costs outside China are generally higher. For example, the cost of manufacturing NMC 811 pouch cells in USA in 2023 was ~80% higher than in China
- Improving yield rates and economies of scale, along with subsidies, will help with cost-competitiveness for ex-China manufacturers

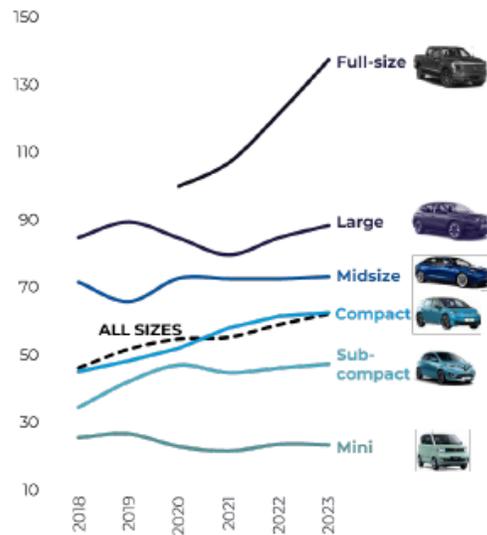
Les capacités et les couts de la batterie dépendent évidemment du nbr de cellules

Applications

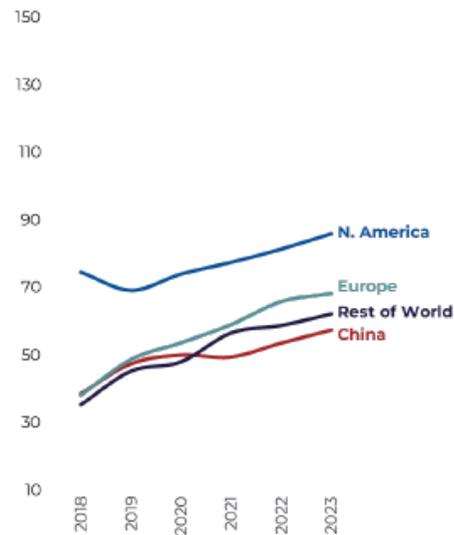
| Electric Vehicles | Passenger BEVs

Battery pack capacities continue to increase but are starting to plateau

Weighted-average BEV battery pack capacity by vehicle segment, kWh



Weighted-average BEV battery pack capacity by region, kWh



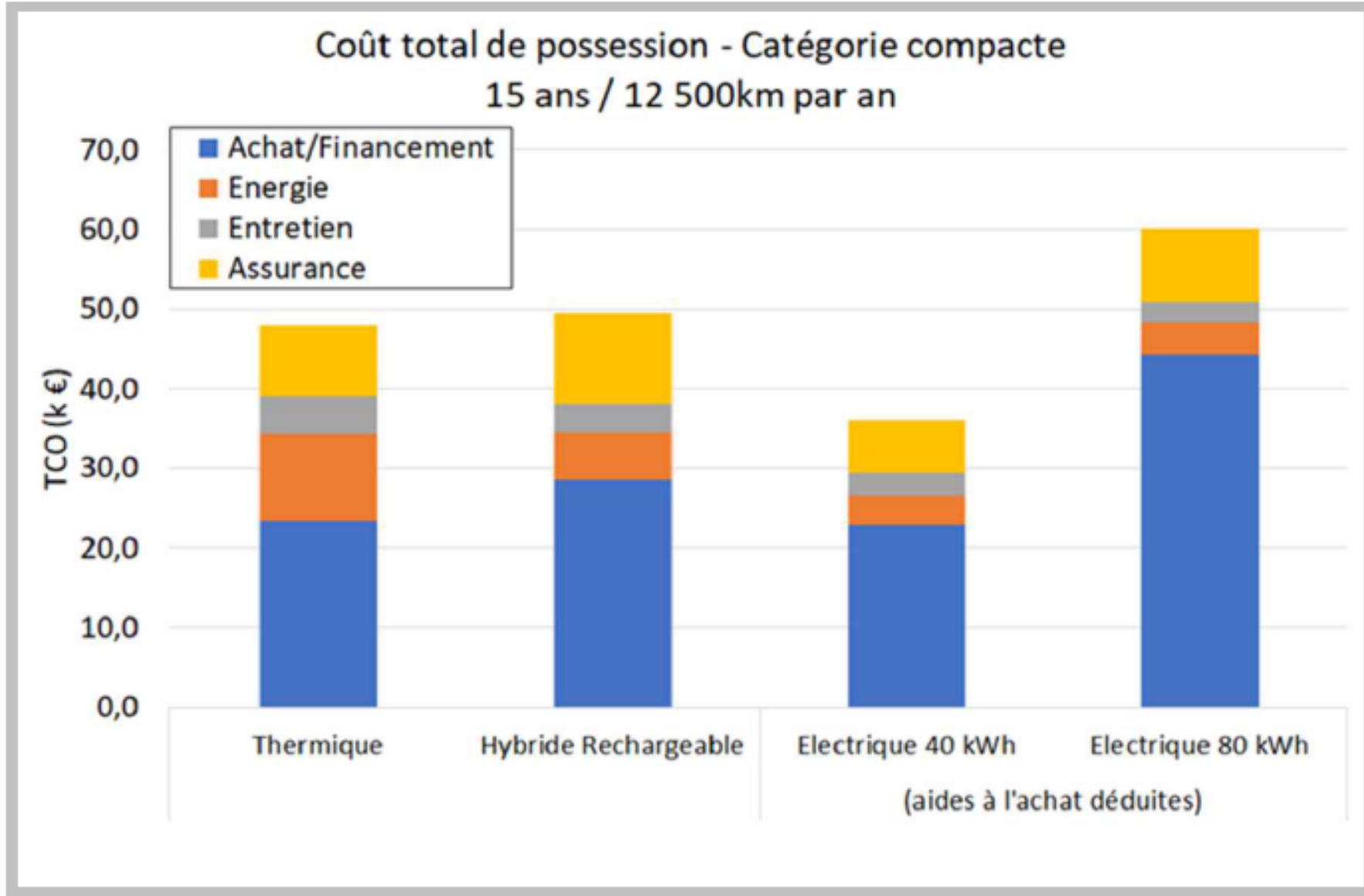
Showing light duty vehicles (passenger cars and light commercial vehicles)

- Capacities primarily driven by range expectations
- Capacities also driven by chemistry selection and vice versa - small batteries more conducive to LFP & Na-ion
- But mini vehicles have small batteries and are small part of battery demand
- Rightsizing will contribute to thrifting of raw materials (less material being used per kWh of capacity)
- One scenario is that cost and legislative pressures and ubiquitous fast charging will encourage 'rightsizing' of batteries in the long term

2023 | BATTERY REPORT | 01 Industry | P. 78

Source: [CBU Group](#)

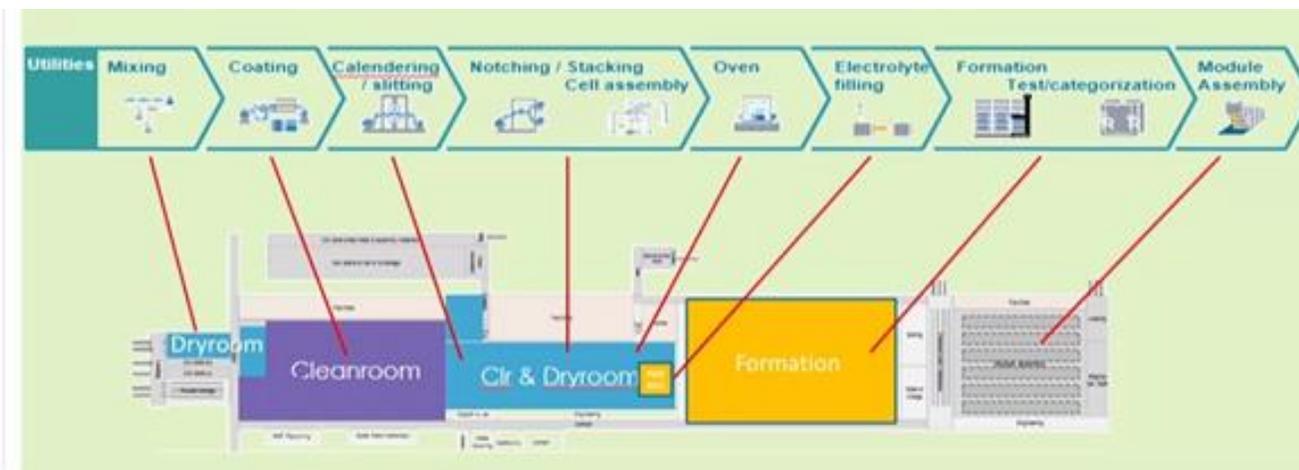
VF | VOLTA
FOUNDATION



Source ADEME 2022



Coût: Capex



... And the current pool of competitive manufacturing equipment providers remains relatively limited to China, Korea and Japan.



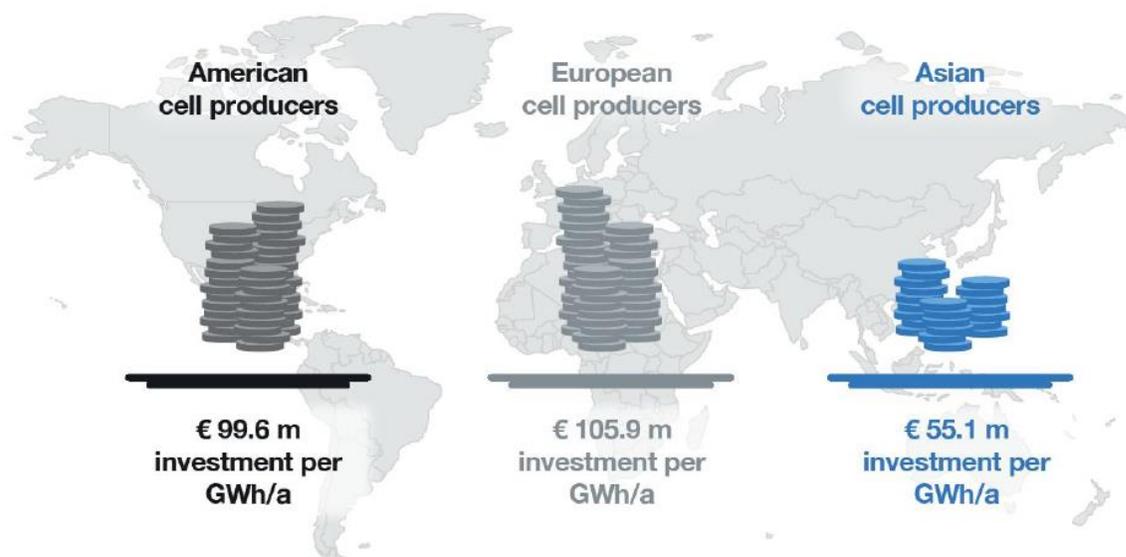
Cell & Pack Manufacturing

| Li-Ion Manufacturing Plant - CapEx By Region

Labor costs, vendor proximity, vertical integration, and policy all factor into CapEx costs of around 2x in NA and EU.

CapEx depreciation represents about 25% of cell cost which makes commercial viability difficult in NA & EU.

NA & EU have responded with favorable policies for manufacturers and a support for new manufacturing technologies which can lower CapEx and cost per kilowatt-hour produced.

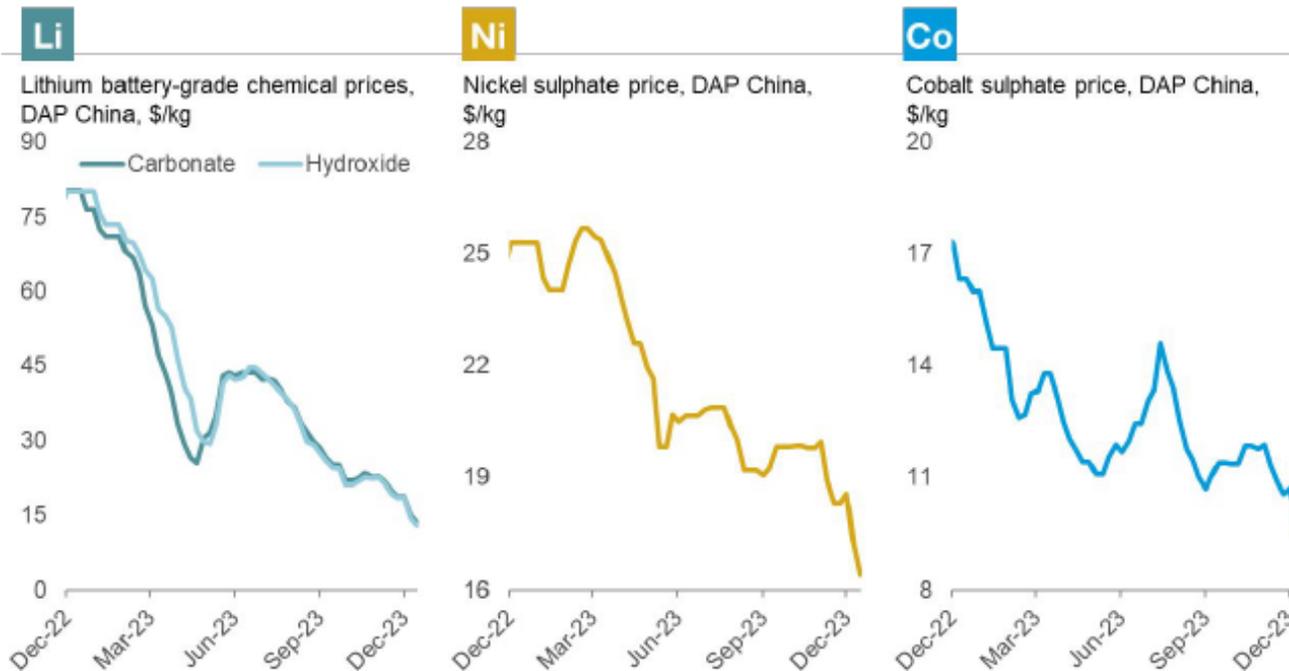


Costs

Raw Materials

Battery Materials | 2023 Prices

Battery chemical prices fall in 2023 as supply outpaces demand



Factors Contributing to Price Declines

- Mining investments has increased supply of battery materials in the market
- Rate of growth in EV and battery demand has slowed relative to 2022
- China market has seen high inventories since start of the year
- Continued shift to LFP has softened demand for nickel and cobalt materials

Souveraineté (anode graphite)

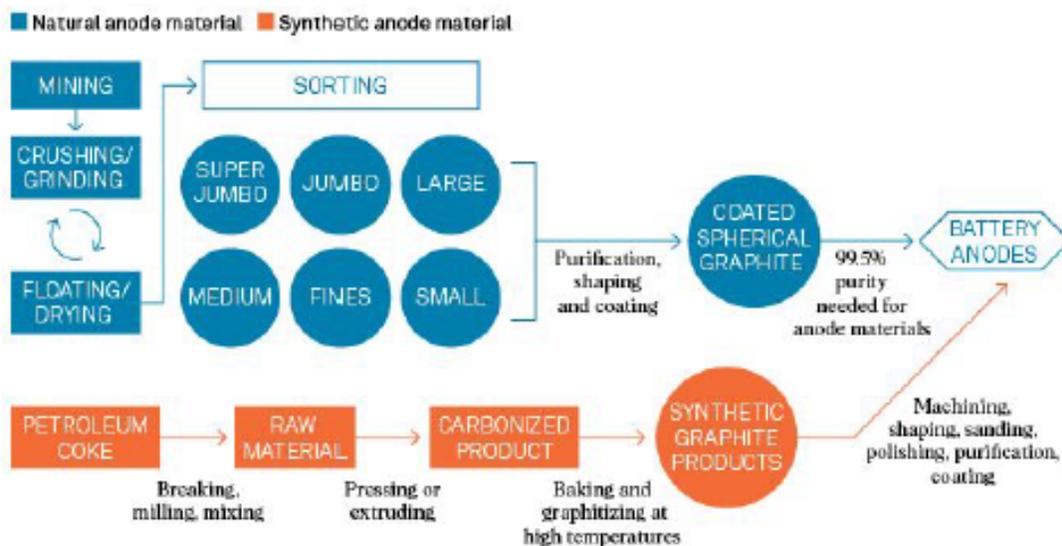
Raw Materials

| Graphite 101

Natural vs. synthetic graphite

Natural graphite is mined from the earth

Synthetic graphite is derived from petroleum coke



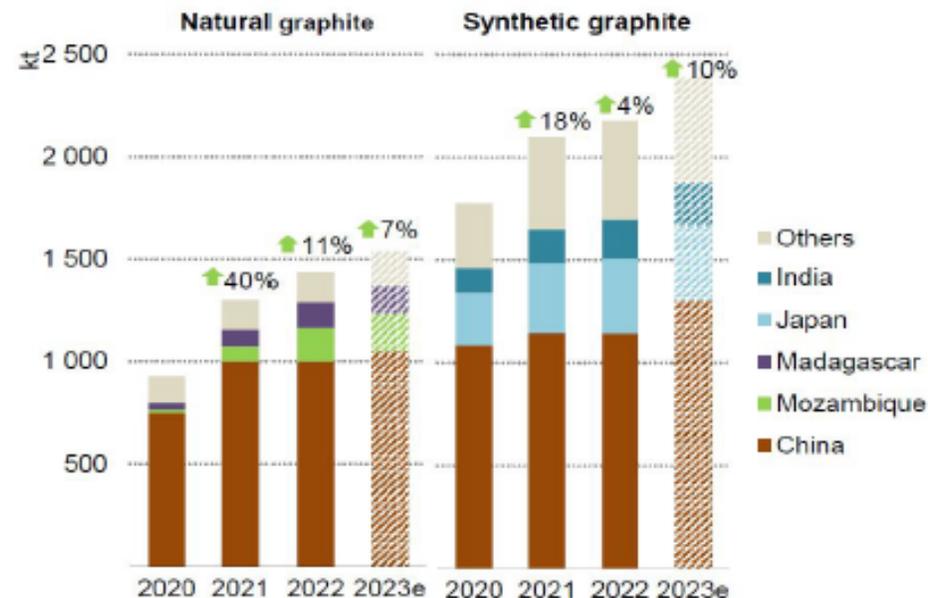
Rules of thumb:

~0.45 kt of natural graphite consumed per kt of anode

~1 kt of synthetic graphite precursor consumed per kt of anode

~1.2 kt of graphite anode material per GWh of battery capacity

- Natural graphite is cheaper and much less carbon intensive to produce.
- Synthetic graphite is favored for its higher purity and predictable performance, and benefits of faster charging and longer cycle life. It also takes less time to build a synthetic graphite plant vs. bring a mine to production.

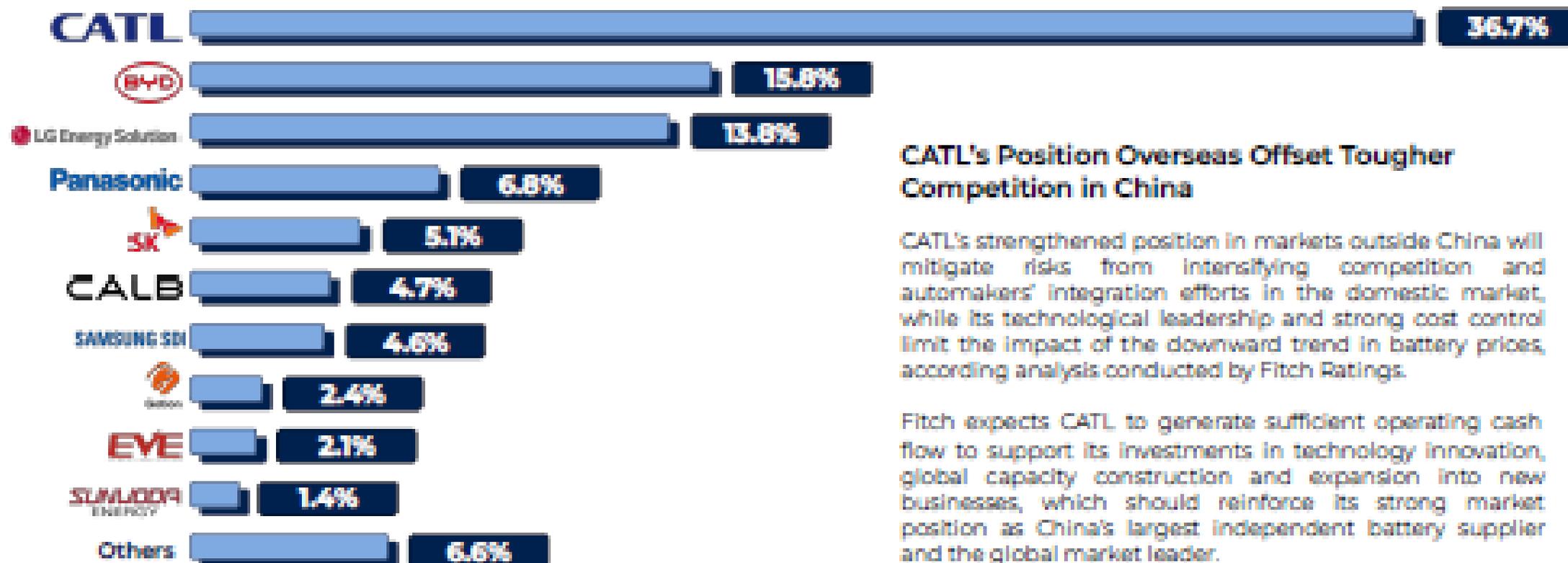


Souveraineté

Cell & Pack
Manufacturing

| Cell & Pack Manufacturers' Market Share In 2023

CATL Leads Market Share Amongst Global Battery Cell Manufacturers



CATL's Position Overseas Offset Tougher Competition in China

CATL's strengthened position in markets outside China will mitigate risks from intensifying competition and automakers' integration efforts in the domestic market, while its technological leadership and strong cost control limit the impact of the downward trend in battery prices, according analysis conducted by Fitch Ratings.

Fitch expects CATL to generate sufficient operating cash flow to support its investments in technology innovation, global capacity construction and expansion into new businesses, which should reinforce its strong market position as China's largest independent battery supplier and the global market leader.

Souveraineté

Asia

| Chinese Graphite Export Restrictions

From Dec 2023, operators must apply for special licenses to export graphite products outside China

Serial No.	Substance	HS code (for reference)
1	Artificial graphite materials and related products with high purity (purity > 99.9%), high strength (flexural strength > 30 MPa), and high density (density > 1.73 g/cm ³).	3801100030, 3801909010, 6815190020
2	Natural flake graphite and its products, including spheroidized graphite and expanded graphite.	2504101000, 2504109100, 3801901000, 3801909010, 3824999940, 6815190020

China dominates the supply of natural and synthetic graphite and anode active material



China exports over:

- 100kt per annum natural graphite, principally to Japan, South Korea, USA, India and Europe;
- 60kt per annum spherical graphite, principally to Japan, South Korea and USA
- 80kt per annum AAM (principally to Japan, South Korea and USA).

Chinese dominance in graphite supply is fuelling search for alternative sources (see Raw Materials Section in Industry for further background).

Souveraineté

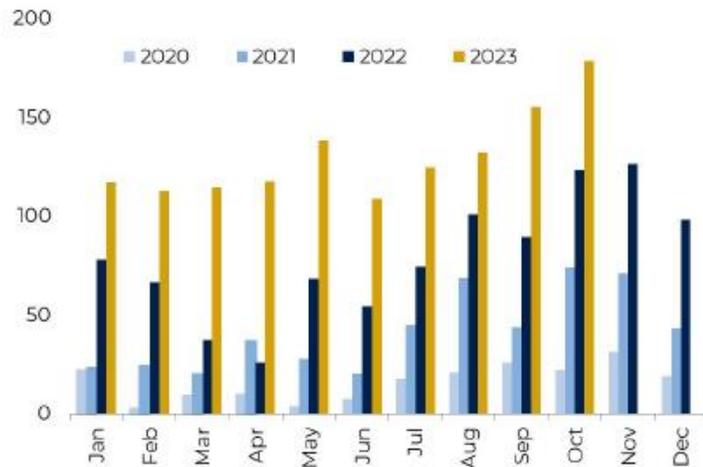
Asia

| How Governments Are Responding To Chinese BEV Imports

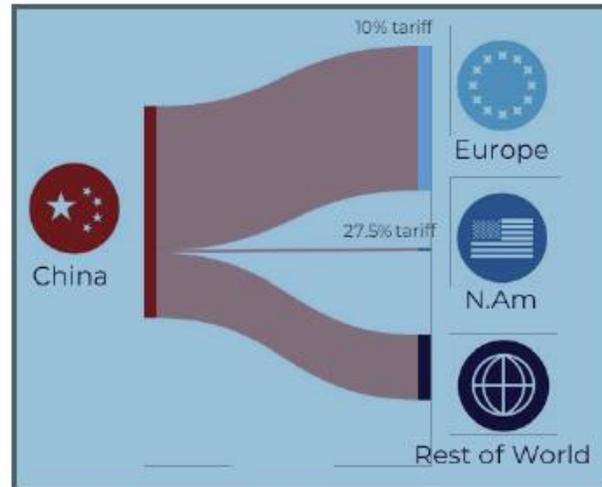
EU anti-subsidy probe

4th October 2023: European Commission launches **investigation into Chinese EV subsidies** claiming that "the global market is flooded with cheaper electric vehicles, the price of which is kept artificially low owing to huge state subsidies" - "It may result in the Commission levying countervailing tariffs on EU imports of BEVs from China"

Chinese BEV exports grew 123%



Almost 30% of EU BEV sales in 2023 were imported



Most exports from China are western OEMs, but Chinese are growing in share



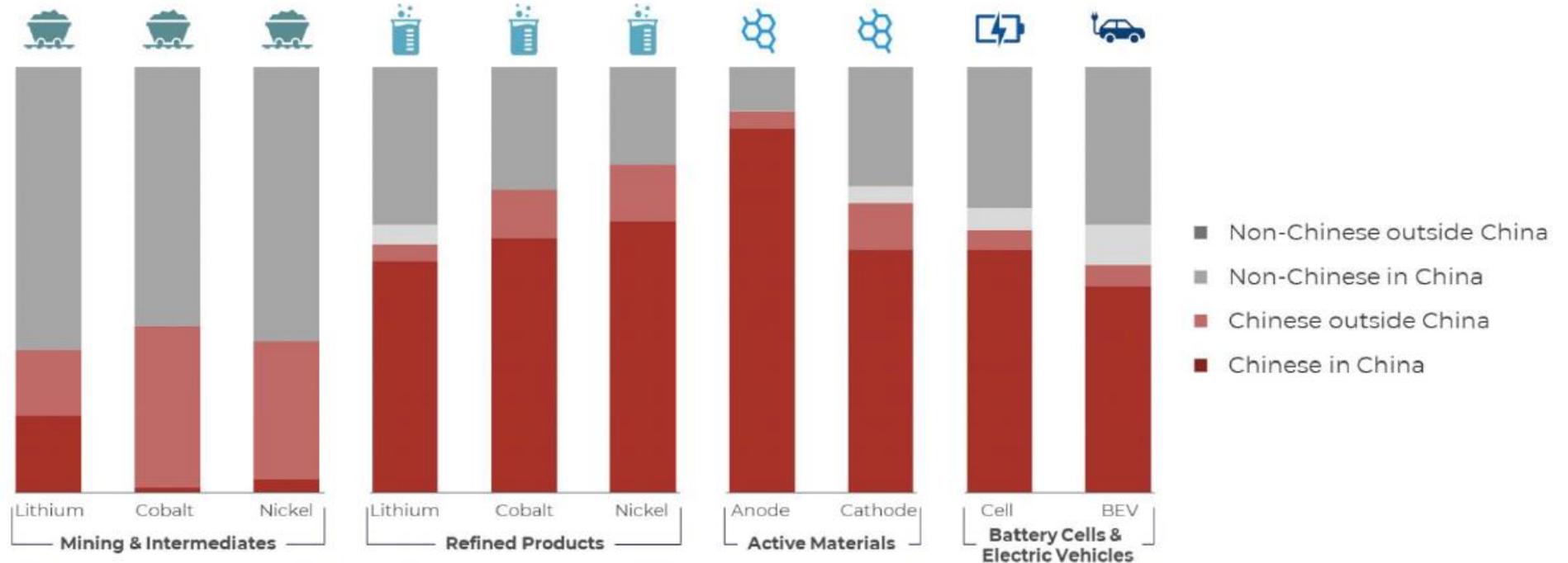
Souveraineté

Asia

| Geopolitics Of Batteries

Chinese battery investments go global

Battery supply chain production by equity ownership, 2028 forecast, %



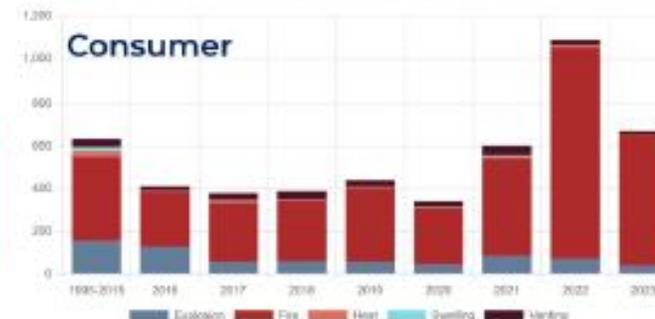
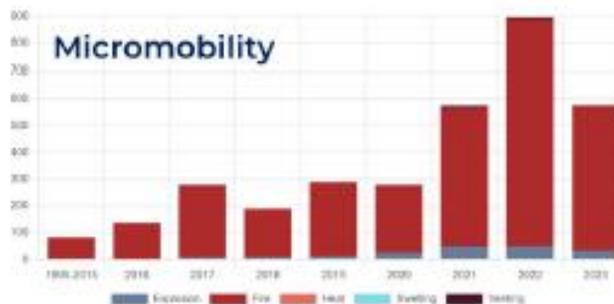
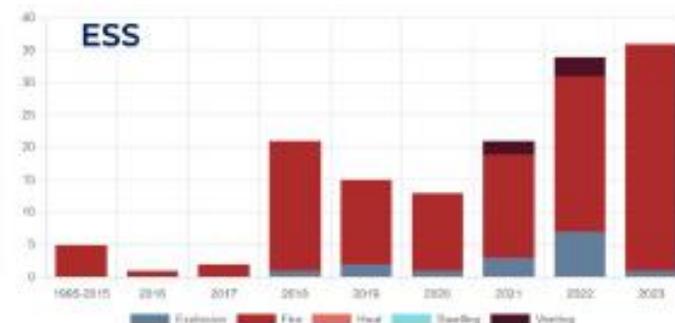
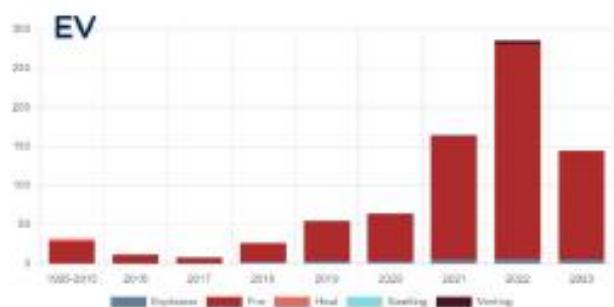
Sécurité

Safety

| Incidents

The total number of safety-related incidents decreased from 2022 to 2023

- Consumer products recorded the largest number of incidents, followed by micro-mobility products
- Most of the incidents were reported in the USA, Europe, and China
- Most of the incidents reported resulted in a fire, with a small fraction stopping at just swelling, venting, or excessive heating



Recyclabilité

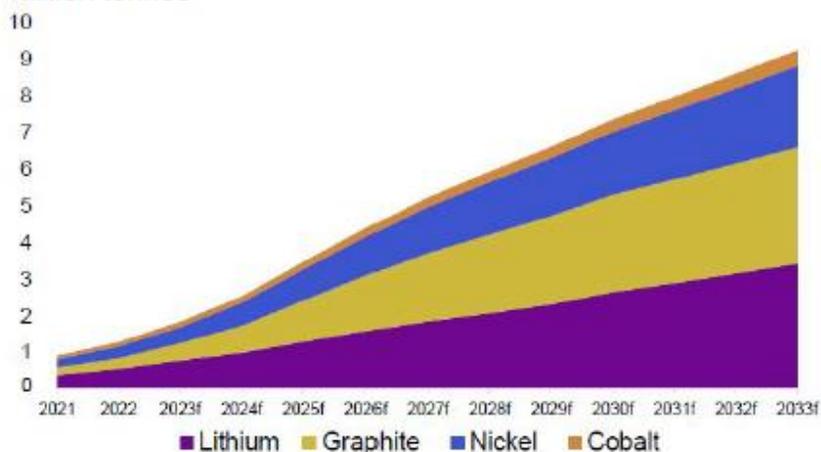
Recycling

| Market | Secondary Metal Supply & Demand Forecast

Demand for lithium batteries expected to increase 5 fold by 2033 at 15% CAGR, which will translate to demand for battery metals.

The surge in electrification and cell production is set to escalate demand for battery metals. In the short-term, recycling can help to meet a part of this demand, providing marginal security of supply for regions with low primary metal production. Over the long term, recycling is going to play a key role in meeting market demand.

Lithium-ion battery metal demand
Million tonnes



Source: Fastmarkets battery recycling and black mass outlook

Secondary battery metal supply (tonnes)



Source: Fastmarkets battery recycling and black mass outlook

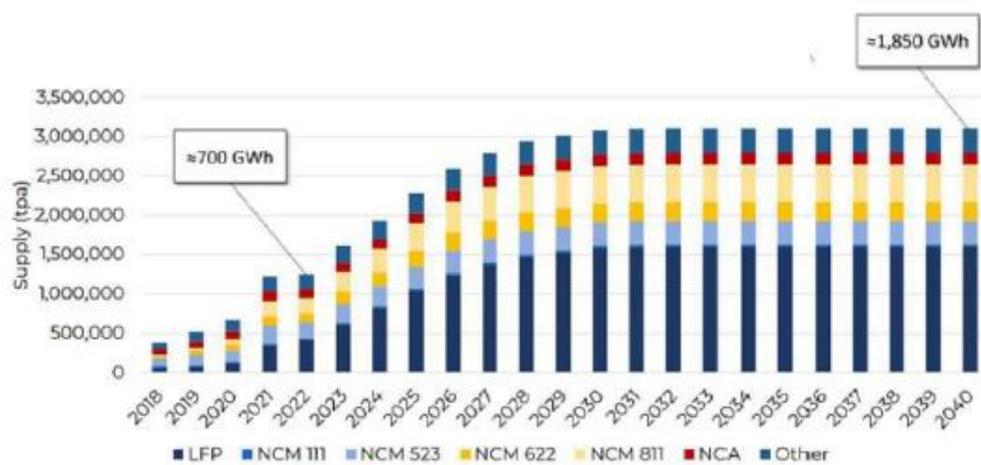
Recyclabilité

Recycling

| Market | Battery Chemistry Forecast & Recycling Feedstock

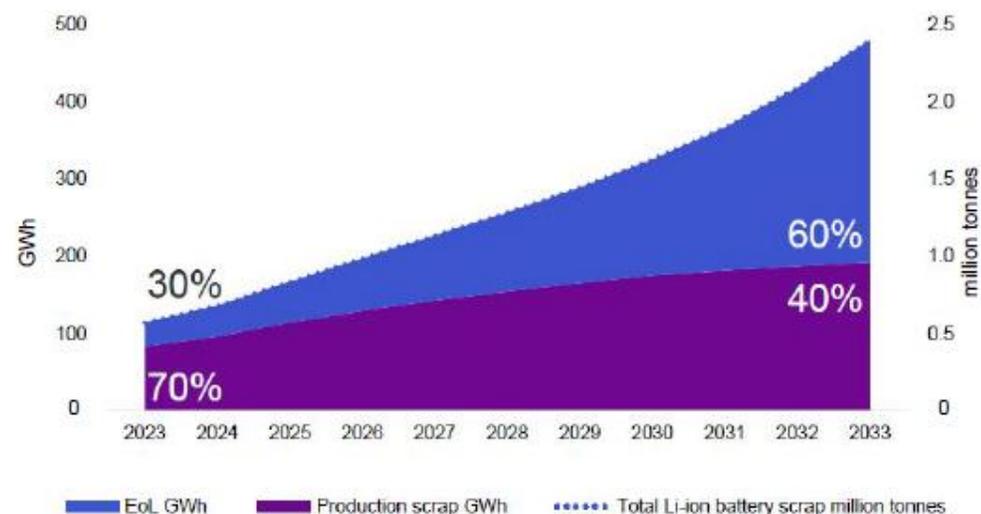
2040, battery recycling market in Europe will be up ten-fold vs. 2030 –driven by gigafactory scrap initially, EoL batteries to ramp up from 2030+

Recycling addresses scarcity of raw materials and provides security of supply for regions with low primary metal production.



Source: Benchmark Mineral Intelligence 2022 | Q2 2022 Forecast

- Dominant battery chemistry in industry has significant implications for recycling feedstock
- Feedstock expected to shift from NCM to LFP with growing popularity, with LFP comprising more than 50% of feedstock supply by 2030.



- As the first wave of EVs reach end of life in 2030, recycling market is expected to grow substantially.
- 110GWh (≈ 5.5 million tonnes) of total battery scrap in 2023 and 480GWh (≈ 2.4 million tonnes) by 2033

En conclusion

- La batterie est un composant clé de la performance et du cout des voitures électriques
- Les objectifs de réduction de CO2 obligent à une augmentation significative des ventes de BEV, ce qui n'est pas possible sans des progrès significatif sur la part batteries
- Les technologies de batterie Li Ion ont fait des progrès spectaculaire ces 10 dernières années. Cela va se poursuivre en deux phases principales :
 - L'amélioration continue des technologies de chimies a électrolyte liquide (nouvelles chimies, nouveaux design de cellules et de pack à l'horizon 2030/35) avec des gains autour de 10% en capacité, réduction de cout, vitesse de recharge.
 - Une rupture technologique majeure avec les électrolytes solides avec un saut des performances significatifs, mais peu crédible avant 2030/35
- Ces évolutions vont accélérer l'accessibilité des BEV : réduction de cout par la performance des cellules mais aussi par la réduction du nombre de cellules à autonomie identique.
- Ce levier technologique ne doit pas faire oublier l'ajustement des capacités des batteries au juste besoin de mobilité, les gains de CO2 étant surtout à attendre des réduction de mobilité sur les trajets pendulaires domicile travail, pour lesquels les capacités batteries actuelles sont largement suffisantes
- Le risque de pénurie de matières premières ne se pose pas d'un point de vue géologique mais d'un point de vue géopolitique : sur tous les maillons de la chaine de valeur batterie, la Chine est en position ultradominante
- Des actions volontaristes pour restaurer une souveraineté technologique vient d'être engagée avec des investissements significatifs en Europe. Elle est à maintenir et développer (sur la R&D de rupture) dans les prochaines années, malgré les soubresauts du marché des VE. Sous cette condition, l'avènement de la rupture « solid state » constitue une opportunité de « leap-frogger » la domination asiatique et singulièrement chinoise.
- Comment mener à bien cette transition ? Quels rôles respectifs des politiques publiques et du marché ?

Merci de votre attention

Questions ?

Véhicules électriques : hybrides ou batteries ?

Émissions sur le cycle de vie

Toyota Yaris hybrid

Emissions CO₂ : 87 g / km (WLTP)
 Production-transport of gasoline +
 19% (ADEME)
 Batterie | 1,5 kWh

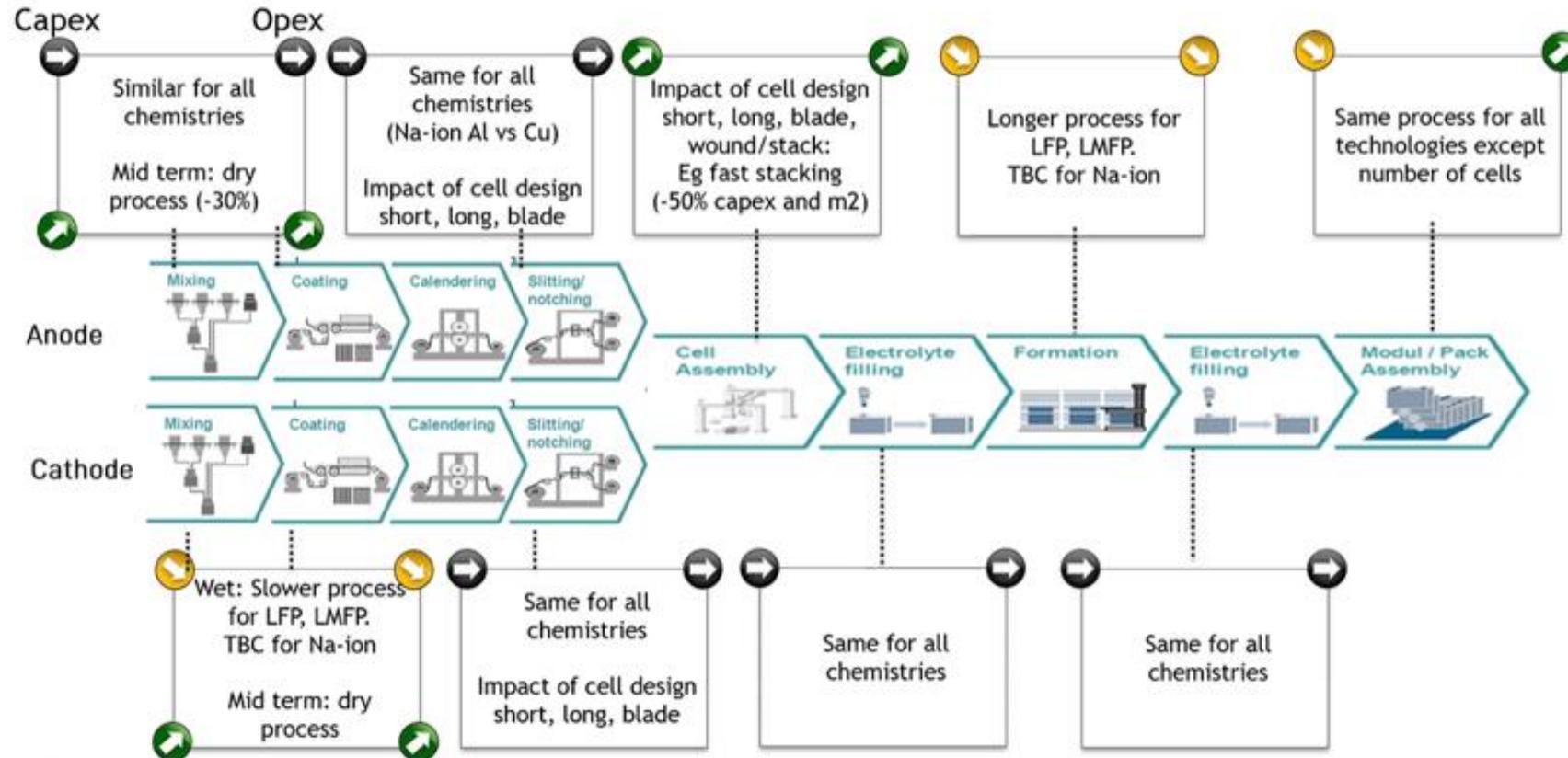
Renault Zoe

Consumption: 17,2 kWh/100km (WLTP)
 Yield of electricity transport and battery
 charging : 85%
 Batterie : 54 kWh
 Production de la batterie: Europe

	Zoe			Yaris hybride
Battery production:	22 	22 	11 target	≈ 0
Electricity production :	11 	51  2019	20  2030	
Gasoline production and combustion :				17 87
Total en g CO2/km	33	73	31	104

Impact des évolutions technologiques LI liquid sur le process

Equipment impact of cell chemistries NMC, LFP, Na-ion (liquid electrolyte) C2 - Interna
 Equipment choices impact what can be produced or not and GFactory output (GWh)



(*) Présentation P.Biansan du 1^{er} juillet 2024

La technologie de rupture : Solid State Batteries

2.1 Solid State Batteries: tentative summary

Polymers, oxides, hybrids

New electrolyte designs : non-liquid & non-flammable

POLYMER SSB

OXIDE SSB

Solid Polymers Electrolytes

- Polymer BUT stability vs NMC
- **Hybrid: oxide (-) and gel catholyte;** BUT solvent, dendrites, processing
- **Hybrids orga. / inorga.** (oxide, sulfur, polymer) BUT interfaces

Sulphides

Enabling new anodes (Li, Si) **Promoting intrinsic better safety**

SULFIDE SSB

Sulfide SSB with Si/C anode

SULFIDES is the most promising solid electrolyte for EV applications :

- ✓ Very high Li-ion conductivity, equivalent to liquid
- ✓ Good processing ability in composite designs
- ✓ Enabling breakthrough in energy density

Recent announcements by cell makers & OEMs rank this technology as the highest potential

Sulphide SE most promising BUT:

- High pressure** (but improvements)
- sulfur-based SE: unstable vs NMC → coatings
- ES sulfurs unstables vs Li metal → Si

V. Buissette, Batteries 2022, Lyon, October 2022

(*). Présentation P.Simon du 21 mai 2024

Solid state: not unique compatibility solution and several levels of challenges

When discussing solid-state batteries, it's crucial to consider the challenges of combining electrolytes with specific cathode or anode active materials.

Cathode	Parameters	Oxides	Sulphides	Polymers
LFP	Electrochemical compatibility	Green	Yellow	Green
	Processibility	Red	Yellow	Green
	Lifetime	Green	Yellow	Green
NCM, NCA, LMO, LCO	Electrochemical compatibility	Green	Red	Red
	Processibility	Red	Yellow	Green
	Lifetime	Yellow	Red	Red
Sulphur	Electrochemical compatibility	Yellow	Red	Green
	Processibility	Red	Green	Green
	Lifetime	Yellow	Red	Green

Anode	Parameters	Oxides	Sulphides	Polymers
Li metal	Electrochemical compatibility	Green	Red	Green
	Processibility	Red	Green	Green
	Lifetime	Yellow	Yellow	Yellow
Silicon	Electrochemical compatibility	Green	Yellow	Green
	Processibility	Red	Yellow	Green
	Lifetime	Red	Yellow	Green
Graphite	Electrochemical compatibility	Green	Yellow	Green
	Processibility	Red	Yellow	Green
	Lifetime	Yellow	Yellow	Green

rh motion

Challenging Intermediate changes No particular change

(*). Présentation P.Biensan du 1^{er} juillet 2024

- Toutes les annonces industrielles ont été décalées dans le temps
- Premières applications potentielles fin de la décennie
- Production de masse après 2035

Sous réserve levée verrous technologiques

Costs

Cell Costs

| 2023 Battery Pack Prices

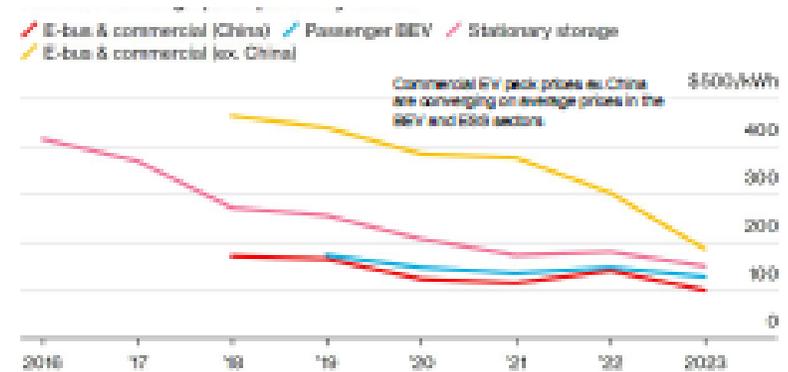
Battery prices resume long trend of decline after unprecedented increase in 2022

- Average pack price dropped 14% to a record low of \$139/kWh
- This was driven by raw material and component prices falling while production capacity overshoot demand
- Prices were lowest in China, followed by US and then Europe. There was intense price competition in a crowded market in China
- LFP cells were 32% cheaper than NMC cells

Pack-to-cell price ratio is recently plateauing at ~1:5



Prices are converging across sectors

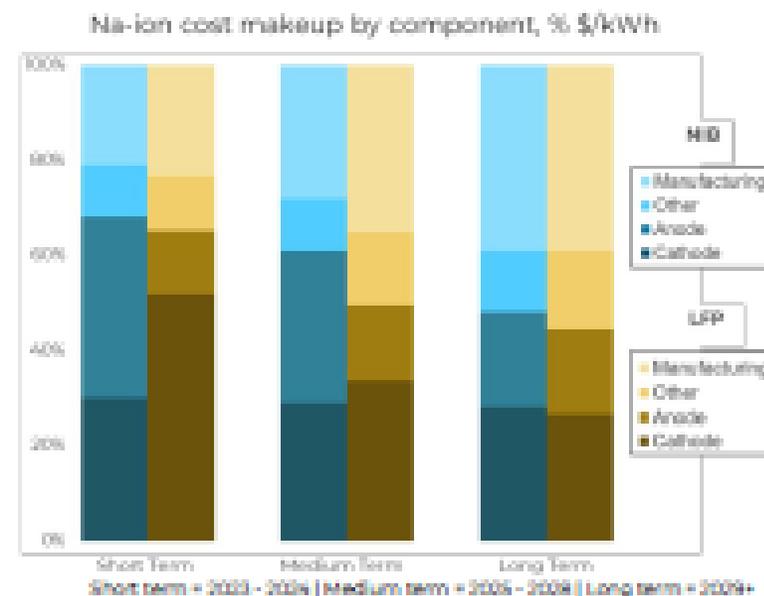
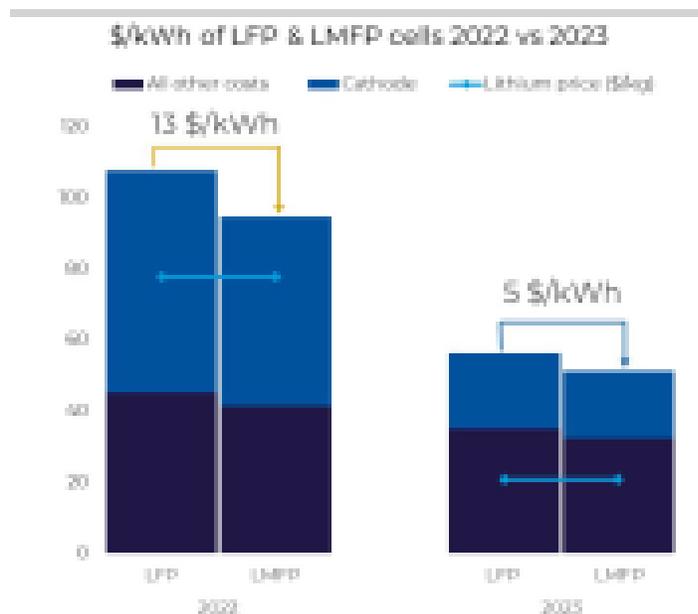


Cell Costs

| LMFP & Na-ion

LMFP cost advantage increases with lithium price. Na-ion cost structure is anode-heavy.

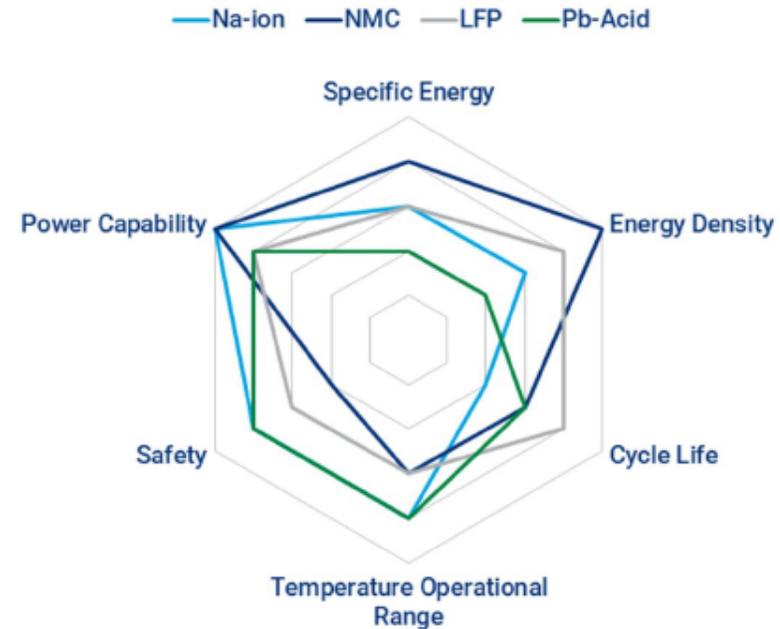
- The LMFP-LFP cost difference is more profound in a high lithium price scenario
- It is also more cost effective to use solid-phase rather than a liquid-phase production route
- Na-ion is not yet cost-competitive with Li-ion due to the immature supply chain for hard carbon. This drives up cost of the anode



Chemistry & Cell Components

| Sodium Ion | Comparison Against Lithium Ion

	Na-ion battery	Li-ion battery
Elemental Abundance	~23000 ppm	20 ppm
Gravimetric Energy density	140-150 Wh/Kg	140-280 Wh/Kg depending on chemistry (NMC, LFP, LTO, NCA etc.)
Volumetric Energy Density	250-400 Wh/L	250-750 Wh/L depending on chemistry (NMC, LFP, LTO, NCA etc.)
Cycle Life	2000-20,000	2000-20,000
Fast Charging Capability	Demonstrated @ 4C for short period of time; R&D still ongoing	Depends on chemistry (NMC - <1C, LFP - <2C, LTO - <6C)
Operating Temperature	-20°C to 60°C	0°C – 45°C (For LTO, -30°C - 60°C)
Safety	Safe to transport at 0V	Usually transported @ 50% SoC to avoid over-discharge



Types of Solid Electrolytes

Solid-state batteries differ from classical lithium-ion batteries due to their use of a solid electrolyte. However, a consensus on the preferred chemistry for the solid electrolyte has not been reached, as each type comes with distinct pros and cons.

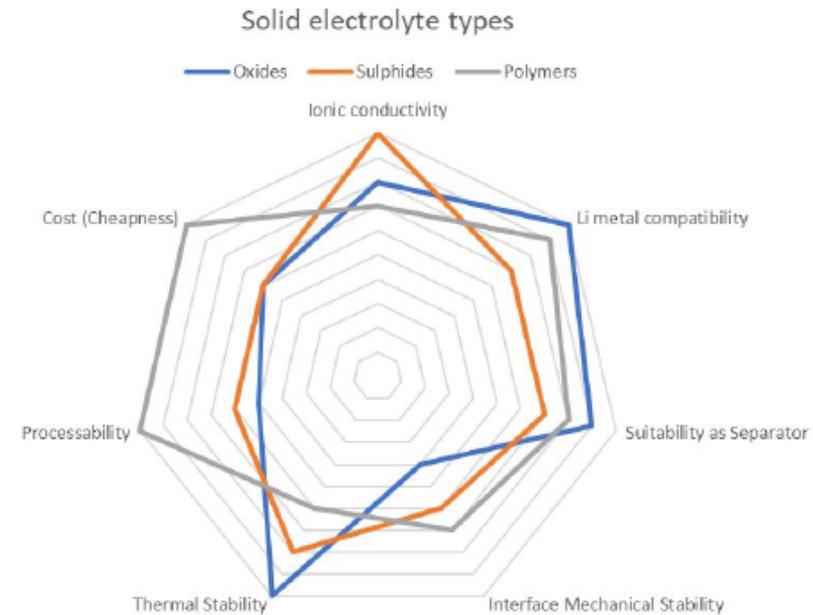
The two most common families of electrolyte used are:

- Ceramic (including Oxides and Sulphides)
- Polymers (solid, composite, or gel; the latter often referred to as a semi-solid electrolyte)

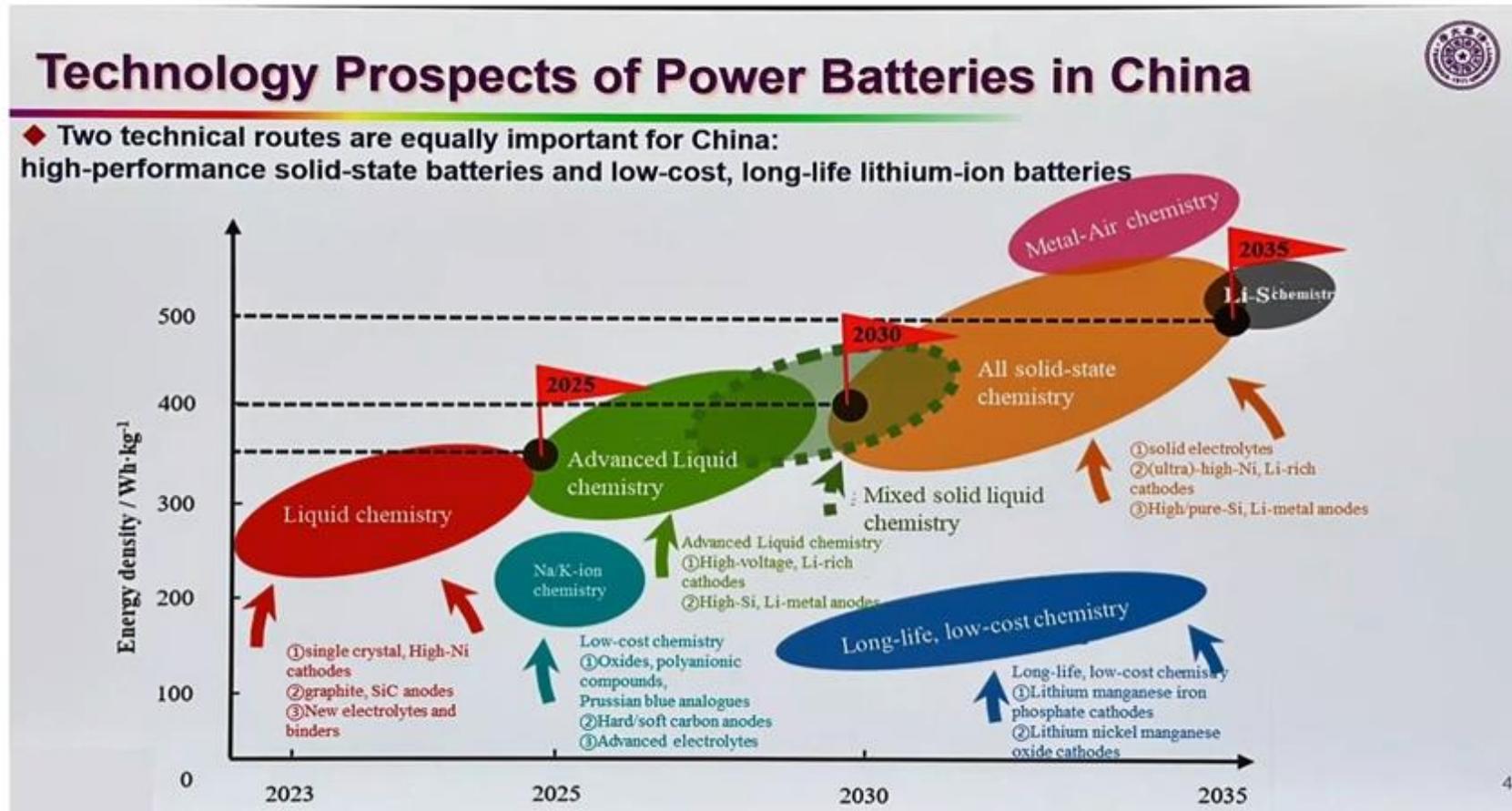
Key properties of a good solid-state electrolyte include high ionic conductivity, a robust electrode-electrolyte interface, high thermal and electrochemical stability, the ability to suppress dendrites, high processability, and low manufacturing cost.

Ceramic electrolytes exhibit high ionic conductivity and mechanical strength but suffer from poor interfacial properties. In contrast, organic polymers boast good interfacial properties but struggle with low ionic conductivity and mechanical strength.

So far, polymers have achieved a higher level of technology readiness owing to their superior processability.



Road map des technologies Lithium ION



Présentation P.Biensan du 1^{er} juillet 2024

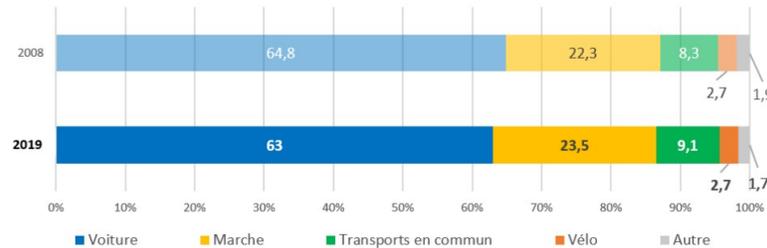
Le développement du télétravail

- Bénéfice moyen de 271 kg eqCO2 par jour de télétravail hebdomadaire (étude Ademe 2015), gain de temps et économie au niveau individuel
- Plusieurs formules
 - **Tiers lieux**
 - **Domicile**
- Effet confinement (étude Chronos 2020):
 - **Pour les actifs dont la profession le permet (47% de la population active), 70% de ceux qui l'ont essayé souhaitent continuer**
 - **Recours au Drive et e-commerce s'est développé**
- Mais effet rebond /transferts (Ademe: 2020)
 - **nouvelles mobilités ou annexées aux mobilité pendulaire (dépose école) (perd 25%) du gain**
 - **Chauffage, numérique, communication**
 - **Conclusion 1 : décourager les pratiques par télétravail journées incomplètes**
 - **Conclusion 2 : intérêt des tier lieux en zones périurbaines**

Le report modal transport collectif(TC)

- (i) Report modal, vers TC oui, mais :

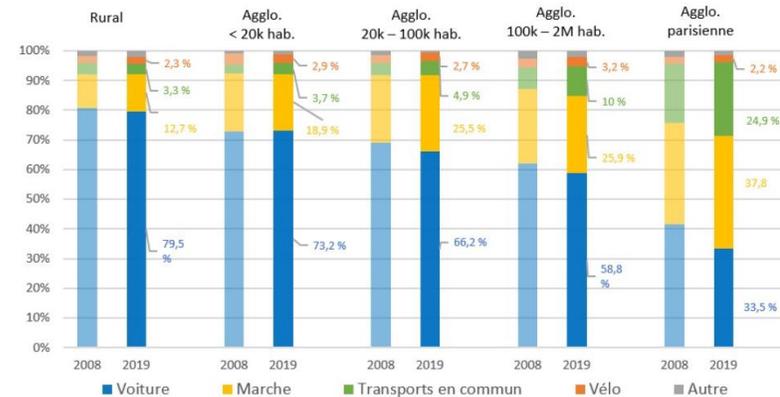
Évolution des parts des modes de transport (en nombre de déplacements) entre 2008 et 2019



Champ : déplacements des individus âgés de 6 ans ou plus résidant en France métropolitaine. - © Sources : SDES, Enquête mobilité des personnes 2018-2019 ; Insee, Enquête nationale transports et déplacements 2007-2008 (SOeS - Insee - Inrets).

- Evolutions lentes...

Évolution des parts des modes de transport (en nombre de déplacements) par tranche d'unités urbaines entre 2008 et 2019



Champ : déplacements des individus âgés de 6 ans ou plus résidant en France métropolitaine. - © Sources : SDES, Enquête mobilité des personnes 2018-2019 ; Insee, Enquête nationale transports et déplacements 2007-2008 (SOeS - Insee - Inrets).

- Surtout les grandes villes

- Et les jeunes...

Report modal transport collectif

Impact urbanisme majeur

	Part modale initiale	Potentiel maximum	Transfert maximum	Transfert volontariste haut	Transfert volontariste bas
Carré CM					
Actifs boucles travail	26%	71%	45 points	34 points	14 points
Carré OL					
Actifs boucles travail	8%	20%	12 points	9 points	4 points
Carré OS					
Actifs boucles travail	8%	30%	22 points	12 points	5 points

=> Quand l'offre est là, elle est utilisée mais ...

- Tramway 50 M€ /km ;
- metro/RER :100 M€/km ;
- CdC express :180 M€/km,
- Grand Paris Express: +190 M/km

- Saturation de l'offres
- Cout des infrastructures
- Rentabilité des modèles

Covoiturage : la voiture, mobilité collective enjeux

- Réduire l'autosolisme par le covoiturage, une réponse qui optimise des ressources existantes
 - Augmenter le débit de l'actif des collectivités que sont les routes
 - Augmenter l'utilisation de l'actif des individus que constitue le parc automobile
 - Une réponse « frugale » moins coûteuse que des investissements dans des transports collectifs lourds
 - Une réponse qui peut être mise en œuvre sur le papier à un horizon court.
- Une réponse qui cumule ses effets avec l'électrification du parc véhicule
- **On estime à 3% le recours au covoiturage pour les trajets du quotidien**
- Le Gouvernement s'est fixé un objectif ambitieux : **tripler le nombre de trajets réalisés en covoiturage du quotidien d'ici 2024 pour atteindre les 3 millions. (passer de 3% à 9% des trajets**

Cela équivaut à diminuer de 1 million le nombre de voitures sur les routes chaque jour et diminuer de 7 800 t les émissions quotidiennes de CO₂.

MULTIMODALITÉ ET MAAS : UN GRAAL DE LA MOBILITÉ DES PÉRIPHÉRIES URBAINES MAIS DES INNOVATIONS SYSTÉMIQUES DIFFICILES À COORDONNER

- Le MAAS : multimodalité mobilisant la Voiture le Vélo les Transports en commun
 - Voitures configurées pour covoiturage, autopartage, TC acceptant des vélos, navettes de tailles variées...
 - Parkings en bout de lignes de transports de masse, sécurisation pk vélo, ...
 - Chaine numérique complète assurant la coordination des infos et des flux économiques entre acteurs
 - Contrats et modèles économiques entre acteurs variés aux logiques différentes
 - Collectivités locales
 - Opérateurs de services numériques
 - Fournisseurs de technologies
 - Constructeurs automobiles
 - Opérateurs de transports
 - Gestionnaires d'infrastructures

